



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

División de Ciencias e Ingeniería

**CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DE UN ARREGLO
FOTOVOLTAICO DE 640 W_p POR MEDIO DE UN
SISTEMA ELECTRÓNICO**

TESIS RECEPCIONAL

Para obtener el Grado de

Ingeniero en Sistemas de Energía

PRESENTA

FRANCISCO ANTONIO NÚÑEZ MENDOZA

DIRECTOR DE TESIS

M.C. VÍCTOR MANUEL SÁNCHEZ HUERTA

Chetumal, Quintana Roo, Diciembre de 2006



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
División de Ciencias e Ingeniería

Tesis elaborada bajo la supervisión del Comité de Asesoría y aprobada como requisito parcial, para obtener el grado de:

INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA

COMITÉ

Director: M.C. Víctor Manuel Sánchez Huerta _____

Asesor: M.E.S. Roberto Acosta Olea _____

Asesor: Dr. Joel Omar Yam Gamboa _____

Chetumal, Quintana Roo, Diciembre de 2006

Dedicatoria

A mis padres, Francisco Núñez Rosado y Gilda María Mendoza Ruiz, por el gran afecto, apoyo y dedicación que me han brindado durante mi educación. En especial la extraordinaria comprensión y tolerancia que me han otorgado.

Padre, día a día me haces ver que triunfar en esta vida no es fácil y que no sólo se debe intentar, sino lograr. Este es el mayor reto que toda persona tiene por superar.

Madre, has sido mi más grande fuente de inspiración y ejemplo a seguir. Eres una persona que día a día me ha demostrado que uno debe preocuparse por su presente y por venir. Siempre estas animándome a no desistir en los estudios y apoyándome en la búsqueda de nuevas oportunidades.

A mis hermanos, Norma Noemí Núñez Mendoza y Manuel Núñez Mendoza, dos personas que siempre me han estado tolerando y apoyando. Son mis dos más grandes y queridos amigos.

Hermana, siempre velas porque no sea conformista aún con el más mínimo detalle, porque cada actividad que se realiza se debe hacer con el máximo empeño y optimismo.

Hermano, siempre me críticas no estar siempre activo y por dejar las ideas plasmadas en un papel. Siempre recordándome que las ideas no solo deben pensarse, lo más importante es hacerlas.

Agradecimientos

A la División de Ciencias en Ingeniería (DCI) de la Universidad de Quintana Roo (UQROO), por haberme admitido en su "Programa de apoyo a la titulación 2005". Adicionalmente al apoyo económico proporcionado (material, impresiones y empastados), le agradezco a la DCI, el permitirme usar sus instalaciones, sus instrumentos de medición, sus herramientas y sus módulos fotovoltaicos más recientes. Gracias por la confianza y la paciencia brindada respecto al tiempo de entrega de la tesis finalizada.

A mi director de tesis, M.C. Víctor Manuel Sánchez Huerta, por no dejar de creer que podía finalizar esta tesis; pese a las múltiples dificultades que se presentaron. Por involucrarme de lleno a la cultura del desarrollo de tecnología propia, por alentarme a continuar en el fortalecimiento de mis conocimientos y por la paciencia y tolerancia que me tuvo durante y después de la finalización de la tesis.

Al M.E.S. Roberto Acosta Olea, por todas las facilidades que me brindó respecto a la resolución del papeleo, sus consejos, sugerencias y las anécdotas que compartió. Me ha reafirmado que no cualquier persona decide tomar el reto de querer ser ingeniero. El camino para ser ingeniero no es sencillo, siempre existirán obstáculos, pero finalizar este reto es apenas el inicio. La verdadera prueba es el desenvolvimiento en la sociedad.

Al Dr. Joel Omar Yam Gamboa, por sus sugerencias y opiniones. Ahora más que antes, sé el valor de la correcta escritura de una idea, estar conciente de qué es lo que quiero dar a entender con una oración y la responsabilidad que implica el realizar una afirmación.

Al Ing. Set Jubal Castillo Avila, por orientar y ayudarme a resolver dudas en varias situaciones referentes a la parte experimental de la tesis. Por su confianza, tolerancia y claro por hacer más ameno el martirio de subir y bajar a diario los módulos fotovoltaicos del Laboratorio de Ingeniería de nuestra Universidad durante la parte experimental.

Al próximamente Doctor, M.C. Fernando Enrique Flores Murrieta, por haberme orientado, corregido y en especial soportado como su tutorado a lo largo de mi vida académica en la UQROO. Recordaré que existe diversión en el estudio y en el trabajo, pero que no debo olvidar que lo más importante es que existe también, una responsabilidad.

A mi "Cuate", Fátima Maricruz Chagolla Aguilar, a "Ely", Lizbeth Morales Salas, a "Che-Lid", María Lidieth Gutiérrez Sánchez y a "Rosy", Rosa Esperanza Calán Chuc, todas ellas Ingenieras. Ingenieras que me demuestran que existen infinidad de oportunidades para desarrollarse, tanto en el campo laboral como en la superación personal. Gracias por su amistad, las risas y sufrimientos que compartimos y en especial por la tolerancia que me tuvieron.

A todos mis compañeros de clase, compañeros que se convirtieron en excelentes amigos y con los cuales compartí alegrías y sufrimientos por igual.



Contenido

Índice de figuras	i
Índice de tablas	iv
Resumen	v

Capítulos:

I – Introducción

1.1 Conceptos del recurso solar.....	1
1.1.1 La radiación solar.....	2
1.1.2 Distribución espectral.....	2
1.1.3 Irradiancia e insolación.....	3
1.1.4 Componentes de la radiación.....	5
1.2 La celda solar.....	7
1.2.1 Elementos semiconductores y unión pn.....	8
1.2.2 Efecto fotovoltaico.....	9
1.2.3 Funcionamiento de la celda solar y partes esenciales.....	9
1.3 Módulo fotovoltaico.....	11
1.3.1 Elementos de un módulo fotovoltaico.....	11
1.4 Paneles, arreglos y sistemas fotovoltaicos.....	12
1.5 Nomenclatura general de los elementos fotovoltaicos.....	13
1.6 Aplicaciones de sistemas fotovoltaicos.....	14
1.7 Objetivos, hipótesis y descripción de los capítulos.....	14

II – Principales variables a medir en la caracterización del arreglo fotovoltaico

2.1 Instrumentos para medir la irradiancia solar.....	16
2.1.1 Piranómetro seleccionado para medición de irradiancia solar	18
2.2 Temperatura.....	19
2.3 Voltaje.....	19
2.4 Corriente.....	20
2.5 Sistema de adquisición de datos.....	21

2.6	Parámetros y característica de la celda solar, módulo fotovoltaico, panel fotovoltaico y arreglo fotovoltaico.....	22
2.6.1	Efectos de la intensidad luminosa, la temperatura y del sombreado.....	24
2.6.2	Interconexiones.....	26

III - Caracterización del módulo fotovoltaico

3.1	Métodos para la caracterización.....	29
3.2	Método seleccionado: método de capacitor controlado electrónicamente.....	31
3.3	Descripción del dispositivo desarrollado.....	32
3.3.1	Etapa de control.....	32
3.3.1.1	Circuito temporizador.....	33
3.3.1.2	Circuito detector de nivel.....	34
3.3.1.3	Circuito amplificador de corriente.....	36
3.3.2	Etapa de potencia.....	38
3.3.2.1	Capacitor.....	38
3.3.2.2	MOSFET.....	41
3.4	Uso del graficador de voltaje y el software Flukeview ®.....	43
3.5	Módulos fotovoltaicos.....	48
3.6	Ubicación e instalación del arreglo fotovoltaico.....	49
3.7	Procedimiento experimental.....	50

IV - Resultados Experimentales

4.1	Curva característica de cada módulo fotovoltaico.....	52
4.2	Eficiencia de cada módulo fotovoltaico caracterizado.....	60
4.3	Conexiones serie y paralelo.....	58
4.4	Prueba de linealidad.....	64

V - Conclusiones

5.1	Conclusiones.....	67
5.2	Recomendaciones.....	68
	Fuentes de información.....	70



Índice de figuras

Figura	Descripción	Página
Capítulo I – Introducción		
1	Esquema con las principales partes y características que componen al Sol.....	2
2	Gráfica de la distribución espectral del Sol (Centro Radiométrico Mundial [WRC]).....	3
3	Esquema del concepto de hora solar pico.....	4
4	Mapa de insolación global diaria promedio anual para la República Mexicana en HSP.....	5
5	Dibujo con los principales componentes de la radiación solar.....	6
6	Representación gráfica de la masa de aire a diferentes ángulos cenit.....	7
7	Fotografías de celdas solares a base de Silicio: a) monocristalino, b) policristalino y c) amorfo.....	7
8	Esquema representativo de algunos semiconductores: a) Silicio puro, b) material semiconductor tipo p y c) material semiconductor tipo n.	8
9	Esquema de la unión tipo pn: a) unión, b) movimiento de cargas eléctricas y c) equilibrio.....	9
10	Esquema de funcionamiento de una celda solar.....	10
11	Esquema con los elementos esenciales de una celda solar.....	10
12	Fotografía de diferentes colores de celdas solares (este color que se observa se debe a la capa anti-reflectora).....	11
13	Dibujo de la sección de un módulo fotovoltaico.....	11
14	Esquema de la construcción de un módulo fotovoltaico.....	12
15	Esquemización de la celda, módulo, panel y arreglo solar o fotovoltaico.....	13
Capítulo II - Principales variables a medir en la cauterización del arreglo fotovoltaico		
16	Fotografías de un: a) piranómetro con banda de sombreado, b) piranómetro de primera clase.....	16
17	Esquema con los principales componentes de un piranómetro.....	17
18	Esquema de la conexión de los termopares en una termopila.....	17
19	(a) esquema de un termopar y (b) su símbolo.....	17
20	(a) esquema de una termopila en estrella y b) fotografía de un piranómetro en la que se observan las uniones calientes, área con material negro dentro del domo de cristal.....	18
21	Fotografías de piranómetros con sensor de fotocelda.....	18
22	Fotografía del Piranómetro Eppley ® modelo 8-48.....	18
23	Fotografía del termómetro de infrarrojos tipo pistola.....	19
24	Esquema de medición: a) una corriente eléctrica circula por un conductor, generando un campo magnético y b) la magnitud de la corriente eléctrica es medida sin interrumpir su paso.....	20
25	Punta de prueba.....	20
26	Fotografía del graficador digital de voltaje portátil.....	21
27	Curva teórica característica V-I.....	22
28	Dibujo de una placa de datos. Módulo fotovoltaico SOLAREX de 64.5 W.....	23
29	Efecto de la intensidad luminosa en un módulo fotovoltaico.....	24
30	Curva teórica del efecto de la temperatura en un módulo fotovoltaico.....	24
31	Esquema de un panel fotovoltaico de 3 módulos.....	25

32	Esquema de los efectos de áreas sombreadas en una celda fotovoltaica.....	25
33	Curva teórica de un módulo fotovoltaico con una celda sombreada.....	26
34	Esquema de conexión de módulos fotovoltaicos conectados en paralelo.....	26
35	Esquema de conexión de módulos fotovoltaicos conectados en serie.....	27
36	Esquema de conexión de un arreglo fotovoltaico.....	28

Capítulo III - Caracterización del módulo fotovoltaico

37	Esquema de una resistencia variable como una carga para medir la curva de V-I.....	29
38	Esquema de un capacitor como una carga para medir la curva de V-I.....	30
39	Esquema de transistores utilizados como carga para medir la curva de V-I.....	31
40	Diagrama simplificado del dispositivo desarrollado.....	31
41	Diagrama de bloques completo del circuito de prueba.....	32
42	Diagrama de conexión de la etapa de control.....	33
43	Diagrama de bloques interno del NE555/LM555/SA555.....	33
44	Esquema del circuito integrado temporizador configurado para una operación monoestable.....	34
45	Esquema completo del amplificador operacional y su esquema simplificado.....	35
46	Esquema de la configuración como detector de nivel no inversor del amplificador operacional y su esquema de funcionamiento.....	35
47	Amplificador operacional configurado como un detector de nivel.....	35
48	Esquema de los transistores pnp y npn utilizados para amplificar la corriente.....	36
49	Esquema de conexión de los transistores para brindar potencia al pulso.....	36
50	Esquema de funcionamiento en el caso uno: se presiona el botón de disparo del temporizador.....	37
51	Esquema de funcionamiento en el caso dos: no se presiona el botón de disparo del temporizador.....	37
52	Fotografía de la vista física de la etapa o sistema de control.....	38
53	Diagrama general del circuito de potencia.....	38
54	Esquema de la carga de un capacitor en un circuito RC.....	39
55	Gráfico de los cambios en la corriente y el voltaje en la carga de un capacitor.....	39
56	Gráfico de la curva descrita por la corriente I_c durante la carga del capacitor.....	40
57	Gráfico de la curva descrita por el voltaje V_c durante la carga del capacitor.....	40
58	Símbolo de las diferentes presentaciones del MOSFET.....	41
59	Esquema de control y funcionamiento del MOSFET de canal n en modo interruptor.....	42
60	La corriente puede ser medida con: a) una punta de corriente b) una resistencia Shunt.....	42
61	Fotografía del circuito de potencia vista física.....	43
62	Fotografía de la vista final del dispositivo de carga capacitiva.....	43
63	Fotografía con la descripción de los botones de operación del Scopemeter.....	44
64	Fotografía de las terminales de conexión del Scopemeter. De izquierda a derecha se tiene la terminal del canal A, la terminal Común y la terminal del canal B.....	44
65	Fotografías de las teclas de ajuste para el canal A.....	45
66	Fotografías de las teclas de ajuste para el canal B.....	45
67	Fotografía de la tecla de ajuste de la base de tiempo. Al presionar s aumenta la base de tiempo y al presionar ns disminuye.....	45
68	Fotografía de la tecla para abrir el menú del Scopemeter.....	46
69	Fotografía del puerto óptico de comunicación.....	46
70	Fotografía del menú de Selección del puerto de comunicación.....	46
71	Fotografía en la que se observa el interruptor de encendido y ajuste de cero de la punta amperimétrica.....	47

72	Fotografía del registro desplegado en la pantalla del Scopemeter con un ejemplo de medición de los cambios de voltaje y corriente.....	48
73	Fotografía de uno de los módulos caracterizados y su placa de datos.....	48
74	Fotografías satelitales de la ubicación geográfica del arreglo fotovoltaico.....	49
75	Fotografías del equipo instalado.....	50

Capítulo IV - Resultados Experimentales.

76	Curva V-I del módulo 1. $I_{\text{solar}} = 931.80 \text{ W m}^{-2}$, $T = 55 \text{ }^{\circ}\text{C}$. 30-mar-06.....	52
77	Curva V-I del módulo 2. $I_{\text{solar}} = 912.58 \text{ W m}^{-2}$, $T = 54 \text{ }^{\circ}\text{C}$. 30-mar-06.....	53
78	Curva V-I del módulo 3. $I_{\text{solar}} = 941.40 \text{ W m}^{-2}$, $T = 55 \text{ }^{\circ}\text{C}$. 04-abr-06.....	53
79	Curva V-I del módulo 4. $I_{\text{solar}} = 912.58 \text{ W m}^{-2}$, $T = 57 \text{ }^{\circ}\text{C}$. 04-abr-06.....	54
80	Curva V-I del módulo 5. $I_{\text{solar}} = 979.83 \text{ W m}^{-2}$, $T = 58 \text{ }^{\circ}\text{C}$. 06-abr-06.....	54
81	Curva V-I del módulo 6. $I_{\text{solar}} = 989.43 \text{ W m}^{-2}$, $T = 58 \text{ }^{\circ}\text{C}$. 06-abr-06.....	55
82	Curva V-I del módulo 7. $I_{\text{solar}} = 960.61 \text{ W m}^{-2}$, $T = 52 \text{ }^{\circ}\text{C}$. 06-abr-06.....	55
83	Curva V-I del módulo 8. $I_{\text{solar}} = 970.22 \text{ W m}^{-2}$, $T = 52 \text{ }^{\circ}\text{C}$. 06-abr-06.....	56
84	Gráfico comparativo de las corrientes de corto circuito y voltajes a circuito abierto de cada uno de los módulos fotovoltaicos.....	57
85	Gráfico comparativo de las corrientes y voltajes de máxima potencia de cada módulo fotovoltaico.....	58
86	Gráfico comparativo de la potencia máxima de cada módulo fotovoltaico.....	59
87	Curva de V-P para el módulo 1.....	59
88	Gráfico de la eficiencia de cada módulo fotovoltaico.....	61
89	Curvas V-I para una conexión en serie y paralelo de dos módulos fotovoltaicos.....	62
90	Curvas V-I de la conexión en serie y la conexión en paralelo de cuatro módulos fotovoltaicos.....	63
91	Gráfico para la comparación entre la curva teórica y la curva real de las conexiones en serie y paralelo del primer grupo.....	64
92	Gráfico para la comparación entre la curva teórica y la curva real de las conexiones en serie y paralelo del segundo grupo.....	65
93	Gráfico para la comparación entre la curva teórica y la curva real de las conexiones en serie y paralelo del tercer grupo.....	65
94	Gráfico para la comparación entre la curva teórica y la curva real de las conexiones en serie y paralelo del cuarto grupo.....	66



Índice de tablas

<u>Tabla</u>	<u>Descripción</u>	<u>Página</u>
Capítulo I – Introducción		
1	Distribución espectral del Sol	3
2	Principales características de las celdas solares a base de Silicio	7
Capítulo II - Principales variables a medir en la cauterización del arreglo fotovoltaico		
3	Condiciones Estándar de Prueba (CEP), mejor conocidas como Standard Test Condition (STC).....	22
4	Eficiencia en celdas solares comerciales a base de silicio.....	23
Capítulo III - Caracterización del módulo fotovoltaico		
5	Características de los MOSFET empleados en el circuito de potencia.....	42
6	Características del módulo TE850.....	49
Capítulo IV - Resultados Experimentales		
7	Corriente de corto circuito y voltaje a circuito abierto de cada uno de los módulos fotovoltaicos.....	56
8	Corrientes y voltajes de máxima potencia y potencia máxima de los módulos caracterizados.....	58
9	Eficiencias de los módulos caracterizados.....	60
10	Principales parámetros obtenidos de la caracterización de los ocho módulos TE850.....	61
11	Datos teóricos contra datos medidos para una conexión serie y conexión paralelo de dos módulos fotovoltaicos.....	62
12	Datos teóricos contra datos medidos para una conexión serie y una conexión paralelo de cuatro módulos fotovoltaicos.....	63

Resumen

En la carrera de Ingeniería en Sistemas de Energía impartida en la Universidad de Quintana Roo, se impulsa grandemente el uso de las energías renovables, en especial las tecnologías que aprovechan la energía solar y la energía eólica. Para el área de la energía solar fotovoltaica la Universidad cuenta con módulos fotovoltaicos de diferentes capacidades; los cuales están destinados a la demostración de las aplicaciones de ésta tecnología y en sus planes a futuro, serán la fuente de generación eléctrica para la iluminación de su parque de energías renovables en su Campus de Chetumal en el Estado de Quintana Roo.

Para poder conocer la carga eléctrica máxima real que sus módulos fotovoltaicos puede alimentar, la Universidad necesita caracterizar a cada uno de los módulos fotovoltaicos que posee, bajo las condiciones que se tienen en la propia Universidad. En esta tesis se tiene el objetivo principal de la caracterización de una fracción de sus módulos fotovoltaicos que conforman a un arreglo fotovoltaico de $640 W_p$ (el arreglo aún no ha sido caracterizado y tampoco ha sido puesto en operación).

Para la caracterización se desarrolló un sistema electrónico de prueba basado en el método de usar un capacitor (que actúa como una carga demandante de energía eléctrica conectada al módulo fotovoltaico). Esto permite que el módulo fotovoltaico no pueda pasar del estado de corto circuito al estado de circuito abierto en un instante, si no que le toma tiempo suficiente para medir los cambios en la corriente eléctrica y el voltaje del módulo durante la transición de estos estados. El sistema electrónico desarrollado soporta aproximadamente un máximo de 50 A en corriente de corto circuito y 200 V como voltaje a circuito abierto. Gracias a este sistema electrónico de prueba, se realiza y presenta la caracterización eléctrica de los ocho módulos fotovoltaicos a base de Silicio policristalino que conforman al arreglo fotovoltaico.

Se presentan algunas de las técnicas para realizar la caracterización de un módulo fotovoltaico, así como las ventajas y desventajas de cada una. En la parte experimental se describe el proceso de caracterización y cómo se midieron las variables de importancia. Entre ellas la corriente y voltaje del módulo fotovoltaico, la temperatura en el módulo y la irradiancia solar presente en ese instante. Se realizan comparaciones entre los valores teóricos y los valores experimentales de las curvas voltaje-corriente para conexiones en serie y conexiones en paralelo de grupos de 2 y 4 módulos fotovoltaicos.

Como resultados obtenidos de la parte experimental se tienen las curvas características de los ocho módulos fotovoltaicos. En promedio a una irradiancia solar de $949.8 W m^{-2}$ y una temperatura en los módulos fotovoltaico de $55 ^\circ C$, se tiene que las corrientes de corto circuito y de máxima potencia son prácticamente iguales a los valores nominales, 5.0 A y 4.6 A respectivamente. Sin embargo los voltajes a circuito abierto y de máxima potencia sufren caídas de voltaje, ya que se tienen 18.9 V y 13.5 V respectivamente. Esto produce una potencia máxima $59.4 W_p$ y una eficiencia de conversión energía solar a energía eléctrica de 9.1%. La mayor eficiencia y potencia máxima corresponden al módulo marcado como número 8, eficiencia del 9.4% y 62 W de potencia para una irradiancia solar de $970 W m^{-2}$. Las caídas de voltaje y consecuentemente la potencia alcanzada se deben principalmente a los efectos de la temperatura.

De las comparaciones entre valores teóricos y los valores experimentales de las interconexiones de los módulos fotovoltaicos, se tiene que las curvas de voltaje contra corriente experimentales tienen la forma esperada, pero no las magnitudes. Se observa un comportamiento no exactamente lineal. Esto se debe a que los módulos fotovoltaicos a pesar de ser del mismo modelo y marca, no generan energía eléctrica en las mismas proporciones. En adición a ello, debido a la interconexión de los módulos, se requiere de conductores eléctricos y estos provocan pequeñas pérdidas por la resistencia del conductor mismo.

Capítulo I - Introducción

Mundialmente el aprovechamiento de la energía solar está siendo ampliamente utilizado como una fuente de energía alternativa a los combustibles de origen fósil, en especial la energía solar fotovoltaica. Si bien las tecnologías que aprovechan esta fuente no son nuevas, en nuestro país aún no es de un uso cien por ciento común en la sociedad.

México cuenta con grandes recursos energéticos renovables que no han sido utilizados de la forma más apropiada. Más de la mitad del territorio nacional presenta condiciones de recurso solar excelentes a lo largo del año; recurso solar que podría utilizarse para el ahorro energético por medio del diseño bioclimático de edificaciones, generación de electricidad y calor a una mayor escala.

En la Universidad de Quintana Roo (UQROO) se imparte la carrera de Ingeniería en Sistemas de Energía y una de sus vertientes es la formación de profesionales, con especialidad en fuentes renovables de energía, siendo una de ellas la energía solar.

Año con año la UQROO realiza demostraciones de las aplicaciones y aprovechamiento de la tecnología solar fotovoltaica en las asignaturas correspondientes y también para el público en general. Sin embargo, la institución no cuenta con un sistema que le permita conocer los parámetros eléctricos reales de los módulos fotovoltaicos que tiene. Este hecho no permite hacer una proyección de la energía eléctrica que se podría obtener de los módulos fotovoltaicos a partir de los datos de medición de irradiancia solar en un sitio cualquiera. De esta forma, en este trabajo se caracterizan ocho módulos fotovoltaicos Total-Energie TE850, bajo el recurso solar que se recibe en la Universidad a fin de poseer mayor información y realizar un mejor dimensionamiento para proyectos en el futuro.

Además, la UQROO instalará y pondrá en operación una estación destinada a la cuantificación del recurso solar y eólico principalmente; debido a ello este trabajo se convertirá en un complemento al cuantificar el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica en los proyectos que se desarrollen en su parque de energías renovables ubicado en su campus de Chetumal, Quintana Roo.

1.1 Conceptos del recurso solar.

A continuación se presentan los conceptos básicos del área de la energía solar fotovoltaica que son necesarios para el desarrollo de este trabajo, así como la descripción de las componentes principales de un sistema fotovoltaico.

El Sol es la estrella más cercana a la Tierra y básicamente consiste en una esfera de materia gaseosa intensamente caliente (figura 1). El Sol es un continuo reactor de fusión que está constituido por gases como un gran contenedor mantenido por fuerzas gravitacionales y tiene un diámetro aproximado de 1.39×10^9 m y una temperatura efectiva de cuerpo negro de 5777 K [4].

La reacción nuclear principal en el interior del Sol es la fusión termonuclear. En ella cuatro átomos de hidrógeno se combinan para formar un átomo de helio. El resultado es que la masa del núcleo del helio es menor al de los cuatro átomos y la masa perdida en la reacción se convierte en energía radiante.

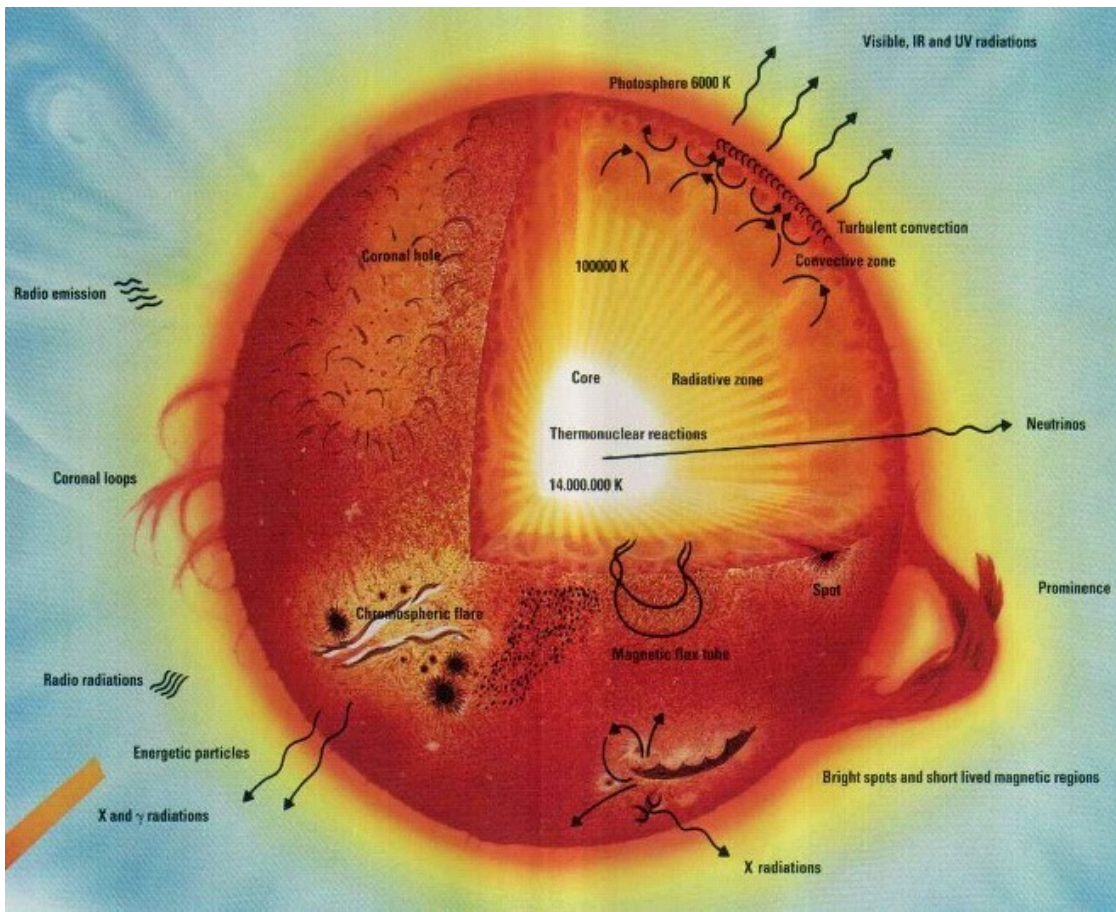


Figura 1. Esquema con las principales partes y características que componen al Sol.

1.1.1 La radiación solar.

La radiación solar es la energía emitida por el Sol y que se propaga en forma de radiación de ondas electromagnéticas o fotones. La combinación de tres factores determinan el flujo de energía que incide sobre la superficie de la Tierra; estos factores son: La distancia Tierra-Sol, el diámetro solar y la temperatura del Sol.

La radiación que emite el Sol es en toda la gama del espectro electromagnético y la intensidad de la radiación solar que llega a la parte superior de la atmósfera (a la distancia media del Sol a la Tierra fuera de la atmósfera) se conoce con el término de constante solar.

La **Constante solar (Gsc)**, es el flujo de energía proveniente del Sol, que incide sobre una superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación solar, ubicada a la distancia media de la Tierra al Sol, fuera de toda atmósfera. Ésta constante es igual a 1367 W m^{-2} (con una desviación estándar de 1.6 W m^{-2}), valor adoptado en 1981 por la *Commission for Instruments and Methods of Observation* (CIMO) de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) [19].

1.1.2 Distribución espectral.

El Sol emite radiación hacia el espacio exterior en toda la gama del espectro electromagnético, desde los rayos gama hasta las ondas de radio, y debido a las características de la atmósfera terrestre la cantidad

de radiación que llega a nuestra superficie es una fracción de la total emitida. Ésta fracción de energía que se recibe en el planeta es comúnmente llamada luz solar [26].

Distintas longitudes de onda que se agrupan en tres bandas: Ultravioleta, visible e infrarrojo, se encargan de conformar a la luz solar. En la figura 2 se muestra la distribución espectral del Sol.

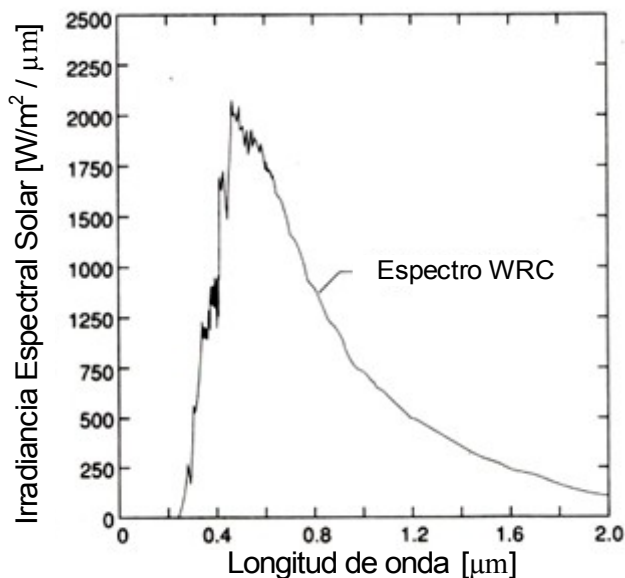


Figura 2. Gráfica de la distribución espectral del Sol (Centro Radiométrico Mundial [WRC]) [4].

En la tabla 1 se muestra la distribución espectral del Sol para fines prácticos de aprovechamiento de la energía solar.

Tabla 1. Distribución espectral del Sol [6]

Ultravioleta	UV	0.01 a 0.38 μm	6%
Visible	VIS	0.38 a 0.78 μm	47%
Infrarrojo	IR	0.78 a 3.00 μm	47%

1.1.3 Irradiancia e Insolación.

La **irradiancia**, es también conocida como densidad de flujo de energía de radiación y se define como la razón a la cual la energía de radiación es emitida o recibida por un objeto por unidad de tiempo y unidad de área. La irradiancia se puede calcular con base a la ecuación (1).

$$I = \frac{d}{dA} \left(\frac{d\varepsilon}{dt} \right) = \frac{dP}{dA}, \quad (1)$$

donde: ε es la cantidad de energía de radiación en Joules [J], con la que se cuenta en cierto momento, P es la potencia de radiación o flujo de energía de radiación en Watts [W], A es el área del objeto que recibe la radiación en metros cuadrados [m^2] y t es la unidad de tiempo en segundos [s].

La potencia de radiación es la razón a la cual la energía de radiación la emite o recibe un cuerpo por unidad de tiempo. La potencia de radiación se puede calcular con base a la ecuación (2)

$$P = \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2)$$

La **irradiancia solar**, es la intensidad de la luz solar, el valor instantáneo de la potencia luminosa del Sol recibida en una unidad de área. Generalmente se expresa en Watt por metro cuadrado [W m^{-2}].

La **insolación**, es también llamada irradiación, es la cantidad de energía solar recibida durante un periodo de tiempo dado. Es decir, es la irradiancia solar acumulada sobre la superficie en un tiempo determinado en Watt-hora/metro cuadrado [W-h m^{-2}], si se toma como unidad de medición del tiempo una hora. La insolación se puede calcular con base a la ecuación (3).

$$\text{Insolación} = \int_{t_1}^{t_2} \frac{d}{dA} \left(\frac{d\varepsilon}{dt} \right) dt = \frac{d}{dA} \int_{t_1}^{t_2} d\varepsilon \quad (3)$$

La unidad empleada para expresar la insolación diaria promedio es la **hora solar pico (HSP)**; la cual se refiere a la energía recibida durante una hora a una irradiancia promedio de 1000 W m^{-2} . La insolación es considerada el área bajo la curva de irradiancia solar respecto al tiempo, las horas solares pico corresponden al área de un rectángulo cuya base es el número de horas en que aparentemente el Sol ha estado brillando con una intensidad de 1000 W m^{-2} ; este concepto se ejemplifica en la figura 3.

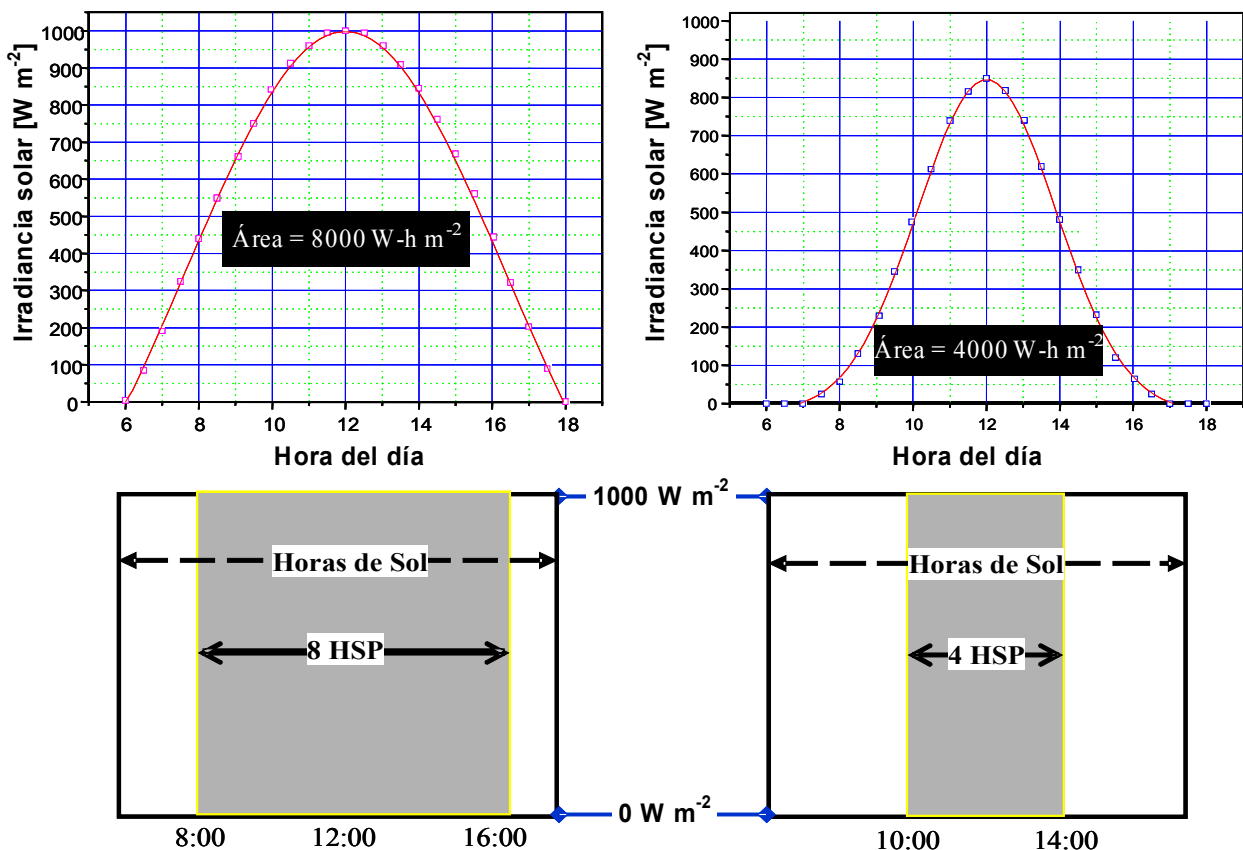


Figura 3. Esquema del concepto de hora solar pico.

El mapa de radiación solar típico de la república mexicana que se muestra en la figura 4, permite observar las horas solares pico que se recibe en México. Las superficies que se encuentran dibujadas corresponden a las horas-pico de insolación global diaria promedio al año. De acuerdo con el mapa de la

figura 4, la mayor parte del Estado de Quintana Roo cuenta con 4.5 horas solares pico en promedio [23]. De este mismo mapa se observa que las costas tienen un número de horas solares pico menor, en comparación con las zonas no costeras de la República Mexicana. Esto se debe a que las corrientes de aire que se tienen en las costas arrastran nubosidad que consecuentemente causan intermitencias en la irradiancia solar.

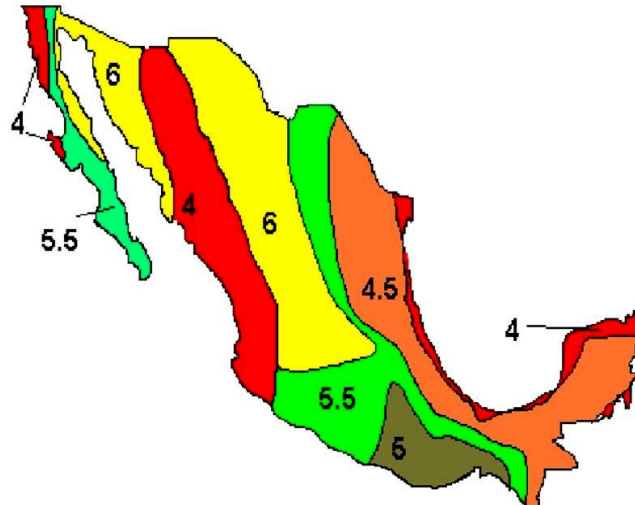


Figura 4. Mapa de insolación global diaria promedio anual para la República Mexicana en HSP.

1.1.4 Componentes de la radiación solar.

La cantidad de energía solar que llega a la superficie terrestre se ve afectada al atravesar la atmósfera debido a procesos de absorción, reflexión y dispersión de la luz solar. Entre los factores que afectan la radiación solar se pueden encontrar algunos de tipo atmosféricos como las nubes, las partículas suspendidas y la contaminación; también se encuentran los factores geográficos como la rotación diaria y la traslación de la Tierra, la latitud, la longitud y la inclinación de la superficie captadora.

La máxima irradiancia solar en promedio que llega a la superficie de la Tierra (a nivel del mar), es del orden de 1000 W m^{-2} . Esto se da cuando el cielo está despejado, sin partículas en el aire, sin absorción molecular (a nivel del mar) y con el Sol en el cenit del captador. En cambio en un día nublado la irradiancia solar típica es de 100 W m^{-2} [23]. En lugares más elevados es más común tener un valor máximo de irradiancia solar superior a los 1000 W m^{-2} .

La **radiación solar directa (Gb)**, es la cantidad de radiación conformada por los rayos de luz solar que no han sido dispersados por las partículas suspendidas en la atmósfera y que se reciben en una superficie captadora.

La **radiación solar difusa (Gd)**, corresponde a la cantidad de radiación que llega de forma indirecta a la superficie captadora; debido a una dispersión por los obstáculos que hay en la atmósfera y por el reflejo del terreno adyacente a la superficie. La radiación reflejada (Gr) es parte de la radiación difusa.

En la figura 5 se muestran los componentes de la radiación solar.

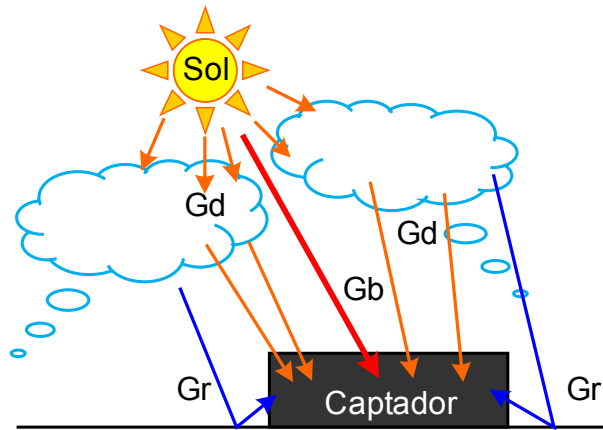


Figura 5. Dibujo con los principales componentes de la radiación solar.

La **radiación global (G_r)**, es la suma de las componentes de la radiación directa y difusa, es decir, es la radiación real que llega a la superficie. Sus unidades son el Watt por metro cuadrado [$W m^{-2}$]. En un día despejado la radiación directa es la máxima componente que recibe un captador. En cambio en un día nublado, la radiación difusa es la componente principal.

La **masa de aire (AM)**, se refiere a la longitud del camino que la radiación del Sol atraviesa en la atmósfera para llegar a la superficie captadora. La posición relativa del Sol respecto a la horizontal del lugar determina el valor de la masa de aire. Cuando los rayos solares caen formando un ángulo de 90° respecto a la horizontal, se dice que el Sol ha alcanzado su cenit y la masa de aire sería igual a la unidad, debido a que en esta posición la radiación directa del Sol atraviesa una distancia mínima a través de la atmósfera. Cuando el Sol está más cercano al horizonte, esta distancia se incrementa, es decir, la masa de aire es mayor [4].

Se asigna $AM=0$ a la radiación solar que se encuentra fuera de la atmósfera y para valores comprendidos aproximadamente entre 0 a 70° y a nivel del mar la masa de aire puede calcularse con base a la ecuación (4)

$$m = \frac{1}{\cos \theta_z}, \quad (4)$$

donde: θ_z es la magnitud del ángulo cenit y corresponde al ángulo entre la vertical y la línea al Sol.

La figura 6 ejemplifica los valores calculados a partir de la ecuación (4).

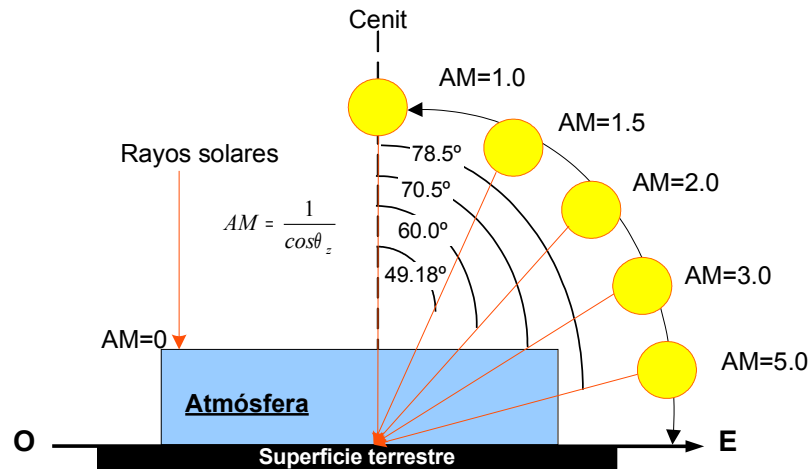


Figura 6. Representación gráfica de la masa de aire a diferentes ángulos cenit.

1.2 La celda solar.

Es un dispositivo semiconductor que *transforma la luz solar en energía eléctrica de corriente directa o continua*; es también el elemento fundamental o la unidad mínima de un sistema fotovoltaico. La celda solar es también llamada célula solar, generador fotovoltaico o generador de electricidad solar.

Las celdas solares más utilizadas y comunes son a base de Silicio. Estas celdas solares se encuentran en tres distintas formas del material: Silicio monocristalino, Silicio policristalino y Silicio amorfo. En la figura 7 se muestran estos tipos de celdas.

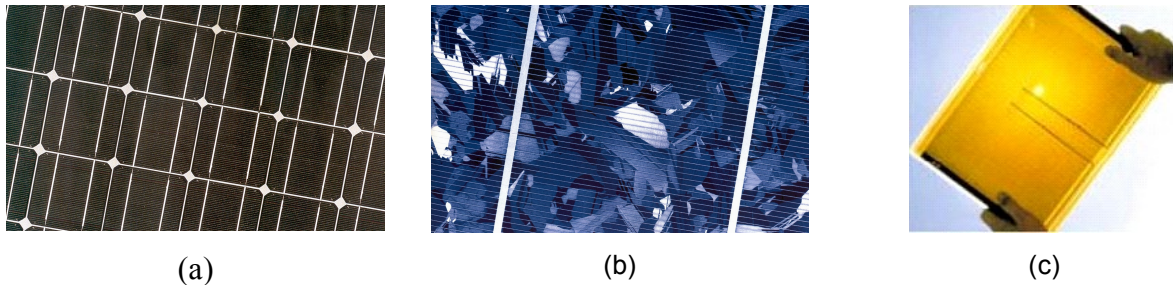


Figura 7. Fotografías de celdas solares a base de Silicio: a) monocristalino, b) policristalino y c) amorfo.

En la tabla 2 se describen algunas de las características de las celdas fabricadas a base de Silicio.

Tabla 2. Principales características de las celdas solares a base de Silicio [8] [10].

Tipo de Silicio	Eficiencia	Obtención	Particularidades
Monocristalino	12-15%	A partir de barras cilíndricas de Silicio monocristalino (Silicio muy puro) producidas en hornos.	Tecnología de fabricación más costosa y complicada. Mayores eficiencias.
Policristalino	11-14%	A partir de bloques de Silicio obtenidos por fusión de trozos de Silicio puro en moldes especiales.	Presenta un costo medio y es ampliamente utilizado.
Amorfo	5-7%	Deposición de capas muy delgadas (películas de 0.001 mm de espesor) de Silicio sobre superficies inertes como el vidrio, cerámica o metal con una estructura amorfa (no cristalina).	Tecnología de fabricación más económica. Es un material flexible. Menores eficiencias.

1.2.1 Elementos semiconductores y unión tipo pn.

Un material semiconductor es aquel que puede actuar como un conductor o un aislante al presentar un estado intermedio entre estos. Sus propiedades varían de acuerdo a las condiciones a las que sea sometido. Un material semiconductor puede aumentar su conductividad con un incremento de luz, temperatura o la adición de impurezas en su estructura atómica; o en caso contrario, actuar como aislante a temperaturas bajas.

El átomo de un elemento semiconductor tiene cuatro electrones en su capa de valencia; un ejemplo de semiconductores son el Germanio y el Silicio. Un cristal de Silicio puro se consigue al unirse átomos de elementos semiconductores tetravalentes entre si; en esta unión los cuatro electrones de valencia del Silicio se comparten con los electrones de un átomo de Silicio vecino. En la figura 8a se representa un átomo de Silicio puro.

Cuando a un material semiconductor se le adhieren átomos con un número de electrones de valencia diferente (impurezas) se obtienen dos tipos de diferentes de semiconductor. Un material semiconductor con un mayor número de electrones libres llamado material semiconductor tipo n o un material semiconductor con mayor número de huecos (menor cantidad de electrones libres) que se conoce como material semiconductor tipo p. En la figura 8b y 8c se muestra el modelo de un material semiconductor dopado.

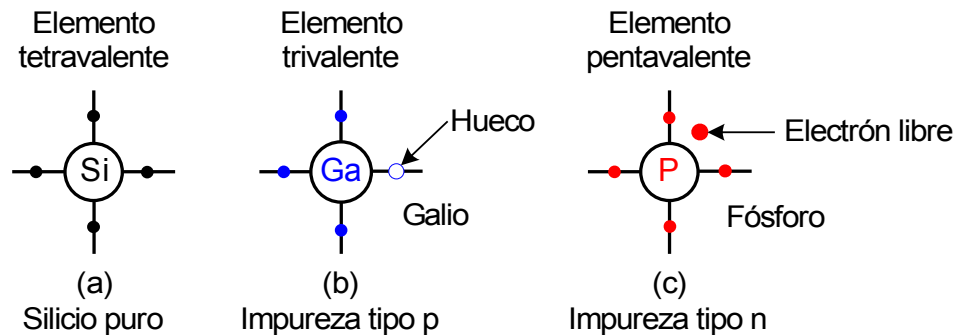


Figura 8. Esquema representativo de algunos semiconductores: a) Silicio puro, b) material semiconductor tipo p y c) material semiconductor tipo n.

Los huecos en la estructura atómica del material semiconductor se consideran como cargas positivas al ser una ausencia de cargas negativas y de la misma forma que los electrones libres pueden presentar movimiento en la estructura provocando un flujo de huecos en el cristal semiconductor.

Una celda fotovoltaica básicamente, se obtiene cuando se une un material semiconductor tipo p y un material semiconductor tipo n. Cuando se unen estos materiales se presenta un flujo de cargas ente los materiales. La unión de ambos materiales semiconductores se presenta en la figura 9a.

Los electrones que se encuentran en exceso en el semiconductor n migran hacia el semiconductor p y los huecos del semiconductor p lo hacen en dirección al semiconductor n. El movimiento de las cargas eléctricas a través de la unión genera un campo eléctrico en la unión (figura 9b). Una vez alcanzado el equilibrio de las cargas en los materiales, el campo eléctrico desaparece (figura 9c). Sin embargo la concentración de huecos y electrones en las cercanías de la unión impide la difusión total de cargas entre los materiales semiconductores p y n.

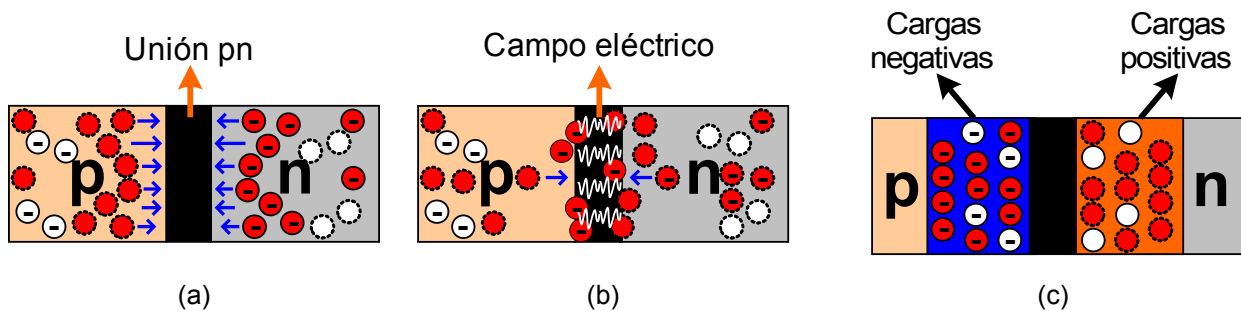


Figura 9. Esquema de la unión tipo pn: a) unión, b) movimiento de cargas eléctricas y c) equilibrio.

1.2.2 Efecto fotovoltaico.

El efecto fotovoltaico es el proceso en el cual los fotones crean pares electrón-hueco en materiales de elementos semiconductores generando un voltaje por acción de la luz. En este efecto la energía luminosa excita los electrones de valencia, generando pares electrón-hueco que se recolectan para producir una corriente. Las mayores eficiencias del efecto fotovoltaico se han alcanzado en materiales sólidos, específicamente en los elementos semiconductores [5] [26].

La generación del efecto fotovoltaico se puede conseguir si una luz incide sobre un material semiconductor como el de la figura 9. Al haber incidencia de luz, los fotones del rayo de la luz chocan con los electrones y les ceden su energía, esto se conoce como una absorción de fotones. Si la energía de los fotones es la adecuada los electrones excitados se liberan de los átomos formando pares electrón-hueco, en caso contrario solamente habrá aumento de temperatura.

Debido a la difusión los electrones en el material semiconductor tipo p y los huecos en el material semiconductor tipo n, alcanzan la unión en donde el campo eléctrico existente se encarga de llevarlos a la región donde estos electrones y huecos son mayoría (reacomodo de cargas). Este desplazamiento de las nuevas cargas hace que la región p se cargue positivamente y la región n negativamente dando lugar a un voltaje, a este proceso se le llama efecto fotovoltaico.

Si se le colocan terminales a los semiconductores descritos en el párrafo anterior, se podrá medir un voltaje y el potencial asociado dependerá de la concentración de impurezas. Para el Silicio (con niveles de impurezas de 10^{15} cm^{-3} tanto en el tipo n como en el tipo p), se tienen potenciales de 550 mV. Si a las terminales se conecta una carga que demande energía eléctrica, la fuerza electromotriz producirá una corriente eléctrica [7].

1.2.3 Funcionamiento de la celda solar y partes esenciales.

La producción de energía eléctrica se presenta cuando hay absorción de luz en la celda solar como se muestra en la figura 10; esto permite que se den los siguientes fenómenos en el interior de la celda solar.

1. La generación de los portadores de carga: electrones y huecos.
2. Separación de cargas debido a la formación de un campo eléctrico interno (por medio de una unión tipo pn).
3. Flujo y concentración de los electrones en la cara de la celda solar que ve la luz, y de los huecos en la parte oculta al Sol.
4. Se produce un voltaje y al conectar una carga que demande energía circulará una corriente eléctrica por el flujo de electrones.

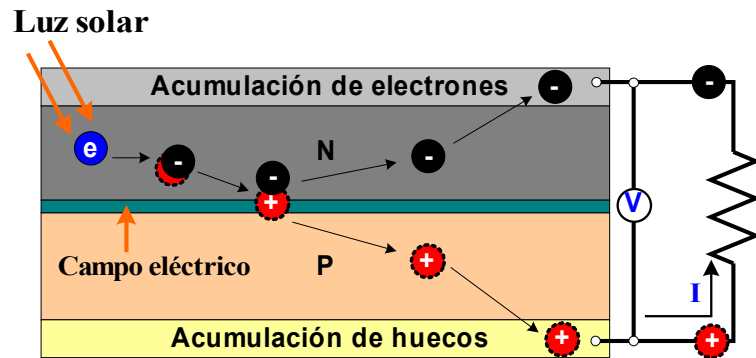


Figura 10. Esquema de funcionamiento de una celda solar.

Los elementos esenciales de una celda solar se pueden observar en la figura 11.

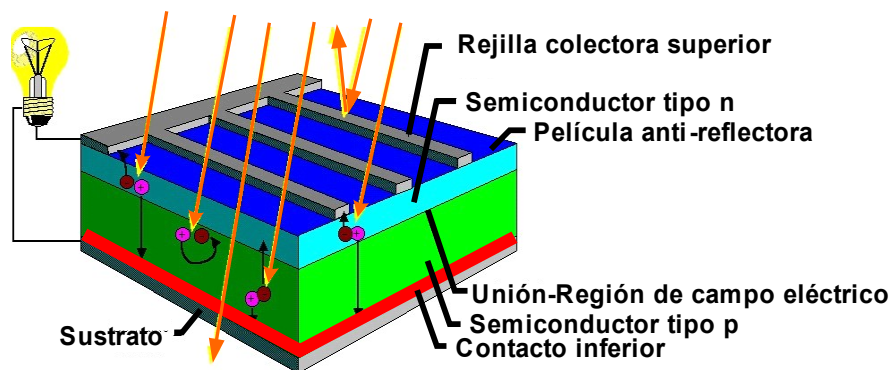


Figura 11. Esquema con los elementos esenciales de una celda solar.

Los contactos permiten el flujo de la electricidad. El contacto superior es una rejilla que cubre la superficie y esta expuesta al Sol con el fin de recolectar los electrones excitados por la radiación solar. La rejilla tiene un ancho y grosor que permiten una buena conducción de la electricidad, es espaciada y es lo suficientemente angosta para no bloquear el paso de la luz. Generalmente para la fabricación de este contacto se realiza la deposición al vacío de metales evaporados o se pinta a través de la fotolitografía. El contacto inferior (no expuesto al Sol) es una capa continua de aluminio o molibdeno que realiza la función de colector de cargas positivas (huecos).

Debido a que el Silicio es un material gris brillante se requiere una superficie anti-reflectora para evitar que se reflejen los rayos del Sol en la ventana superior. De no existir la capa anti-reflectora, la superficie reflejaría un 30% de la luz solar incidente. Además esta superficie se encarga también de proporcionar la tonalidad del color que se percibe en la celda. Algunas tonalidades de las celdas se presentan en la figura 12 [8].

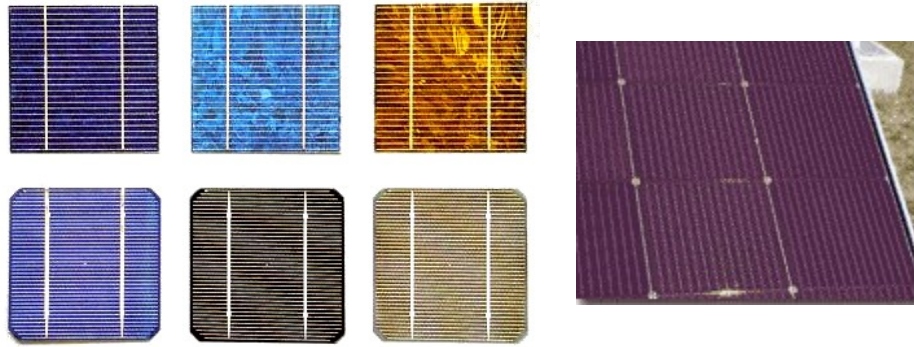


Figura 12. Fotografía de diferentes colores de celdas solares (este color que se observa se debe a la capa anti-reflectora).

1.3 Módulo fotovoltaico.

Un módulo fotovoltaico es un conjunto de celdas solares interconectadas entre sí, con el fin de aumentar la corriente y voltaje de salida. Debido a la fragilidad de las celdas solares, estas se protegen de la intemperie (por lo general se encuentran fijadas por arriba a un vidrio templado y plástico transparente y la parte posterior a un adhesivo plástico). La estructura se enmarca con un marco metálico que le da apoyo y rigidez [1]. Los módulos fotovoltaicos tienen un tiempo de vida entre 15 a 20 años (garantizados por el fabricante), son de alta confiabilidad y de mínimo mantenimiento.

1.3.1 Elementos de un módulo fotovoltaico.

El diseño y construcción de un módulo fotovoltaico no es sencillo, debido a que los materiales deben brindar una buena protección ante fenómenos térmicos y mecánicos. Deben evitar partes móviles y ser sencillos de conectar. Los elementos que por lo general conforman al módulo fotovoltaico, se presentan en la figura 13.

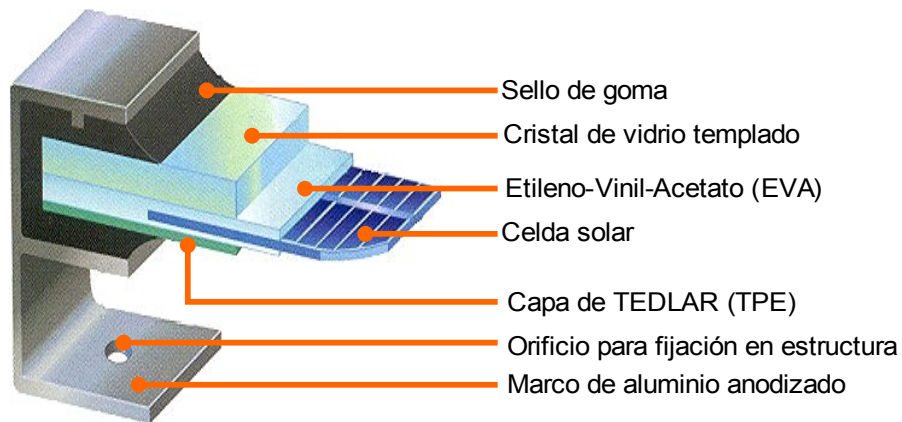


Figura 13. Dibujo de la sección de un módulo fotovoltaico.

Sello de goma: Este sello debe soportar las dilataciones y contracciones que se originen en el módulo debido a la temperatura.

Cristal de vidrio templado: Debido a que es la parte que “mira” al Sol el cristal tiene la función de brindar protección ante las inclemencias del medio ambiente, como humedad, granizo, cambios bruscos de temperatura, golpes de objetos y materiales arrastrados por el viento. La superficie del cristal por tanto debe ser dura, resistente a la abrasión y lisa para evitar acumular polvo.

Capa de etil-vinil-acetato (EVA): Es un plástico elástico que encapsula a la celda, en ocasiones hace la función de aislante eléctrico.

Capa TEDLAR: Es una lámina polimérica multicapa (polivinilo de fluoruro) que se encarga de brindar rigidez al módulo. Resiste la radiación solar, humedad, bases, ácidos y oxidación. Soporta temperaturas de -70 °C a 110 °C.

Marco: Es elemento final del empaquetado y se encarga de asegurar rigidez y fijación al conjunto. El marco puede ser de aluminio o de poliuretano e incorpora los elementos necesarios para el montaje del módulo sobre la estructura soporte como son los orificios para fijación y aterrizado.

Caja de conexiones: Esta caja se encuentra en la parte posterior del módulo y en ella se encuentran los bornes para la conexión eléctrica del módulo y los diodos de protección.

Placa de datos: La placa se encuentra en la parte posterior del módulo e incluye las características vitales del módulo a condiciones estándar de prueba.

El vidrio templado y el EVA deben ser transparentes a la radiación solar en las longitudes de onda donde la celda opera sin importar el tiempo que se encuentren expuestos a la radiación misma y al clima. Además ambos materiales deben permanecer siempre fijos para evitar pérdidas por reflexión provocadas por el desprendimiento. La respuesta espectral del Silicio va de 0.35 a 1.2 μm [26].

Los polímeros que encapsulan a la celda deben ser resistentes a la permeabilidad de los gases, vapor de agua y líquidos (si se condensaran habría corrosión galvánica en los contactos eléctricos, provocando cortocircuitos) [26].

La construcción de un módulo fotovoltaico se resume en lo presentado en la figura 14.

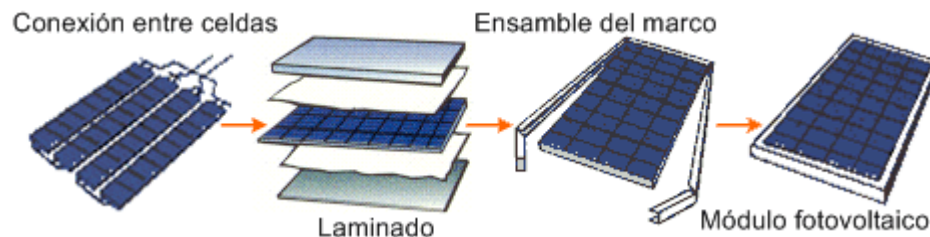


Figura 14: Esquema de la construcción de un módulo fotovoltaico.

1.4 Paneles, arreglos y sistemas fotovoltaicos.

Panel fotovoltaico: Cuando se necesita alimentar a una carga que exige un nivel de voltaje o demanda más corriente que la que un solo módulo fotovoltaico puede entregar, se habla de conformar un panel fotovoltaico. El panel fotovoltaico puede estar conformado por módulos conectados en serie ó por módulos conectados en paralelo. El número de módulos en el panel, dependerá de las características de la carga que se desea alimentar. Si se desea obtener un mayor nivel de corriente, el panel se conformará por n módulos en paralelo hasta satisfacer la corriente que se demande. De igual forma si se necesita un mayor voltaje, el panel contendrá tantos módulos en serie como sean necesarios para conseguir dicho voltaje.

Arreglo fotovoltaico: El arreglo fotovoltaico consiste en un grupo de paneles fotovoltaicos o módulos fotovoltaicos conectados eléctricamente e instalados conjuntamente con todos los accesorios de montaje y elementos exteriores que se conforma el generador eléctrico. Generalmente el arreglo está constituido por

paneles conectados en paralelo. El número de paneles dependerá de la potencia, voltaje y corriente que se deseen obtener.

Sistema fotovoltaico: Un sistema fotovoltaico está constituido por cualquier elemento fotovoltaico, sea una celda, módulo, panel o un arreglo fotovoltaico, y todos los componentes y accesorios necesarios para que este pueda operar. Es decir, cuando el equipo está listo para alimentar alguna carga que demande energía eléctrica.

1.5 Nomenclatura general de los elementos fotovoltaicos.

En la figura 15 se presenta la nomenclatura más utilizada en artículos, libros de texto y en la Norma Oficial Mexicana (NOM-001-SEDE-1999, Instalaciones eléctricas, utilización).

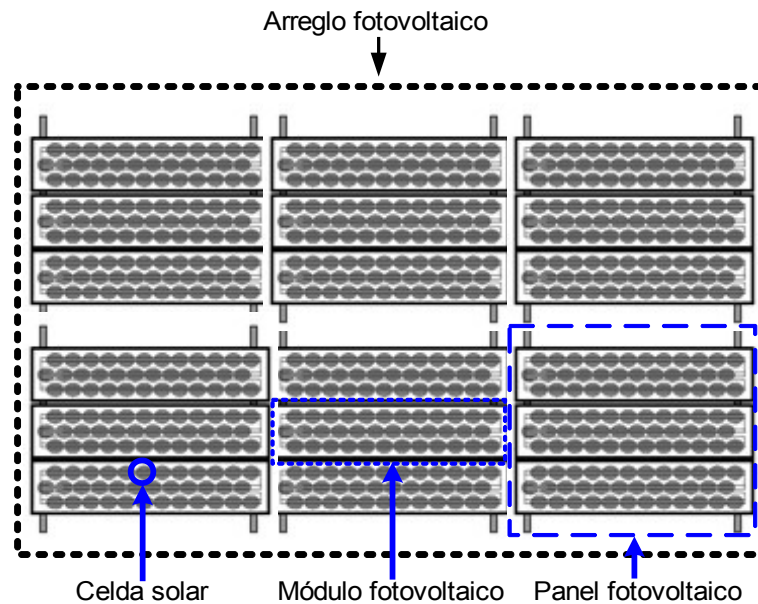


Figura 15. Esquemización de la celda, módulo, panel y arreglo solar o fotovoltaico.

- La celda solar es el elemento fundamental o unidad mínima de un sistema fotovoltaico.
- El módulo fotovoltaico es el conjunto de celdas solares interconectadas eléctricamente dentro de una unidad sellada.
- El panel fotovoltaico es el conjunto de módulos interconectados eléctricamente.
- El arreglo fotovoltaico es el conjunto de paneles solares interconectados eléctricamente. Este arreglo incluye todos los accesorios de montaje y elementos exteriores que conforman el generador.
- Finalmente el sistema fotovoltaico está constituido por cualquier elemento fotovoltaico y todos los componentes y accesorios necesarios para que este pueda operar, es decir, es cuando una celda, módulo, panel o arreglo, está listo para alimentar alguna carga eléctrica.

1.6 Aplicaciones de sistemas fotovoltaicos.

Los dispositivos fotovoltaicos completamente instalados y listos para operar se consideran sistemas fotovoltaicos. Las aplicaciones de los sistemas fotovoltaicos se pueden clasificar con base a la potencia eléctrica que pueden suministrar, cuya unidad es el Watt pico (Wp), y el tipo de aplicación [12].

1. Productos de consumo [1 Wp]: Celdas en calculadoras, relojes y otros pequeños equipos.
2. Aplicaciones espaciales [15 Wp-20 kWp]: En satélites y misiones espaciales.
3. Sistemas residenciales conectados a la red [1-20 kWp]: Sistemas para residencias que generan su propia electricidad y entregan o reciben energía de la red según tengan exceso o defecto de la misma.
4. Sistemas conectados a la red [10-300 kWp]: Sistemas para uso comercial e industrial que venden sus excedentes a las empresas eléctricas.
5. Grandes centrales [mayores a 50 kWp]: Sistemas que entregan la energía directamente a la red.
6. Sistemas remotos [50 Wp-100 kWp]: Sistemas para residencias, establecimientos comerciales y pequeñas comunidades aisladas, no interconectadas a la red. En ésta categoría están incluidas:

Iluminación	Repetidoras de telecomunicaciones
Equipos domésticos (radios, radioteléfonos, Tv., etc.).	Estaciones satelitales y terrestres
Cargadores de batería	Estaciones climatológicas
Centros de servicios comunitarios	Equipo de telemetría
Clínicas rurales	Puestos militares remotos
Bombeo de agua	Plataformas marinas, faros y boyas
Teléfonos de emergencia	Generadores móviles

1.7 Objetivo, hipótesis y descripción del contenido de los capítulos.

Objetivo.

El objetivo principal del trabajo es:

La caracterización de un arreglo fotovoltaico de 640 W_p en la Universidad de Quintana Roo.

Y los objetivos particulares son:

- El desarrollo de un sistema electrónico para la caracterización de los módulos fotovoltaicos.
- La instrumentación del sistema de medición de las curvas de voltaje-corriente de los módulos fotovoltaicos.
- Analizar las curvas de voltaje-corriente.
- Análisis de linealidad de parámetros eléctricos de los módulos fotovoltaicos al realizar diferentes interconexiones entre los módulos fotovoltaicos (conexiones serie, paralelo).

Hipótesis.

Las hipótesis formuladas para este trabajo son:

- El sistema electrónico para la caracterización soportará las diferentes conexiones serie y paralelo de los ocho módulos fotovoltaicos.
- Los cambios en las magnitudes del voltaje y corriente principales del módulo fotovoltaico no serán considerables respecto a los datos de placa.
- La eficiencia de los módulos se encontrará entre el 10 y 14%, eficiencias típicas para módulos fotovoltaicos de Silicio policristalino reportadas en la literatura.
- La relación de potencia de los módulos fotovoltaicos será lineal al realizar conexiones en serie o en paralelo.
- Las magnitudes que se midan de los voltajes de circuito abierto y de corriente de corto circuito de cada uno de los ocho módulos serán iguales entre sí por ser módulos idénticos.

Descripción del contenido de los capítulos.

En el capítulo uno se presentan los conceptos básicos relacionados con la energía solar fotovoltaica que son utilizados para el desarrollo del presente trabajo como lo son la energía solar, la cuantificación del recurso solar y los factores que lo afectan. La descripción y características de la celda, módulo y arreglo fotovoltaico. Nomenclatura de los dispositivos fotovoltaicos, etc.

En el capítulo dos se describen las variables de importancia que se deben medir para la caracterización de los módulos fotovoltaicos así como la descripción y uso de los instrumentos y equipos que se utilizaron para ello.

En el capítulo tres se muestran algunos de los diferentes métodos de obtención de la curva de voltaje-corriente en los módulos fotovoltaicos. Se describe el método seleccionado y utilizado en la caracterización, así como el sistema electrónico de prueba desarrollado para la parte experimental.

En el capítulo cuatro se presentan los resultados obtenidos en la parte experimental, los cálculos realizados, así como las curvas V-I de cada uno de los módulos fotovoltaicos y sus respectivas eficiencias.

Finalmente en el capítulo cinco se dan las conclusiones y recomendaciones a las que se llegaron con la finalización de este trabajo.

Capítulo II - Principales variables a medir en la caracterización del arreglo fotovoltaico

Para realizar la caracterización de una celda o módulo fotovoltaico se miden una serie de variables como lo son la irradiancia solar, la corriente eléctrica, el voltaje y la temperatura del módulo fotovoltaico principalmente. Adicionalmente se necesita tener una idea de los valores de las variables eléctricas esperados en cada tipo de conexión entre los elementos fotovoltaicos; esto con el fin de tener un margen de referencia.

2.1 Instrumento para medir la irradiancia solar.

Existen varios instrumentos para medir la irradiancia solar y en este trabajo se utilizó un **piranómetro**. El piranómetro mide la radiación solar global o difusa que recibe una superficie horizontal cuantitativamente. Un piranómetro utiliza una termopila como sensor, la cual mide la irradiancia solar en 180° independientemente de la longitud de onda y del ángulo de incidencia. Para medir la radiación solar difusa se coloca una banda de sombreado sobre el piranómetro para bloquear la componente de radiación solar directa (figura 16a).

Los piranómetros se clasifican en estándar secundario, primera clase, segunda clase y tercera clase. Siendo el mejor en su sensibilidad, dependencia de la temperatura y el tiempo de respuesta, el estándar secundario [24]. En la figura 16b se muestra una fotografía de un piranómetro de primera clase.



(a)



(b)

Figura 16. Fotografías de un: a) piranómetro con banda de sombreado, b) piranómetro de primera clase.

El sensor de un piranómetro consta de una superficie plana colocada horizontalmente de tal manera que recibe radiación solar de cualquier dirección. Para evitar la influencia en la medición del viento o cualquier tipo de precipitación se coloca sobre los sensores uno o dos domos concéntricos de vidrio o cuarzo. Los domos deben tener transparencia cercana a la unidad para todas las longitudes de onda del espectro visible y así no entorpecer el paso de la luz solar.

Los elementos que constituyen a un piranómetro se muestran en la figura 17.

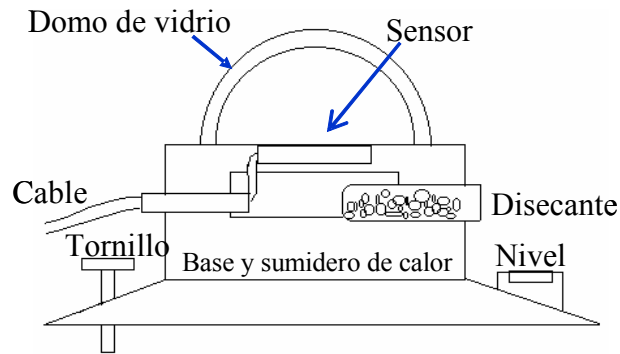


Figura 17. Esquema con los principales componentes de un piranómetro.

El piranómetro utiliza una termopila como transductor o sensor para medir la radiación solar; ésta termopila consiste en un conjunto de termopares conectados en serie como se presenta en la figura 18.

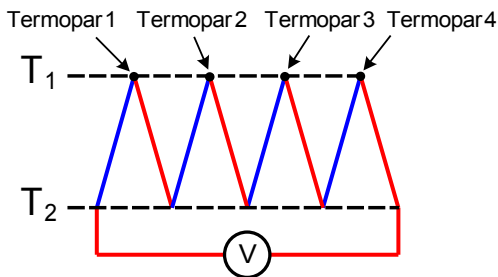


Figura 18. Esquema de la conexión de los termopares en una termopila.

Un termopar consiste en dos conductores de diferente material unidos en un extremo que forman una unión como la mostrada en la figura 19. Si la unión se calienta, los electrones en uno de los metales ganan suficiente energía y se vuelven electrones libres; estos electrones posteriormente se mueven a través de la unión generando un voltaje entre las terminales libres de los conductores.

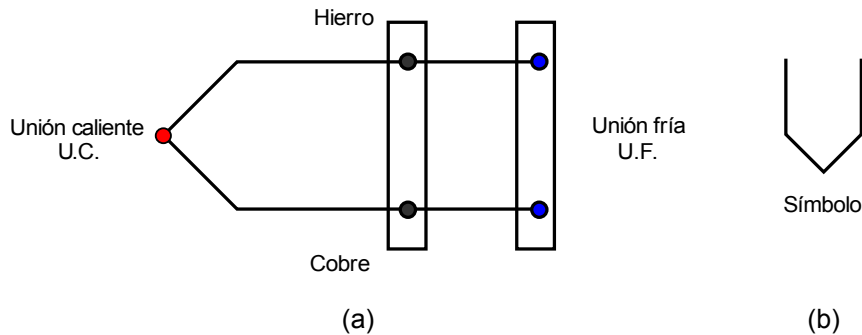


Figura 19. (a) esquema de un termopar y (b) su símbolo.

El voltaje producido por un termopar es en corriente directa y de una magnitud de milivolts (mV), por lo que para aumentar el voltaje producido por la irradiación solar se conectan varios termopares en serie para formar una termopila.

En la figura 20a se presenta una termopila en estrella para piranómetro; el arreglo de los termopares de ésta termopila tiene un área de uniones frías y una de uniones calientes. El área de uniones frías puede recubrirse con material altamente reflejante (material blanco) o se puede adecuar un sumidero de calor que

permita que la temperatura de esta área no sea alterada apreciablemente por la radiación incidente; a pesar que se encuentre en buen contacto térmico con él. En cambio el área de uniones calientes la constituye un depósito de calor altamente eficiente. El depósito de calor se consigue al recubrir esta área con un material negro de gran absorptividad como se muestra en la figura 20b. Ésta área de color negro es quien realmente constituyen al sensor [24].

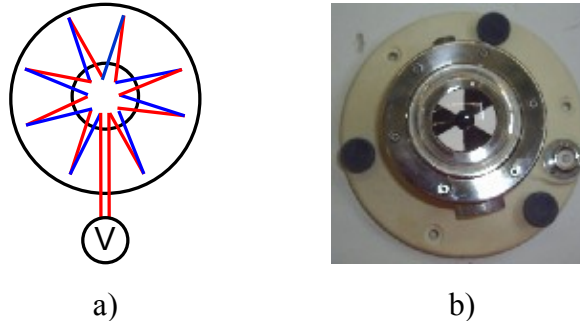


Figura 20. (a) esquema de una termopila en estrella y b) fotografía de un piranómetro en la que se observan las uniones calientes, área con material negro dentro del domo de cristal.

En la figura 21 se presentan piranómetros comerciales que incluyen un sensor de fotocelda.



Figura 21. Fotografías de piranómetros con sensor de fotocelda.

2.1.1 Piranómetro seleccionado para medición de la irradiancia solar.

El instrumento seleccionado para medir la irradiancia solar presente durante la etapa experimental es un **piranómetro de primera clase** de la marca Eppley ® modelo 8-48. Una fotografía del mismo se apresia en la figura 22.



Figura 22. Fotografía del Piranómetro Eppley ® modelo 8-48 (Tomada por Fco. Núñez).

El piranómetro entrega un voltaje en corriente directa (del orden de los milivolts) equivalente a la irradiancia solar al que esta sometido (termopila) y por medio de una constante, propia de cada piranómetro, permite conocer la magnitud de la irradiancia presente en Watts por metro cuadrado.

2.2 Temperatura.

La temperatura es una propiedad que determina si un cuerpo o sistema está en equilibrio en relación con otro cuerpo. Se usa como un parámetro que indica que tan “caliente” o “frío” es un cuerpo, respecto a otro cuerpo, en cierto instante de tiempo. Para medir la temperatura del módulo fotovoltaico el instrumento utilizado fue un **termómetro de infrarrojos tipo pistola**, de la marca Traceable-Fisher Scientific ®. Una fotografía del mismo se aprecia en la figura 23. Este instrumento esta equipado con un sensor óptico para medir la temperatura de un cuerpo, tiene mira láser como indicador y toma de manera casi instantánea (tiempo menor a un segundo) lecturas de la temperatura de cualquier superficie. Su rango es de -20 a 420 °C con una resolución en pantalla de 1 grado. La emisividad es fija en 0.95. El sensor de este instrumento recibe la energía infrarroja (generalmente 0.1 mV) del objeto a medir, la amplifica y la convierte en salida del voltaje. El CPU entonces digitaliza la señal, soluciona la ecuación de la temperatura y compensa la temperatura ambiente y efecto de la emisividad para poder conseguir la temperatura del objeto en segundos o fracciones de segundo de oprimir el gatillo del termómetro.



Figura 23. Fotografía del termómetro de infrarrojos tipo pistola.

2.3 Voltaje.

El voltaje eléctrico, es el trabajo que debe realizar una fuente externa sobre los electrones para que estos puedan fluir por el conductor y producir una corriente eléctrica. Su unidad en el SI es el Volt o Voltio y su símbolo es V. En un conductor la corriente eléctrica circula de las zonas de mayor voltaje a las zonas de menor voltaje.

Para la caracterización del sistema fotovoltaico se necesitó medir dos fuentes de voltaje. La primera fuente corresponde al piranómetro, el cual produce un voltaje en corriente directa en función de la irradiancia solar captada. Esta fuente de voltaje se midió con un multímetro digital FLUKE ®.

La segunda fuente corresponde al voltaje producido por los módulos fotovoltaicos. Este voltaje tiene una variación importante en el tiempo durante la caracterización. Para medir esta fuente se utilizó un graficador de voltaje digital.

2.4 Corriente.

La corriente eléctrica, es el flujo de electrones movidos por una fuerza externa y se define como el número de electrones que en un segundo fluyen por la sección transversal de un conductor. Su unidad es, en el SI, el Amper o Amperio y su símbolo es A.

Al igual que el voltaje, la corriente se puede medir de diferentes maneras. En la parte experimental se empleó una **punta de corriente o amperimétrica** para medirla. La punta amperimétrica es un dispositivo que permite la medición de la corriente por medio de sensores de efecto Hall. Al fluir una corriente eléctrica en un conductor, se genera un campo magnético alrededor del conductor como se observa en la figura 24a. Este campo magnético es utilizado para medir la corriente que pasa por el conductor sin interrumpir y sin contacto físico como se aprecia en la figura 24b. El extremo de la punta amperimétrica posee un semiconductor que al ser inducido por el campo magnético del conductor, genera un voltaje proporcional a la intensidad de ese campo.

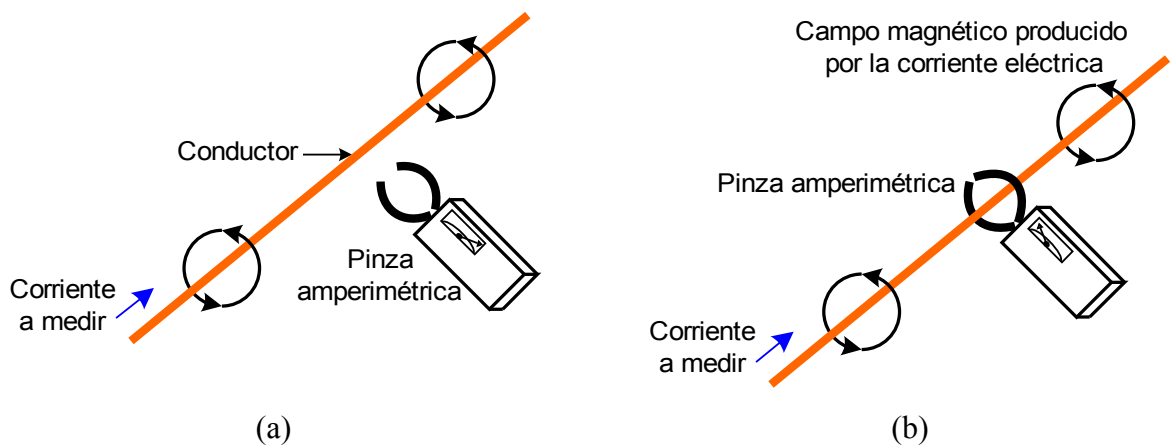


Figura 24. Esquema de medición: a) una corriente eléctrica circula por un conductor, generando un campo magnético y b) la magnitud de la corriente eléctrica es medida sin interrumpir su paso.

En la figura 25 se observa la punta amperimétrica empleada para la medición de la corriente de los módulos fotovoltaicos en la parte experimental. Esta punta de prueba puede medir una corriente máxima de 100 A con factores de escala de 10mV/A y 100mV/A y requiere una conexión a un dispositivo externo para desplegar las mediciones.



Figura 25. Punta de prueba.

2.5 Sistema de adquisición de datos.

En la caracterización del arreglo fotovoltaico es necesario contar con un sistema de adquisición de datos que registre y almacene la información del comportamiento del voltaje y corriente producido por los módulos fotovoltaicos durante el proceso. Para esto se utilizó el **graficador digital de voltaje portátil** Scopemeter 123, serie 190 de la marca FLUKE ®. Este equipo integra un osciloscopio, un multímetro y un registrador digital portátil; posee dos entradas para medir voltaje y su fotografía se presenta en la figura 26.



Figura 26. Fotografía del graficador digital de voltaje portátil.

Especificaciones en el modo seleccionado: Modo osciloscopio de doble entrada.

Movimiento vertical máximo: ± 4 divisiones	Exactitud vertical: $\pm(1\% + 0.05 \text{ rango/div})$
Resolución vertical: 8 bits	Tensión máxima: 600 V hasta 400 Hz
Movimiento horizontal: 10 divisiones	Modos de adquisición: normal, único y desplazamiento.
Respuesta a frecuencia con sonda 10:1: CC 20 MHz (-3dB)	Rango en modo único: 1s a 60s/div
Sensibilidad A y B:	Velocidad de muestreo (ambos canales simultáneamente) en tiempo real:
@ CC a 5 MHz \rightarrow 0.5 divisiones o 5 mV	1 μ s a 5 ms/div \rightarrow 25 MS/s
@ 25 MHz \rightarrow 1.5 divisiones	10 μ s a 60 ms/div \rightarrow 5 MS/s
@ 40 MHz \rightarrow 4 divisiones	Pendiente: Positiva y Negativa
Exactitud de la base de tiempos:	
Muestreo en tiempo real: $\pm(1\% + 0.04 \text{ tiempo/div})$	
Modos de presentación en pantalla:	
Normal: Captura transitorios de hasta 40 ns y presenta la forma de onda con una persistencia similar a la analógica	
Suavizado: Suprime el ruido de una de onda	
Envolvente: Registra y presenta los valores mínimo y máximo de las formas de onda a lo largo del tiempo	
Auto Set: Ajuste automático y totalmente continuo de amplitud, base de tiempos, niveles de disparo o separación de disparos.	
Ajuste manual de amplitud, base de tiempos o nivel de disparo.	

Con base a las especificaciones dadas se puede decir que sobre éste instrumento se deposita la confianza de los valores medidos de la corriente eléctrica y el voltaje del módulo fotovoltaico.

Para desplegar, almacenar y posteriormente analizar las mediciones realizadas, la información es descargada a una computadora mediante el software Flukeview ®. El programa comunica al equipo con una computadora a través de una interfase óptica.

2.6 Parámetros y características del módulo fotovoltaico, panel fotovoltaico y arreglo fotovoltaico.

Los parámetros característicos de los dispositivos fotovoltaicos se obtienen a través de su curva de voltaje-corriente (V-I). Un ejemplo de ésta curva se observa en la figura 27.

Debido a que los módulos, paneles y sistemas fotovoltaicos fundamentalmente están conformados por un conjunto de celdas solares, las características eléctricas que presentan son iguales a las de una celda solar, pero sus magnitudes difieren en la escala. En general se tiene para cualquier dispositivo fotovoltaico:

Corriente de corto circuito (I_{cc}): es la máxima cantidad de corriente eléctrica que el elemento fotovoltaico puede generar; se alcanza cuando el voltaje se hace cero al cortocircuitar sus terminales positiva y negativa.

Voltaje en circuito abierto (V_{ca}): es el máximo voltaje que el elemento fotovoltaico puede entregar; se alcanza cuando la corriente se hace cero al dejar libres sus terminales positiva y negativa.

Punto de máxima potencia (P_{max}): es el punto sobre la curva V-I donde la celda solar entrega su máxima cantidad de potencia y corresponde al extremo superior derecho del rectángulo con máxima área bajo dicha curva. Las magnitudes de voltaje y corriente en este punto se conocen como voltaje a máxima potencia (V_{mp}) y corriente a máxima potencia (I_{mp}). La magnitud de éste punto de la curva V-I se conoce como potencia pico o nominal y su unidad generalmente es llamada Watts pico [Wp] para los módulos fotovoltaicos. La potencia máxima se calcula con base en la ecuación (5)

$$P_{\max} = V_{mp} \cdot I_{mp} . \quad (5)$$

En la figura 27 se presenta un ejemplo de la curva característica V-I de un módulo fotovoltaico.

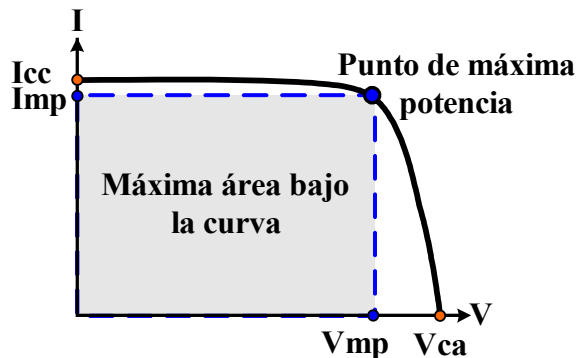


Figura 27. Curva teórica característica V-I.

Los parámetros eléctricos de un módulo fotovoltaico son resultado de pruebas a condiciones controladas en laboratorio. En la tabla 3 se presentan estas condiciones.

Tabla 3. Condiciones Estándar de Prueba (CEP), mejor conocidas como Standard Test Condition (STC).

Irradiancia solar	1000 W m ⁻²
Incidencia	Normal
Masa de aire	1.5
Temperatura de la celda	25 °C

Las condiciones que se tienen cuando los módulos fotovoltaicos están en operación diaria, difieren de las condiciones CEP. Esto se debe a que los módulos fotovoltaicos están expuestos a condiciones ambientales variantes en el tiempo [26].

Para los módulos fotovoltaicos los fabricantes indican los parámetros eléctricos en una placa de datos que se sitúa en la parte posterior del módulo. Un ejemplo de una placa de datos se observa en la figura 28.

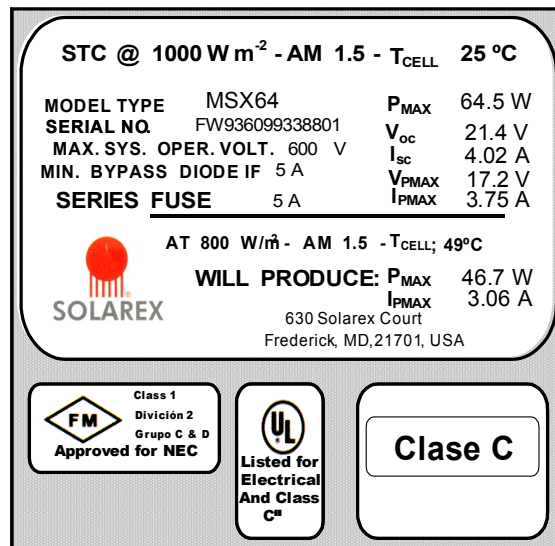


Figura 28. Dibujo de una placa de datos. Módulo fotovoltaico SOLAREX de 64.5 W.

Eficiencia de conversión: es la razón entre la potencia generada por el elemento fotovoltaico cuando sobre ella incide una potencia luminosa de 1000 W m^{-2} . La eficiencia de conversión se calcula en base a la ecuación (6)

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_i} \times 100, \quad (6)$$

donde P_i , se refiere a la potencia luminosa que llega al elemento fotovoltaico y es el producto de la irradiancia solar incidente por el área efectiva del elemento. Para los módulos fotovoltaicos el área efectiva se referirá a la superficie del módulo en metros cuadrados [m^2].

En la tabla 4 se presentan las eficiencias en celdas solares y módulos fotovoltaicos comerciales de silicio para aplicaciones terrestres.

Tabla 4. Eficiencia en celdas solares comerciales a base de silicio. [25]

Tipo de cristal	Celdas ($A=100\text{cm}^2$)	Módulos
Monocristalino	18%	13% al 16.8%
Policristalino	17%	11% al 13%
Amorfo	13%	7.5% al 10%

Si se trabaja simultáneamente con parámetros de celdas y módulos fotovoltaicos, es conveniente agregar el subíndice m, para denotar que se hace referencia a un módulo y no a una celda; por ejemplo V_{c_m} , I_{c_m} , P_{\max_m} , V_{mp_m} , I_{mp_m} y η_m .

2.6.1 Efectos de la intensidad luminosa, la temperatura y de los sombreados.

Efecto de la intensidad luminosa: la corriente eléctrica generada por el elemento fotovoltaico es directamente proporcional a la intensidad luminosa que sobre él se aplica, es decir, si la intensidad luminosa se reduce a la mitad, la corriente de corto circuito que entregará el elemento solar será aproximadamente la mitad también. Una representación de este efecto en un módulo fotovoltaico se presenta en la figura 29.

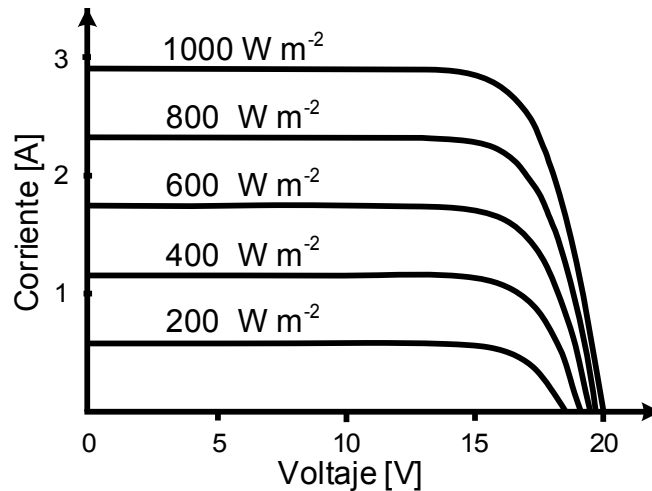


Figura 29. Efecto de la intensidad luminosa en un módulo fotovoltaico.

Efecto de la temperatura: la consecuencia debida a la exposición de un dispositivo fotovoltaico a los rayos del Sol es un aumento de temperatura. El aumento de la temperatura en el módulo ocasiona un ligero incremento en la corriente y una reducción en el voltaje y en la potencia de salida. Estos efectos se representan en la figura 30.

- Celda
- El V_{ca} reduce aproximadamente 2.1 mV por cada grado centígrado que aumente.
- [25]
- La I_{cc} aumenta aproximadamente 0.1% de su valor a temperatura ambiente, por cada grado centígrado que aumente.
- Módulo Para un módulo con 36 celdas:
- [25]
- El voltaje reduce alrededor de 2.2 mV por cada °C por cada celda (2.2mV/°C/celda).
 - Y la potencia reduce del orden de 0.35% por cada °C (0.35% /°C).

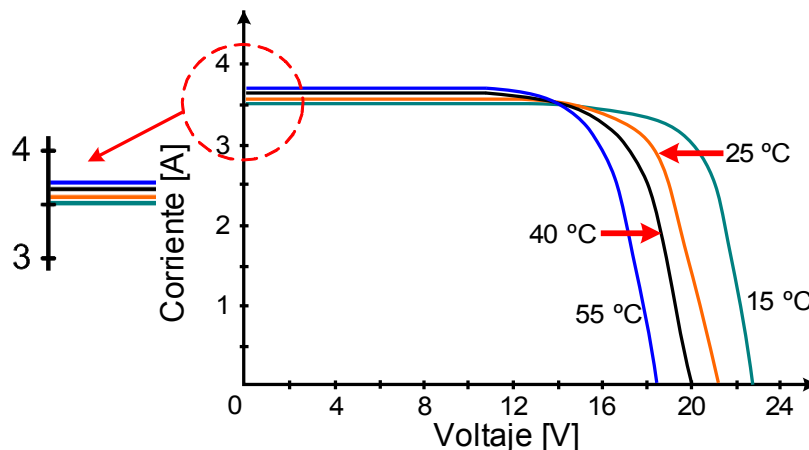


Figura 30. Curva teórica del efecto de la temperatura en un módulo fotovoltaico.

Efecto del sombreado: la aparición de puntos calientes en los módulos fotovoltaicos se produce al quedar sombreada parcial ó totalmente una celda del módulo fotovoltaico (obstrucción de luz por objetos o suciedad en la superficie del módulo).

Considerando el panel solar que se muestra en la figura 31, se tiene un panel conformado por 3 módulos fotovoltaicos idénticos conectados en serie, la magnitud de las corrientes de los 3 módulos son iguales ($I_1=I_2=I_3$) y el voltaje que llega a la carga conectada es la suma de los voltajes de cada uno de los 3 módulos ($V_1+V_2+V_3$).

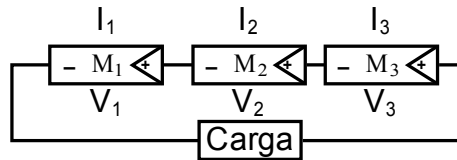


Figura 31. Esquema de un panel fotovoltaico de 3 módulos.

Si una celda de uno de los módulos tuviera un sombreado parcial como se observa en la figura 32, la celda con sombreado generará una corriente menor a la corriente de las otras celdas iluminadas. En consecuencia el módulo fotovoltaico con sombreado generará una cantidad de corriente menor, en comparación con los otros dos módulos que conforman al panel. Esta situación obliga a los otros dos módulos a trabajar a una corriente igual a la corriente del módulo con sombreado.

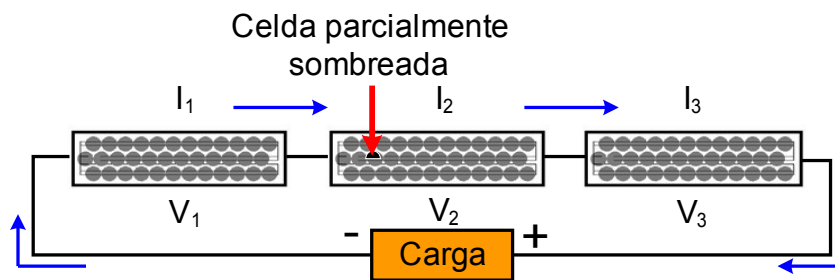


Figura 32. Esquema de los efectos de áreas sombreadas en una celda fotovoltaica.

El panel solar estará entregando a la carga conectada sólo una parte de la corriente esperada. La fracción de corriente que no entrega el panel solar a la carga, la estará consumiendo la celda con el sombreado. Esto provoca que el módulo con la celda sombreada se convierta en una carga más que alimentar para los demás módulos.

La celda con sombreado queda polarizada inversamente y el consumo de potencia que realiza lo disipa continuamente en forma de calor; debido a esto la celda aumenta de temperatura y se convierte en un punto caliente dentro del módulo fotovoltaico. De no corregirse el problema y si la temperatura ambiente es de por sí elevada, se acelerará la degradación de la celda y posteriormente el módulo se dañaría permanentemente.

Para evitar la formación de puntos calientes se procura que el área donde se instalarán los módulos fotovoltaicos, esté despejada de objetos que causen sombra en el módulo y para evitar que un módulo quede polarizado de manera inversa, se utilizan diodos.

En la figura 33 se observa un ejemplo de los efectos que tiene una celda con sombreado en la curva V-I de un módulo fotovoltaico.

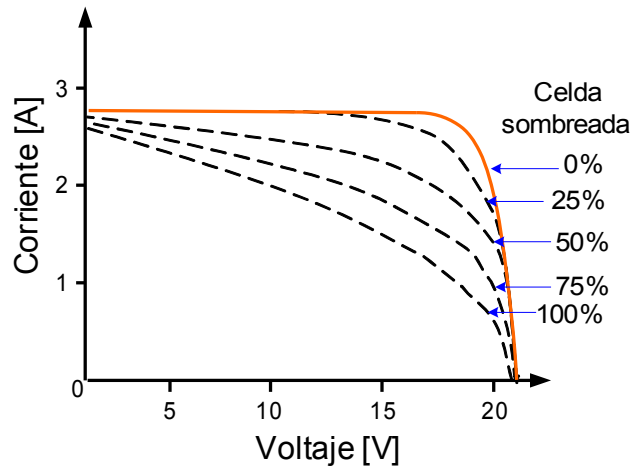


Figura 33. Curva teórica de un módulo fotovoltaico con una celda sombreada.

2.6.2 Interconexiones.

Para los módulos fotovoltaicos.

Las conexiones de módulos fotovoltaicos presentan características análogas a la conexión de resistencias (Ley de Ohm). Los módulos fotovoltaicos se pueden conectar en serie y paralelo para aumentar el voltaje y la corriente de salida.

Conexión en paralelo: los módulos se conectan en paralelo para aumentar la corriente. La terminal negativa (-) de un módulo se conecta a la terminal negativa del otro, de la misma forma que las terminales positivas (+) se conectan entre sí. La corriente de salida será entonces la suma de la corriente de cada módulo. La figura 34 presenta la conexión en paralelo de tres módulos fotovoltaicos.

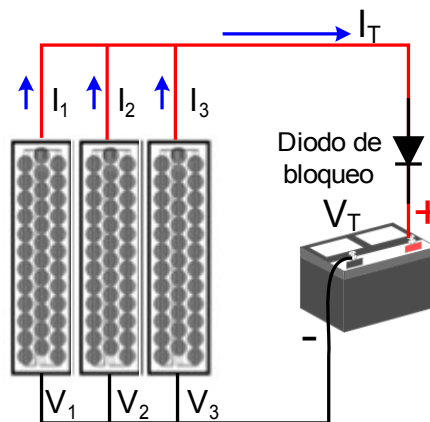


Figura 34. Esquema de conexión de módulos fotovoltaicos conectados en paralelo.

Voltaje total para módulos en paralelo:

$$V_{T \text{ paralelo}} = V_1 = V_2 = V_3. \quad (8)$$

Corriente total para módulos en paralelo:

$$I_{T \text{ paralelo}} = I_1 + I_2 + I_3 . \quad (9)$$

Conexión en serie: los módulos se conectan en serie para aumentar el voltaje. La terminal positiva (+) de un módulo se conecta a la terminal negativa (-) del otro. El voltaje de salida se vuelve la suma del voltaje de cada módulo. La figura 35 presenta la conexión en serie de tres módulos fotovoltaicos.

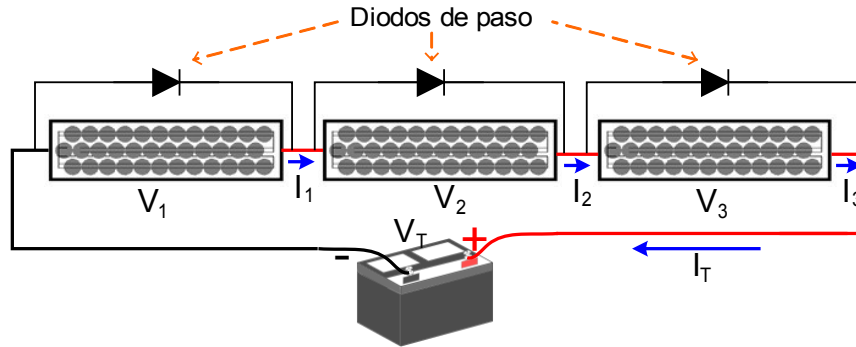


Figura 35. Esquema de conexión de módulos fotovoltaicos conectados en serie.

Voltaje total para módulos en serie:

$$V_{T \text{ serie}} = V_1 + V_2 + V_3 . \quad (8)$$

Corriente total para módulos en serie:

$$I_{T \text{ serie}} = I_1 = I_2 = I_3 . \quad (9)$$

Los módulos comerciales generalmente están constituidos por 30, 33 y 36 celdas conectadas en serie y el voltaje de salida es igual al número de celdas que lo componen por el voltaje de cada celda. De igual forma la corriente nominal será el producto del número de celdas por la corriente de cada una.

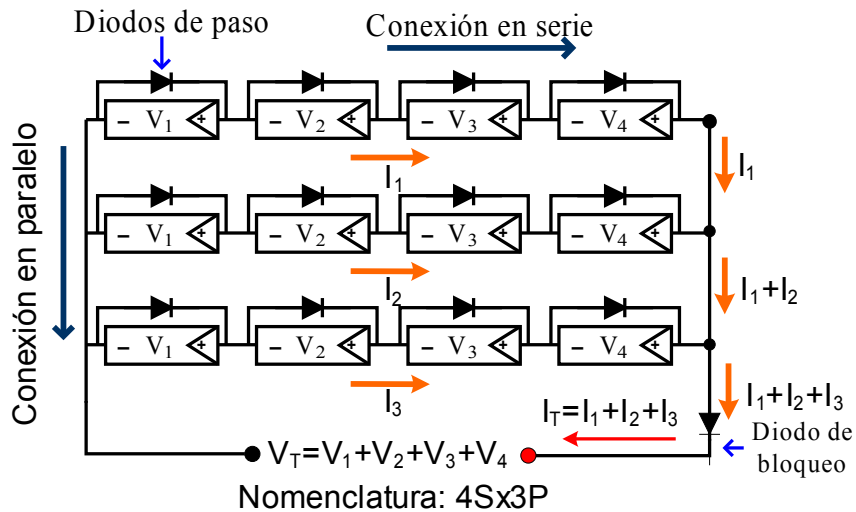
Para los arreglos fotovoltaicos.

Las interconexiones de módulos fotovoltaicos en serie dan por resultado paneles fotovoltaicos. Estos paneles al interconectarse forman a los arreglos fotovoltaicos. Los arreglos fotovoltaicos tienen una nomenclatura para describir el número de elementos involucrados y la forma en la cual están conectados.

- El número de módulos conectados en serie que conforman al panel se denotan con la letra S.
- La cantidad de paneles en paralelo con la letra P.
- El número de módulos fotovoltaicos que conforman al arreglo solar, es el producto S x P.

Por ejemplo para el esquema de la figura 36 se tiene la siguiente nomenclatura: 4S x 3P. Esto significa que en cada uno de los paneles que conforman al arreglo hay 4 módulos conectados en serie y que hay 3 paneles que están conectados en paralelo. El número de módulos conectados en el arreglo es 12.

La cantidad de corriente se incrementa con módulos en serie y el voltaje con paneles en paralelo.



Arreglo: 4 módulos en serie en cada panel y 3 paneles en paralelo.

Figura 36. Esquema de conexión de un arreglo fotovoltaico.

Al igual que en los módulos fotovoltaicos el voltaje nominal (V_T) será la suma de los voltajes de cada módulo conectado en serie y la corriente nominal (I_T) será la suma de la corriente de cada panel conectado en paralelo.

Si todos los módulos que conforman al arreglo son iguales, cada uno entregaría un voltaje V y una corriente I , por lo que el voltaje y corriente nominal de arreglo sería:

$$V_T = V_{mp} \text{ del módulo} \times \text{Número de módulos en serie del panel.} \quad (10)$$

$$I_T = I_{mp} \text{ del módulo} \times \text{Número de paneles en paralelo.} \quad (11)$$

Potencia nominal: es igual al producto del voltaje nominal y la corriente nominal (máxima potencia).

$$P_T = V_T \cdot I_T. \quad (12)$$

Capítulo III - Caracterización del módulo fotovoltaico

La caracterización de un módulo fotovoltaico consiste básicamente en obtener su curva característica de voltaje-corriente, bajo diferentes condiciones de irradiancia solar y temperatura en el módulo fotovoltaico.

3.1 Métodos para la caracterización.

Para obtener la curva V-I del módulo fotovoltaico es necesario un dispositivo de prueba que permita variar la demanda de potencia de la carga eléctrica conectada al módulo. Un valor muy grande de la demanda de potencia eléctrica permite la medición del voltaje a circuito abierto y un valor muy pequeño permite medir la corriente de corto circuito. Durante la variación de la demanda de potencia eléctrica se deben registrar los valores de voltaje y corriente simultáneamente en cada punto de incremento o decremento de la demanda eléctrica. Los datos registrados al ser graficados trazaran la curva V-I y posteriormente también se grafica la curva de voltaje contra potencia (V-P).

La curva V-I refleja el rango completo de operación del módulo; desde la condición de circuito abierto, pasando por el punto de máxima potencia y finalmente la condición de corto circuito. Para obtenerla el módulo fotovoltaico es conectado a una carga eléctrica cuya demanda de potencia debe ser modulada controlando el voltaje o la corriente suministrada. En la práctica existen tres formas para realizar la caracterización, las cuales son:

1. Método de resistencia variable.

La curva V-I de un módulo fotovoltaico se puede conseguir a través de una resistencia variable empleada como una carga eléctrica. El control de la cantidad de corriente que fluye del módulo fotovoltaico se consigue con variar la magnitud de la resistencia del resistor, desde un valor mínimo a un valor máximo.

En la figura 37 se presenta el diagrama de conexión para la resistencia variable y se observa que los cambios en la corriente eléctrica del modulo fotovoltaico son medidas a través de una resistencia Shunt y los cambios en el voltaje pueden ser medidos a través de un voltímetro, multímetro u osciloscopio. Las lecturas obtenidas al ser graficadas trazan la curva característica del módulo fotovoltaico.

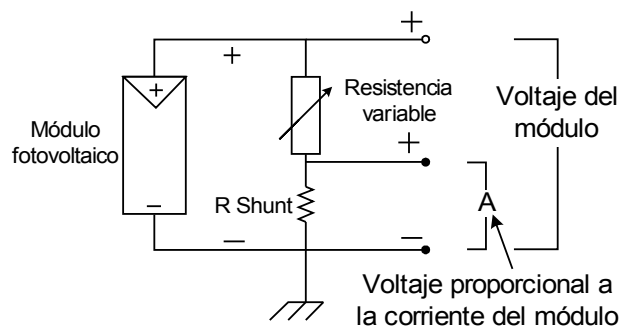


Figura 37. Esquema de una resistencia variable como una carga para medir la curva de V-I.

El inconveniente de utilizar una resistencia variable es que la variación de la magnitud de la resistencia para cada punto de la curva se hace de manera manual; ello implica una mayor cantidad de tiempo. Tiempo en el cual la irradiancia solar puede cambiar provocando así una curva diferente. Las resistencias se deben elegir apropiadamente y estas se ven afectadas por la temperatura. La exposición al Sol del resistor produce un aumento en su temperatura que ocasiona que su resistencia aumente y en consecuencia que deje de seguir el comportamiento lineal esperado.

2. Método de capacitor.

Cuando se utiliza un capacitor como carga eléctrica, el módulo fotovoltaico carga eléctricamente al capacitor al actuar como una fuente constante de voltaje sobre él. La corriente del módulo fotovoltaico es medida simultáneamente con el incremento de voltaje que se obtiene durante la carga del capacitor y al ser graficados estos cambios se obtendrá la curva V-I del módulo fotovoltaico. El diagrama de conexión para ésta opción se presenta en la figura 38 y el control se realiza mediante interruptores.

Inicialmente el capacitor de la figura 38 se encuentra completamente descargado y todos los interruptores se encuentran abiertos; esto indica que el módulo fotovoltaico está en reposo. Al cerrar el interruptor S1 empezará a fluir la corriente máxima del módulo fotovoltaico a través del capacitor con un voltaje igual a cero, posteriormente los valores de corriente y voltaje variaran hasta que el capacitor sea cargado por completo. El capacitor llega al voltaje máximo al igualar el voltaje del módulo fotovoltaico; esto significa que el capacitor se ha cargado por completo y que la corriente eléctrica del módulo ha dejado de fluir.

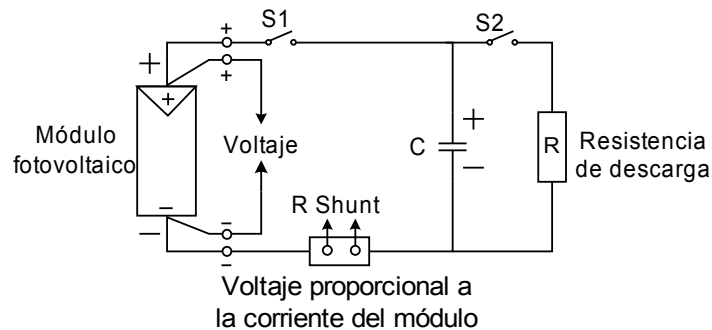


Figura 38. Esquema de un capacitor como una carga para medir la curva de V-I.

La desventaja de éste método es que los interruptores mecánicos presentan rebotes en el cierre, lo que origina datos erróneos en el inicio del experimento.

3. Método de transistor.

Este método es análogo al método de resistencia variable. En este método se utiliza un Transistor BJT o un MOSFET en lugar de la resistencia variable.

Un transistor BJT es un *transistor de unión bipolar* que se controla por medio de corrientes eléctricas aplicadas a su base. El MOSFET es al acrónimo de *Transistor de Efecto de Campo de Metal-Óxido-Semiconductor* y presenta la diferencia de que es un transistor que se controla por medio de voltajes aplicados a su compuerta.

Al usar un transistor como carga eléctrica, la cantidad de corriente permitida a pasar a través de él se controla con la cantidad de corriente aplicada a la base del transistor y en el caso de ser un transistor accionado por voltaje (MOSFET), el control de la corriente se logra con la cantidad de voltaje aplicada a su compuerta.

La regulación de corriente a la base del transistor o del voltaje a la compuerta del MOSFET se logra con el uso de un circuito de control que genere una señal tipo rampa. Una señal tipo rampa inicia de un valor cero y se incrementa hasta un valor máximo y nuevamente desciende al valor mínimo de forma constante y lineal a una frecuencia dada. Con esta señal en la base del transistor se logra que la corriente del módulo fotovoltaico vaya desde un valor mínimo hasta un valor máximo; en cambio el voltaje se comporta de forma inversa.

En la figura 39 se presenta el diagrama de conexiones para dos diferentes tipos de transistores usados como carga eléctrica. La medición de los cambios en la corriente se logra con una resistencia Shunt y en el caso del voltaje a través de un voltímetro o instrumento similar. Al graficar los datos registrados se obtiene la curva V-I del módulo fotovoltaico.

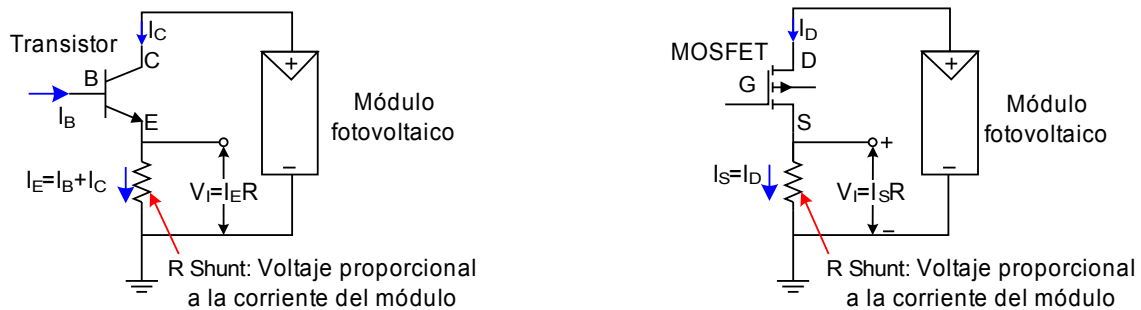


Figura 39. Esquema de transistores utilizados como carga para medir la curva de V-I.

El inconveniente de este método es que en el caso de un transistor BJT, como carga variable, este opera en base a corrientes y provoca que su control sea más complejo. Las pérdidas en el encendido que posee un transistor se ven reflejadas en la curva V-I como una caída de voltaje.

En el caso del MOSFET, pese a que el control por voltaje es relativamente sencillo, sólo los MOSFET de pequeña potencia se pueden hacer trabajar en su región lineal de operación. Otro punto en contra es que no soporta corrientes grandes por lo que su aplicación se vería limitada a emplearse con arreglos fotovoltaicos de pequeña potencia. Los MOSFET de potencia soportan corrientes mayores pero su control en la región lineal es más complejo.

3.2 Método seleccionado: método de capacitor controlado electrónicamente.

Para obtener la curva V-I de los módulos fotovoltaicos se eligió el método del capacitor, con la diferencia de que el interruptor mecánico es sustituido por un interruptor electrónico. Este cambio se debe a que un interruptor mecánico al trabajar con magnitudes grandes de corriente sufre de desgaste, arcos eléctricos y presenta rebotes mecánicos debido a la vibración producida por el impacto al cierre del mismo. El MOSFET es además una medida de seguridad que evita el riesgo de choque eléctrico al cortocircuitar al módulo, con un control electrónico y no manual. El diagrama simplificado se muestra en la figura 40.

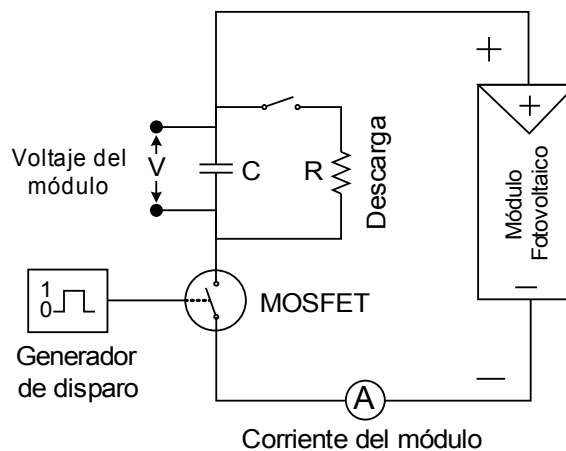


Figura 40. Diagrama simplificado del dispositivo desarrollado.

La elección se realizó considerando la complejidad del desarrollo del dispositivo, la confiabilidad de los resultados y la rapidez con la cual se obtienen las lecturas de la corriente y el voltaje del módulo fotovoltaico.

3.3 Descripción del dispositivo desarrollado.

Este dispositivo fue desarrollado para caracterizar un módulo, un panel o un arreglo fotovoltaico, que no exceda de voltajes máximos de 200 V a circuito abierto y de corrientes de corto circuito de 50 A. El funcionamiento general del dispositivo permite medir las variaciones de voltaje y corriente eléctrica del módulo en la caracterización. **Se realizaron varias pruebas para constatar que había repetitividad en los resultados que se obtenían, quien se encarga de dar confiabilidad a los datos medidos es el sistema de adquisición de datos (graficador de voltaje).** Las magnitudes de voltaje y corriente que se pueden soportar, permiten que el dispositivo desarrollado sea capaz de soportar la conexión simultánea de los ocho módulos fotovoltaicos de 80 W tanto en serie como en paralelo.

En la figura 41 se presenta el diagrama completo de conexión y se observa que se usa un capacitor para tener un espacio de tiempo suficiente, que permita medir la variación de la corriente eléctrica y voltaje del módulo, durante su paso del estado de corto circuito a circuito abierto. El MOSFET solamente actúa como un interruptor electrónico, debido a la configuración el módulo fotovoltaico solamente podrá cortocircuitarse cuando este transistor entre en conducción.

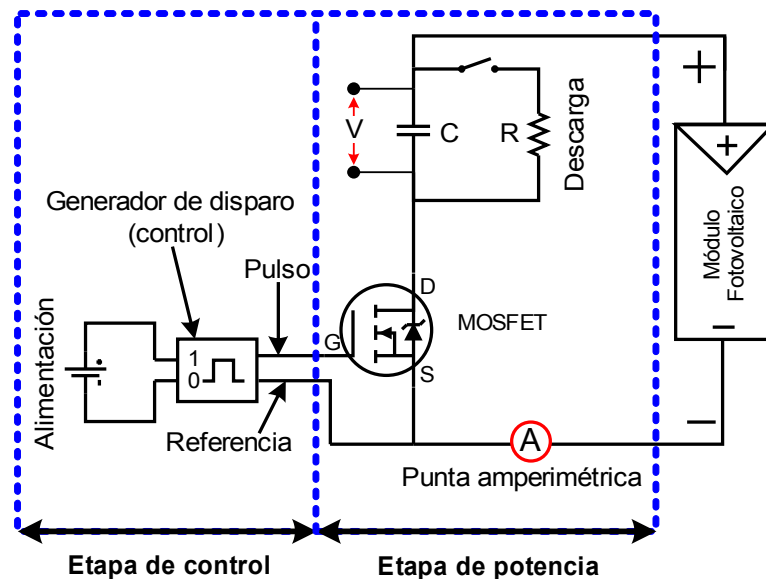
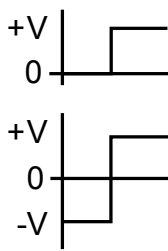


Figura 41. Diagrama de bloques completo del circuito de prueba.

La descripción de los elementos que componen al dispositivo desarrollado se divide en dos etapas: una etapa de control y una etapa de potencia. A continuación se describe cada una de ellas y finalmente el funcionamiento en conjunto.

3.3.1 Etapa de control.

Esta etapa se encarga de controlar el encendido y apagado del transistor accionado por voltaje. El control se realiza con el cambio de polaridad del voltaje que llega a la compuerta del MOSFET. Esta etapa se divide a su vez en tres secciones, como se observa en la figura 42.



- La primera sección consiste de un circuito temporizador que genera un pulso de voltaje mayor a cero volts durante un tiempo definido y que sirve como comando de cierre al MOSFET de potencia.
- La segunda sección emplea un detector de nivel (comparador) que modifica los niveles de voltaje producidos por el circuito temporizador. Se envía un voltaje menor a cero volts siempre que no esté accionado el botón de disparo.
- La tercera sección proporciona potencia al pulso generado para aplicarla a la compuerta del MOSFET; esto se consigue amplificando la corriente de la señal de salida del detector de nivel, sin importar si sea un voltaje positivo o negativo. La señal amplificada es aplicada a la compuerta del MOSFET que funcionará como interruptor accionado por voltaje.

El diagrama de conexión de la etapa de control y las secciones que lo conforman se muestran en la figura 42.

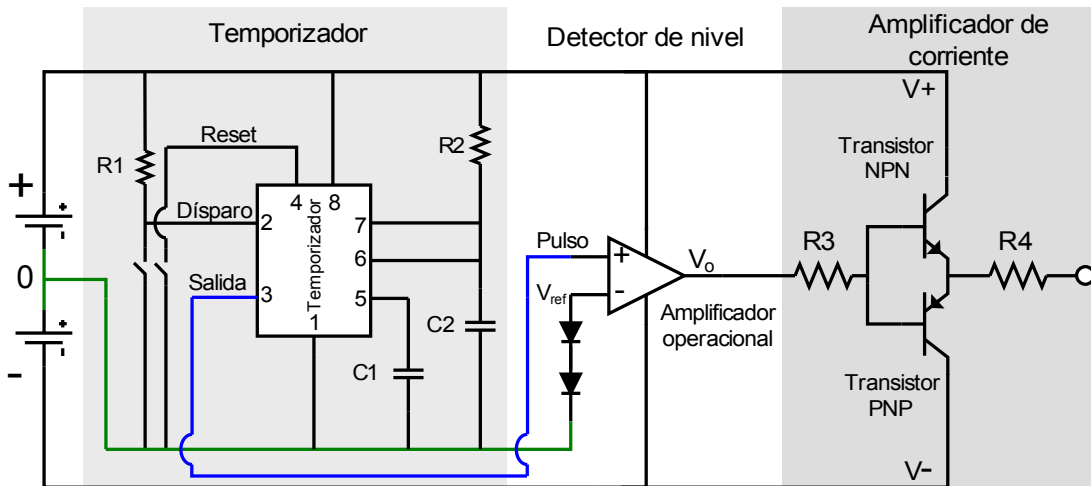


Figura 42. Diagrama de conexión de la etapa de control.

3.3.1.1 Circuito temporizador.

Tiene el objetivo de generar un pulso de voltaje mayor a cero volts con cierta duración en tiempo. El pulso temporizado de voltaje es producido por el circuito integrado NE555, el cual es un circuito integrado lineal que es capaz de producir pulsos sincronizados y precisos. Los componentes que lo conforman se muestran en la figura 43.

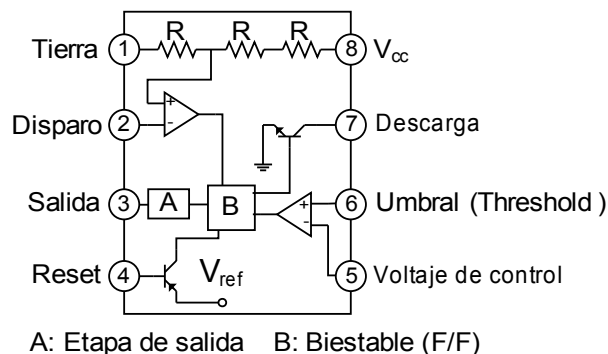


Figura 43. Diagrama de bloques interno del NE555/LM555/SA555.

Entre las características que posee el circuito integrado temporizador elegido se tiene: ciclo de trabajo ajustable, estabilidad de temperatura de 0.005%, sincronización desde segundos hasta horas, tiempo de apagado menor a 2 segundos. Las principales aplicaciones son: sincronización de precisión, generación de pulsos, generación de retrasos de tiempo y sincronización secuencial [20].

El temporizador se configuró para una operación monoestable; en este modo de operación el tiempo de retraso es controlado por una resistencia externa (R2) y un capacitor (C2) como se muestra en la figura 44a. En la configuración monoestable la señal de salida del temporizador solamente puede tener dos estados: encendido (1) o apagado (0) como se muestra en la figura 44b. Apagado se refiere a un voltaje igual a cero y el encendido es igual al voltaje de la fuente que alimenta al temporizador.

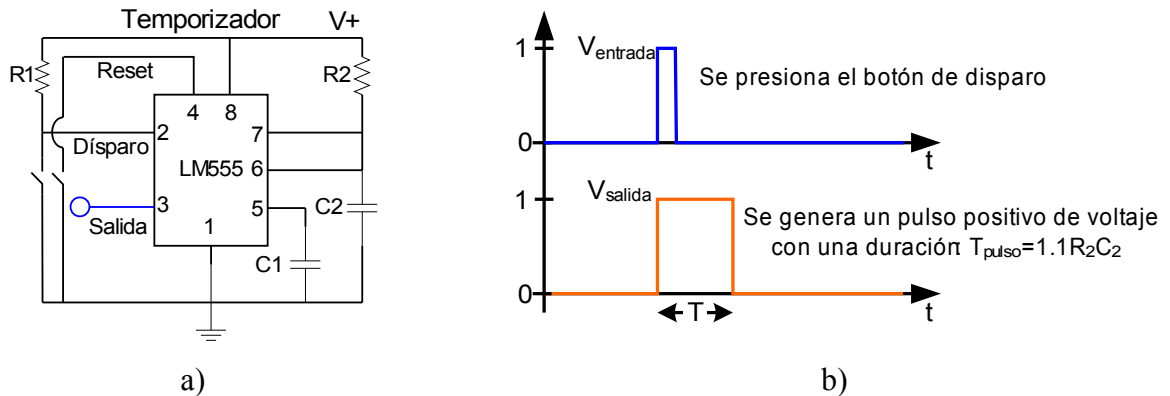


Figura 44. Esquema del circuito integrado temporizador configurado para una operación monoestable.

La duración del pulso generado fue de 51.7 ms y fue calculada con una ecuación brindada por el fabricante del temporizador; esta se presenta en la ecuación número (13) y su unidad es el segundo.

$$T_{pulsos} = 1.1R_2C_2. \quad (13)$$

3.3.1.2 Circuito detector de nivel.

Este circuito modifica los valores de voltaje producidos por el circuito temporizador. Los nuevos valores de voltaje son de -15 V para a un valor de 0 V del temporizador y de +15 V para un valor de 1 en la señal del temporizador. La finalidad de este cambio de voltajes es asegurar que el MOSFET de potencia se apague al aplicarle un voltaje por debajo de 0 V. Este circuito esta formado por un amplificador operacional.

Un amplificador operacional, es un dispositivo electrónico que realiza comparaciones con voltajes y que al ser configurado puede realizar operaciones matemáticas con los voltajes como la suma, resta y producto entre otras. En la figura 45 se muestran las partes que conforman a este elemento y la descripción de estas son:

- Dos entradas: una inversora y una no inversora. La impedancia de entrada tiende a infinito y la corriente de entrada a cero, debido a ello la diferencia de potencial en la entrada es prácticamente cero ($V_1=V_2$).
- Dos entradas para alimentación de voltaje: la magnitud del voltaje de alimentación depende de las especificaciones del amplificador (generalmente de ± 5 a 15 V).

- Una salida: la señal que se obtiene a la salida será resultado de la iteración en las entradas del amplificador.

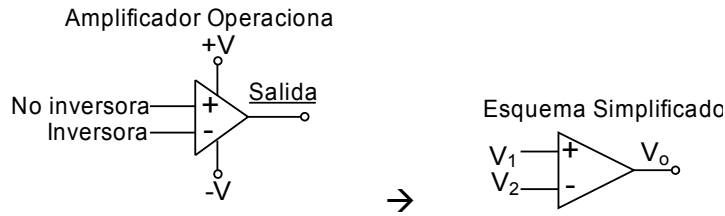


Figura 45. Esquema completo del amplificador operacional y su esquema simplificado.

El amplificador operacional se configuró como detector de nivel no inversor (comparador); en este modo de operación la señal que llega a la entrada no inversora es comparada con un nivel de referencia previamente establecido en la entrada inversora y la señal de salida dependerá de si la señal que llega es menor o mayor que la señal de referencia. Esta configuración se presenta en la figura 46a.

El amplificador operacional de la figura 46a tiene un nivel de referencia constante en la entrada inversora (V_2) y una señal variable en la no inversora (V_1). En la salida del amplificador se tendrá el valor de la fuente $+V$ sólo si el voltaje en la entrada no inversora es superior al nivel de referencia; de lo contrario a la salida se tendrá el voltaje de la fuente $-V$. Este modo de operar se muestra en la figura 46b [3].

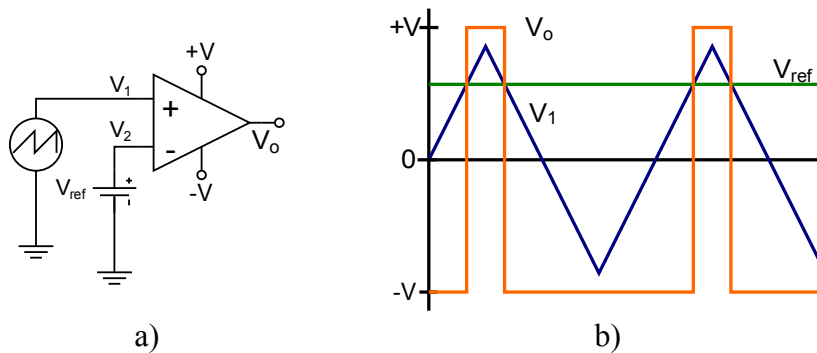


Figura 46. Esquema de la configuración como detector de nivel no inversor del amplificador operacional y su esquema de funcionamiento.

El amplificador operacional utilizado es el TL081. Su diagrama de conexión se presenta en la figura 47. La señal en la entrada no inversora corresponde a la señal de salida del temporizador y el voltaje de referencia corresponde a la magnitud de la caída de voltaje de dos diodos conectados en serie, aproximadamente 1.4 V. Al utilizar los diodos se evita el uso de una fuente de energía eléctrica extra [21].

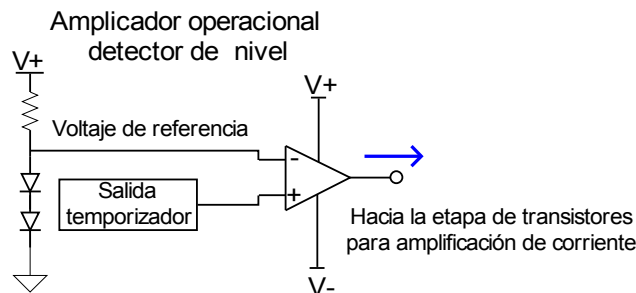


Figura 47. Amplificador operacional configurado como un detector de nivel.

A la salida del amplificador operacional en este modo de operación se tendrá un valor $V+$ sólo si la señal de salida del temporizador es mayor que la caída de voltaje de los diodos; de lo contrario se tendrá un valor $V-$.

3.3.1.3 Circuito amplificador de corriente.

El objetivo de este circuito es suministrar potencia y rapidez al pulso generado en el detector de nivel por medio de un arreglo de transistores.

El transistor es un dispositivo semiconductor de tres capas que en este circuito hacen la función de interruptor. Los elementos usados fueron transistores de unión bipolar (BJT). En esta configuración una pequeña señal eléctrica aplicada entre la base (B) y emisor (E) modula la corriente que circula entre emisor y colector (C). La señal BE puede ser muy pequeña en comparación con la del EC y la corriente EC es aproximadamente de la misma forma que la BE pero amplificada en un factor β [3].

La magnitud de la corriente EC se puede aproximar en base a la expresión de la ecuación (14)

$$I_{CE} = \beta I_{BE} \quad (14)$$

Los transistores utilizados son el BD135 y el BD136, el primero es un transistor npn y el segundo es un pnp; ambos se muestran en la figura 48. Estos elementos son complementarios entre sí [18].



Figura 48. Esquema de los transistores pnp y npn utilizados para amplificar la corriente.

Los transistores se conectaron para funcionar en modo de conmutación y el diagrama de conexión se observa en la figura 49. En esta configuración los transistores funcionan como interruptores que se cierran o abren dependiendo de la polaridad de la corriente aplicada a su base y al hacerlo suministran súbitamente el voltaje de la fuente de alimentación a la compuerta del MOSFET. Un transistor actúa como interruptor electrónico de potencia y sólo producirá un pulso entre el emisor y el colector cuando una corriente circule entre la base y el emisor (polarización directa).

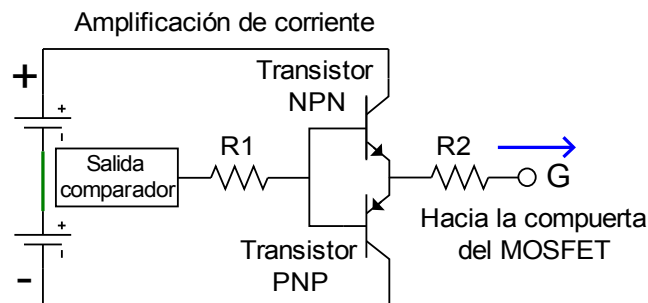


Figura 49. Esquema de conexión de los transistores para brindar potencia al pulso.

Debido a que a la salida del detector de nivel se puede tener un voltaje con polaridad positiva o negativa se presentan dos situaciones:

1. Si no se presiona el botón de disparo del temporizador se tiene un voltaje negativo a la salida del detector de nivel. El transistor NPN queda polarizado inversamente y opera como un interruptor abierto; en cambio el PNP se polariza directamente y actúa como un interruptor cerrado permitiendo que fluya una corriente con voltaje negativo. El voltaje de salida en este caso será negativo como se observa en la figura 50.

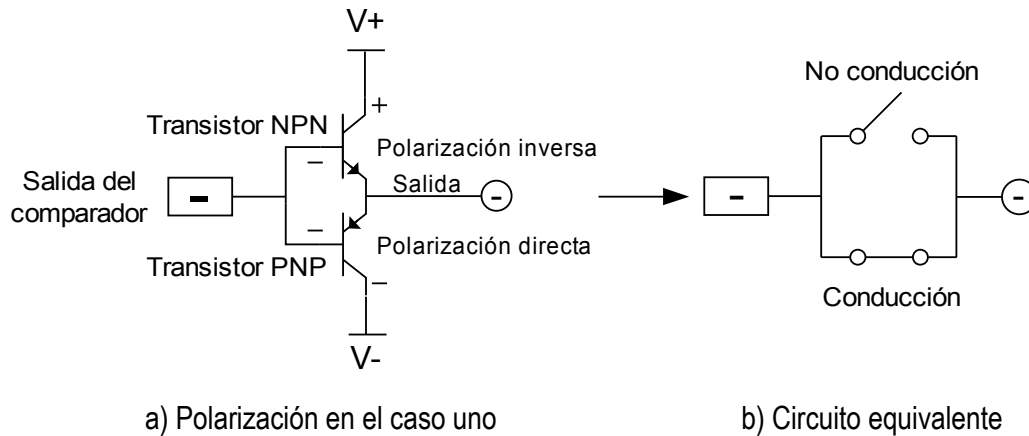


Figura 50. Esquema de funcionamiento en el caso uno: se presiona el botón de disparo del temporizador.

2. Si se presiona el botón de disparo del temporizador se tiene un voltaje positivo a la salida del detector de nivel. El transistor NPN queda polarizado directamente permitiendo que fluya una corriente con un voltaje positivo; en cambio el PNP se polarizará inversamente y actúa como interruptor abierto. El voltaje de salida será positivo como se observa en la figura 51.

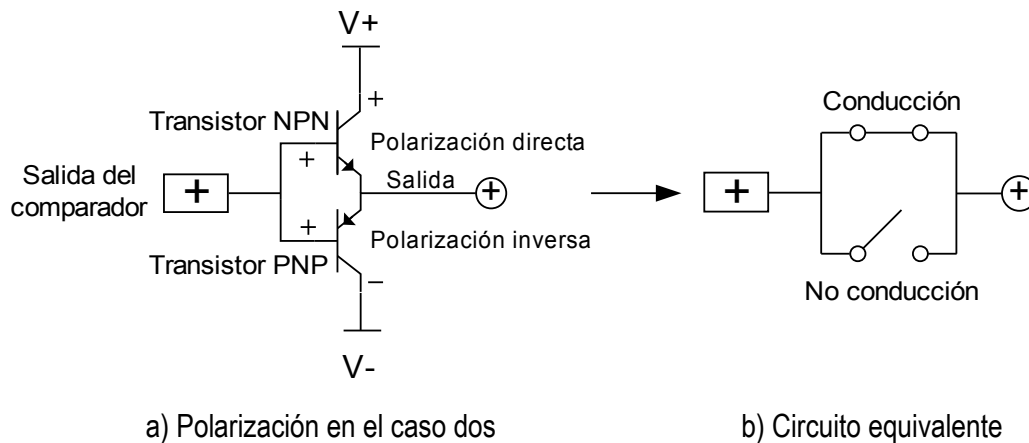


Figura 51. Esquema de funcionamiento en el caso dos: no se presiona el botón de disparo del temporizador.

La vista final de la etapa de control se presenta en la figura 52. Éste elemento es alimentado por dos baterías conectadas en serie, que proporcionan la fuente $V+$, un potencial neutro y la fuente $V-$.



Figura 52. Fotografía de la vista física de la etapa o sistema de control (tomada por Fco. Núñez).

3.3.2 Etapa de potencia.

El diagrama presentado en la figura 53 es la parte que se encarga de actuar como una carga eléctrica para lograr que el módulo fotovoltaico pase de un estado de cortocircuito a uno de circuito abierto. Esta conformado por un arreglo entre un MOSFET que actúa como un interruptor accionado por voltaje, una resistencia de descarga y un capacitor que retarda el paso de condición de corto circuito a circuito abierto del módulo o módulos fotovoltaicos.

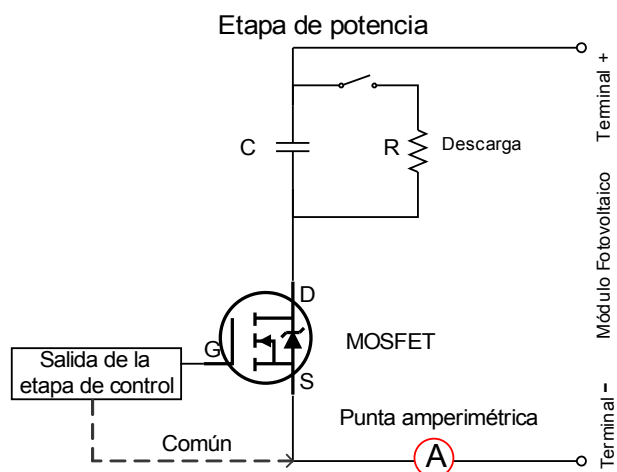


Figura 53. Diagrama general del circuito de potencia.

A continuación se describirá la operación de los elementos que componen a la etapa de potencia.

3.3.2.1 Capacitor.

El capacitor como se ha mencionado anteriormente, es el elemento que retarda el paso de estado de corto circuito a estado de circuito abierto del módulo fotovoltaico, durante un espacio de tiempo suficiente para registrar los cambios en la corriente y el voltaje del módulo fotovoltaico en la transición de estos estados.

En su forma más simple un capacitor se compone de dos superficies conductoras separadas por un dieléctrico (un tipo de aislante) y su nombre se deriva de la capacidad que tiene este elemento para almacenar una carga en sus placas. Mientras mayor sea su capacitancia (C), más carga (Q) se depositará en sus placas con el mismo voltaje (V) entre ellas. La definición de la capacitancia se presenta en la ecuación (15)

$$C = \frac{Q}{V}. \quad (15)$$

El circuito más simple para un circuito capacitivo-resistivo (RC) se muestra en la figura 54.

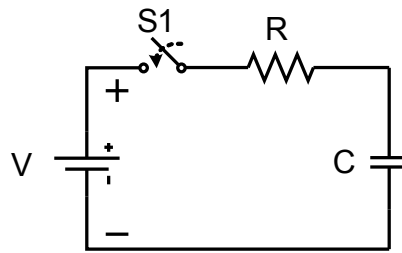


Figura 54. Esquema de la carga de un capacitor en un circuito RC.

La operación del circuito RC de la figura 55 comienza inicialmente con la condición de que el capacitor está descargado y el interruptor S1 esta abierto. Al cerrarse el interruptor el lado positivo de la fuente establece una carga positiva en la placa superior del capacitor y el lado negativo de la fuente establece una carga negativa neta en la placa inferior. El resultado de este flujo de carga de la fuente al capacitor es una corriente i_c que inicialmente salta a un valor limitado para el resistor R y luego disminuye hacia cero, debido a que el capacitor comienza a cargarse y tiende a alcanzar el voltaje aplicado a sus placas.

La carga no puede fluir de una placa a la otra debido al aislante entre ellas y además estas placas requieren de un espacio de tiempo para acumular la carga. Conforme la carga se incrementa en las placas, el voltaje v_c del capacitor se incrementa a la misma velocidad de estas también.

Al graficar la corriente i_c y el voltaje v_c en función del tiempo el resultado que se obtiene son las curvas exponenciales de la figura 55. En estas curvas se observa que la corriente salta hasta un valor máximo V/R y enseguida disminuye a cero exponencialmente; en cambio el voltaje inicia de un valor cero y crece exponencialmente hasta un valor V .

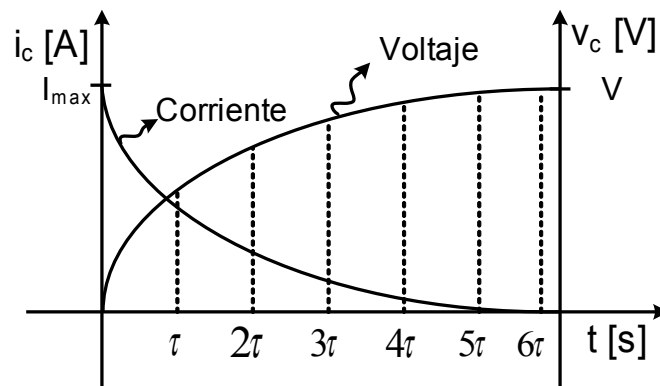


Figura 55. Gráfico de los cambios en la corriente y el voltaje en la carga de un capacitor.

La curva de la corriente i_c se puede calcular con la ecuación (16) y se presenta a detalle en la figura 56.

$$i_c = \frac{V}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (16)$$

En la ecuación (16), i_c es la corriente que pasa a través del capacitor y que varía durante la carga de este, v_c es el voltaje que pasa a través del capacitor y que varía durante la carga de este, R es la resistencia del circuito, t es el tiempo total que le toma al capacitor cargarse, prácticamente es igual a 5τ y τ es la constante de tiempo del circuito, producto de la resistencia por la capacitancia.

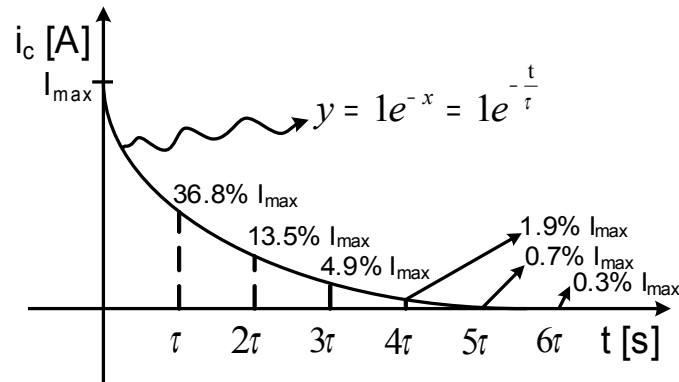


Figura 56. Grafico de la curva descrita por la corriente i_c durante la carga del capacitor.

En la mayoría de las aplicaciones prácticas el tiempo requerido para que la corriente disminuya a cero es aproximadamente 5τ , donde τ es llamada constante de tiempo del circuito y está determinado por la ecuación (17) y su unidad es el segundo.

$$\tau = RC. \quad (17)$$

Después de una constante de tiempo, la curva, y por consiguiente i_c desciende a 36.8% de su valor máximo, mientras que en cinco constantes de tiempo se reduce a 0.7% del valor máximo (menos del 1%).

El voltaje v_c subirá hasta un valor máximo de V , pero en la primera constante de tiempo sólo llegará al 63.2% de su valor máximo y al 99.3% en cinco constantes de tiempo. La curva del cambio de v_c respecto al tiempo se describe por la ecuación (18) y se presenta a detalle en la figura 57.

$$V_c = V \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (18)$$

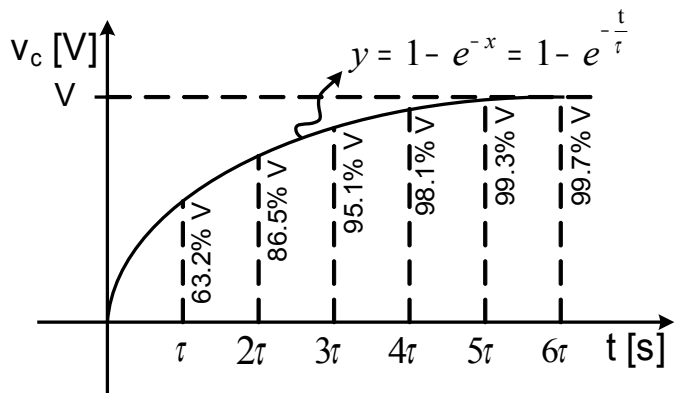


Figura 57. Gráfico de la curva descrita por el voltaje v_c durante la carga del capacitor.

Cuando el capacitor alcanza el voltaje de la fuente la corriente en el circuito es igual a cero ya que la magnitud y polaridad del voltaje almacenado en el capacitor es igual al de la fuente V , provocando que el circuito se comporte como un circuito abierto y pueda usarse para bloquear o aislar la corriente directa proveniente de otras partes de la red [17].

El capacitor utilizado en el sistema electrónico de caracterización fue del tipo electrolítico con una capacitancia de $47 \mu\text{F}$ a 200 V ; ello con el fin de soportar las conexiones en serie de los ocho módulos. Para garantizar que el capacitor se encuentre descargado completamente se conectó en paralelo una resistencia de descarga, R .

El tiempo que le lleva a un capacitor en un circuito Resistencia-Capacitor (RC) es de cinco unidades de tiempo, 5τ , y se puede calcular en base a la ecuación (17). Donde C es la capacitancia del capacitor y R es la suma de las resistencias de cada elemento en el circuito: la resistencia del conductor, la resistencia implícita en el capacitor y la resistencia del módulo fotovoltaico principalmente.

3.3.2.2 MOSFET.

Este transistor es controlado por un voltaje aplicado a su compuerta, requiere un bajo control de corriente y posee una alta ganancia de voltaje. El MOSFET consta de tres terminales: el drenaje o drenador (D), la fuente o surtidor (S) y la compuerta (G). Existen dos tipos de transistores MOSFET: los de canal p y los de canal n; ambos se presentan en la figura 58.

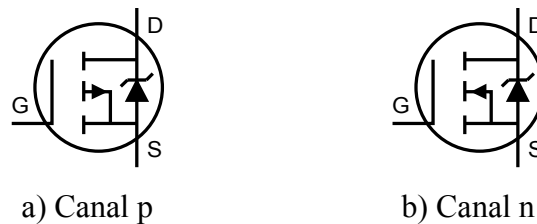


Figura 58. Símbolo de las diferentes presentaciones del MOSFET.

La operación básica de un MOSFET consiste en aplicar un voltaje con la polaridad adecuada entre la compuerta y la fuente (V_{GS}), para producir un flujo de corriente del drenaje a la fuente (I_{DS}). V_{GS} e I_{DS} indican el voltaje y la corriente de trabajo del dispositivo. En esta aplicación el MOSFET opera como un interruptor y el control consiste en proporcionar un voltaje con polaridad positiva entre la compuerta y la fuente (V_{GS}) para que entre en conducción. Si el MOSFET está en estado de conducción, posee una resistencia r_{DS} (de encendido) mínima y si está en no conducción la resistencia de encendido tiene un valor muy elevado. El valor máximo de V_{GS} generalmente va de 12 a 15 V.

Para que el MOSFET deje de conducir corriente es necesario que entre en estado de bloqueo. Este estado se consigue al dejar de aplicar un voltaje a la compuerta, igualarse el voltaje a cero o suministrar un voltaje negativo para la presentación de canal n.

El MOSFET utilizado para la etapa de potencia es de canal n. En la figura 59 se representa el estado de conmutación y de bloqueo para este tipo de MOSFET.

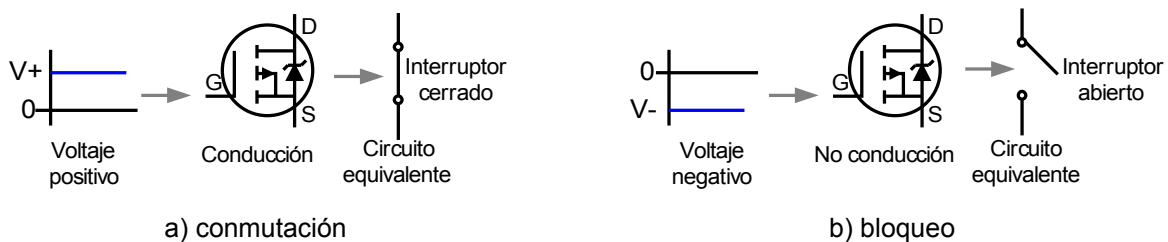


Figura 59. Esquema de control y funcionamiento del MOSFET de canal n en modo interruptor.

En la tabla 5 se muestran los MOSFET de canal **n** empleados en el circuito de potencia, el primero se utilizó para obtener la curva V-I de cada módulo debido a que se manejaban corrientes “pequeñas” y el segundo para soportar las conexiones en paralelo principalmente ya que maneja mayor cantidad de corriente.

Tabla 5. Características de los MOSFET empleados en el circuito de potencia.

Modelo	I_{DS} [A]	V_{GS} [V]	r_{DS} [Ω]
IRFP250	30	± 20	0.085
IRFP260N	50	± 20	0.04

[16]

El diagrama de conexión utilizado para el MOSFET se presenta en la figura 60 y el modo de funcionamiento es el siguiente: cuando un voltaje positivo llega a la compuerta (G) del MOSFET, el transistor actúa como interruptor cerrado permitiendo el flujo de corriente del módulo fotovoltaico al capacitor. Debido a que el capacitor no puede cambiar instantáneamente de un estado de descarga a uno de carga completa, se pueden medir los cambios en el voltaje y la corriente.

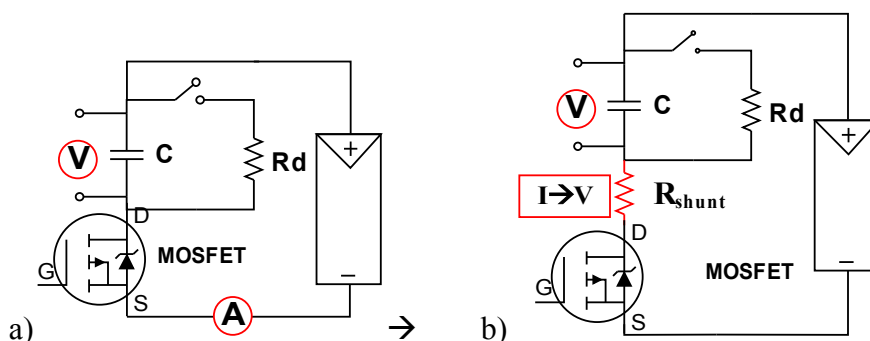


Figura 60. La corriente puede ser medida con: a) una punta de corriente b) una resistencia Shunt.

El funcionamiento se ha descrito a través de los elementos que lo conforman pero en resumen se utiliza un par de baterías como fuente de alimentación para el sistema de control; éste se encarga de suministrarle un pulso de voltaje positivo a un transistor que funciona como un interruptor accionado por voltaje y así lograr que el módulo fotovoltaico quede en corto circuito y posteriormente pase a circuito abierto.

La resistencia de descarga es la encargada de disipar la energía almacenada en el capacitor entre las mediciones que se realicen; esto con el fin de que el estado inicial del capacitor sea completamente descargado.

Una vista física del circuito de potencia se presenta en la figura 61.

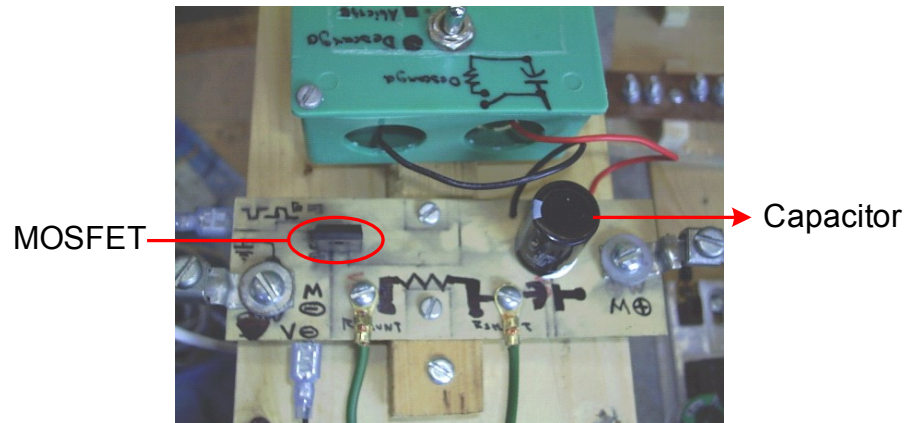


Figura 61. Fotografía del circuito de potencia vista física (tomada por Fco. Núñez).

La vista completa del sistema electrónico se presenta en la figura 62.

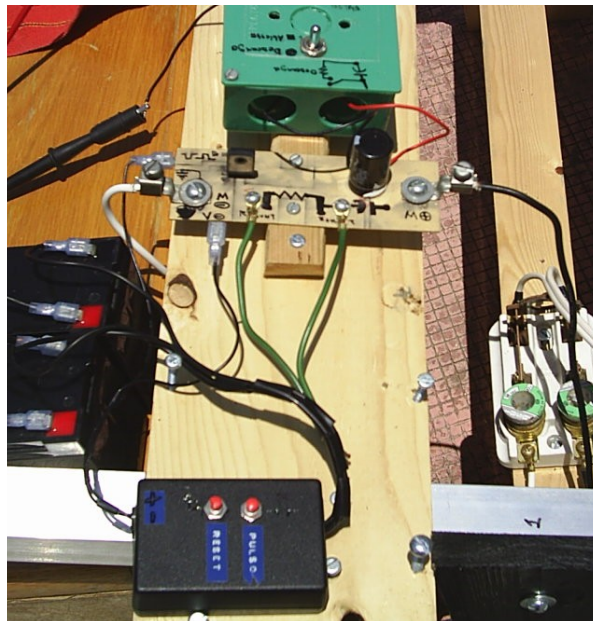


Figura 62. Fotografía de la vista final del dispositivo de carga capacitiva (tomada por Fco. Núñez).

3.4 Uso del graficador de voltaje y el software Flukeview ®.

La medición y registro de los datos de voltaje y corriente se realizó con el graficador de voltaje y el software Flukeview ®. En la figura 63 se presenta el teclado de configuración y operación del graficador de voltaje.

Por cuestiones prácticas, a partir de ahora se usará el nombre del modelo del graficador de voltaje “Scopemeter“, para hacer referencia a este equipo.

F1, F2, F3 y F4 tienen funciones interactivas que varían dependiendo del menú correspondiente que se este mostrando sobre ellos en pantalla



Figura 63. Fotografía con la descripción de los botones de operación del Scopemeter (tomada por Fco. Núñez).

La corriente del módulo fotovoltaico fue medida con una punta amperimétrica y el voltaje por medio de unas puntas de voltaje. Para realizar las mediciones es necesario configurar previamente al Scopemeter. Los pasos para configurar el equipo son los siguientes:

- Se conectan las puntas de voltaje a la terminal del canal A, teniendo en consideración que la terminal Común corresponde a un voltaje negativo y las terminales restantes a un voltaje positivo con respecto a esta terminal común. La punta amperimétrica se conecta a la terminal del canal B. Las terminales están situadas en la parte superior del equipo como se muestra en la figura 64.



Figura 64. Fotografía de las terminales de conexión del Scopemeter. De izquierda a derecha se tiene la terminal del canal A, la terminal Común y la terminal del canal B (tomada por Fco. Núñez).

- Se accede al menú de selección de variable a medir del canal A (figura 65a). En el menú desplegado se selecciona la opción VDC puesto que usaremos este canal para medir el voltaje de los módulos fotovoltaicos. Se ajusta la escala vertical del canal A (con la tecla de mostrada en la figura 65b) al valor del voltaje deseado; la escala estará en función de cuántos módulos estén conectados. Si solamente un módulo se conectará y la placa de datos indica un voltaje a circuito abierto alrededor de los 25 V, la escala de 5 V/div es suficiente.



(a) Menú de variables a medir



(b) Ajuste de la escala vertical

Figura 65. Fotografías de las teclas de ajuste para el canal A.

- Se accede al menú de selección de variable a medir del canal B (figura 66a). En el menú desplegado se selecciona la opción AMP y la opción de 100 mV/A. Se ajusta la escala vertical del canal B con la tecla mostrada en la figura 66b al nivel de corriente deseado; la escala estará en función de cuántos módulos estén conectados. Si solamente un módulo se conectará y la placa de datos indica una corriente de corto circuito es menor a 8 A, la escala de 1 A/div es suficiente.



(a) Menú de variables a medir



(b) Ajuste de la escala vertical

Figura 66. Fotografías de las teclas de ajuste para el canal B.

- Se ajusta la escala de tiempo con el botón de ajuste de la escala horizontal (figura 67). La escala a elegir estará en función del número de módulos que se conecten simultáneamente y de la irradiancia solar presente en ese momento. Por ejemplo si el módulo conectado es de 80 W nominales y la irradiancia solar es alrededor de entre 750 y 1000 W m², la escala generalmente se podrá situar entre 1 y 5 ms.



Figura 67. Fotografía de la tecla de ajuste de la base de tiempo. Al presionar s aumenta la base de tiempo y al presionar ns disminuye.

- Presionando la tecla SCOPE MENU (figura 68) se accede al menú del Scopemeter donde se selecciona DC en el menú desplegado. Se elige el submenú SCOPE OPTIONS donde se selecciona la opción SINGLE SHOT y la opción SMOOTH. Estas últimas opciones son para

suavizar la forma de onda y para que el equipo quede en la modalidad de espera de un solo disparo.



Figura 68. Fotografía de la tecla para abrir el menú del Scopemeter.

- La comunicación entre el equipo y el software se logra al conectar el cable/adaptador al puerto óptico del Scopemeter (figura 69) y a un puerto USB libre de una computadora donde se haya instalado previamente el programa Flukeview ®.



Figura 69. Fotografía del puerto óptico de comunicación (tomada por Fco. Núñez)..

- Al ejecutar el programa Flukeview ® en la computadora automáticamente se iniciará el proceso de comunicación entre el Scopemeter y el software. Si la comunicación no se logra establecer, se desplegará un menú como el mostrado en la figura 70; en el cual se debe seleccionar el puerto de comunicación correspondiente al puerto USB, donde se haya conectado el cable de comunicación y posteriormente seleccionar la opción CONECT. Cuando la comunicación se haya establecido el software y el equipo estarán listos para operar.

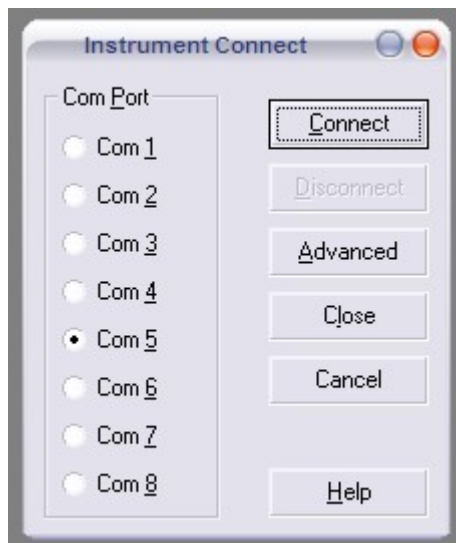



Figura 70. Fotografía del menú de Selección del puerto de comunicación.

- Una vez establecida la comunicación entre el Scopemeter y el Flukeview ® y sin estar presente algún conductor energizado en el extremo de medición de la punta amperimétrica, se enciende la punta al seleccionar la opción de 100mV/A que se muestra en la figura 71. Se verifica que en la pantalla del Scopemeter la señal del canal B sea igual a cero; de no ser así se ajusta el valor al girar la perilla de control de ZERO en la punta amperimétrica.



Figura 71. Fotografía en la que se observa el interruptor de encendido y ajuste de cero de la punta amperimétrica (tomada por Fco. Núñez).

- Para asegurar que la señal de la punta amperimétrica es muy próxima a cero, en el software Flukeview ® se presiona el icono  para desplegar la forma de onda del canal B. Si la señal de la punta amperimétrica no es igual a cero se ajusta nuevamente; de no lograr un valor cercano a cero, entonces se guarda la forma de onda en la computadora para que sirva como referencia del estado inicial de de la punta amperimétrica.

En la figura 72 se muestra un ejemplo del registro de los cambios en la corriente (canal A) y el voltaje (canal B) desplegados en la pantalla del Scopemeter. La descripción de la imagen es la siguiente:

- (0) Inicialmente el capacitor se encuentra descargado y el MOSFET se encuentra como un interruptor abierto, debido a ello el módulo está en reposo.
- (1) Al recibir un voltaje de disparo positivo la compuerta del MOSFET, el transistor cambia a un estado de conducción logrando que el módulo quede en un estado de cortocircuito. La corriente llega a su punto máximo (I_{cc}) y el voltaje a su punto mínimo.
- (2) Conforme el capacitor se carga el voltaje se incrementa y la corriente decrece.
- (3) Al cargarse completamente el capacitor se iguala el voltaje del módulo fotovoltaico, alcanzándose el voltaje en su punto máximo (V_{ca}) y el mínimo de corriente, es decir el módulo está en estado de circuito abierto.

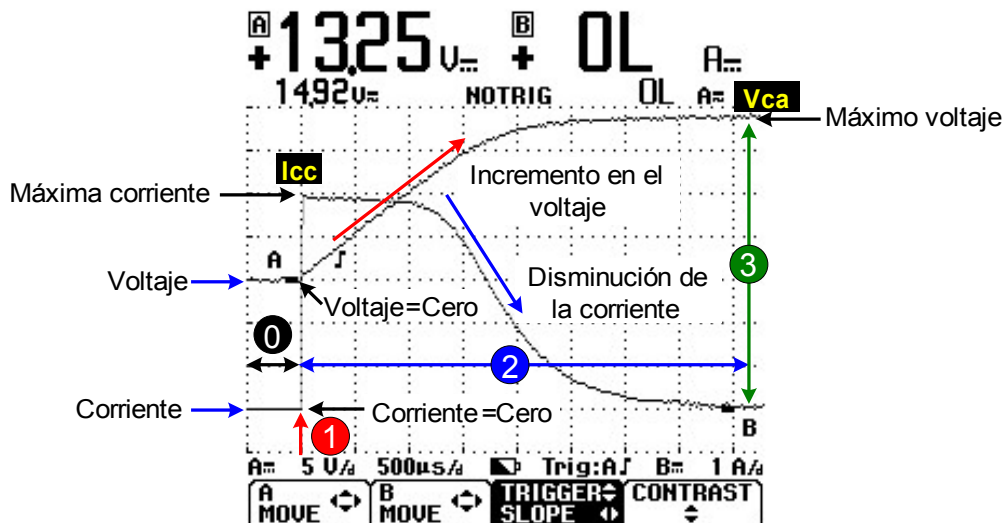


Figura 72. Fotografía del registro desplegado en la pantalla del Scopemeter con un ejemplo de medición de los cambios de voltaje y corriente.

3.5 Módulos fotovoltaicos a caracterizados.

Los ocho módulos fotovoltaicos caracterizados son de la marca Total Energie modelo TE850, son a base de Silicio policristalino y tienen una potencia nominal de 80 Wp cada uno. En la figura 73 se presenta una fotografía de uno de los módulos y la placa de datos del mismo.

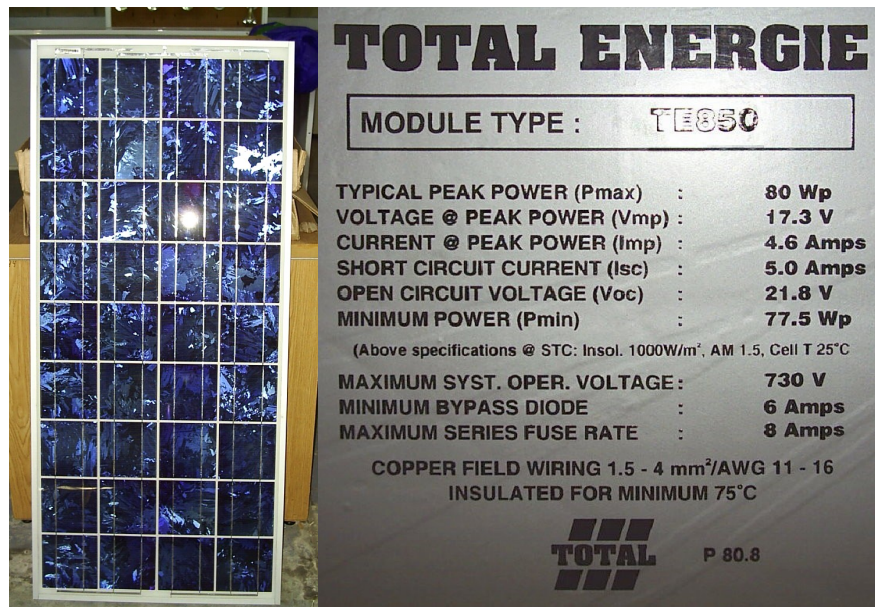


Figura 73. Fotografía de uno de los módulos caracterizados y su placa de datos (tomada por Fco. Núñez).

No se presenta la curva V-I de éste módulo, debido a que aquella que el fabricante entregó corresponde al modelo TE850A1, un módulo de 90 Wp.

En la tabla 6 se presentan las características de los módulos fotovoltaicos caracterizados.

Tabla 6. Características del módulo TE850 [22].

Modelo	TE850	Total Energie
Encapsulación	Vidrio/tecllar	
Número de celdas	36	celdas
Tamaño de celdas	125 x 125	mm
Potencia típica	80.0	W_p
Voltaje a máxima potencia	17.3	V
Corriente	4.6	A
Voltaje a circuito abierto	21.8	V
Corriente de cortocircuito	5.0	A
Conexión	Caja de conexión	
Voltaje máximo del sistema	730	V
Diodos de protección	2 by-pass	
Peso	7.8	Kg
Temperatura de uso y almacenamiento	-40 a 85	°C
Humedad relativa	0 a 100 %	
Garantía	25*	Años
Garantía en ambiente marítimo y tropical	10	Años
Datos típicos @ STC: irradiancia solar 1000 W m^{-2} , AM 1.5, temperatura de celda $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (tolerancia de potencia= $\pm 3\%$)		
Normas : módulo certificado IEC 61215		

3.6 Ubicación e instalación del arreglo fotovoltaico.

Los módulos fotovoltaicos se ubicaron en la parte posterior del Taller de Ingeniería “Ing. Luís Felipe Medina Leyva”, de la Universidad de Quintana Roo, en su Campus de Chetumal, Quintana Roo. La latitud del sitio es $18^\circ 30' 13$ de latitud Norte (18.5°) y $88^\circ 18' 19$ de longitud Oeste (88.3°). La ubicación se muestra en la figura 74.



Figura 74. Fotografías satelitales de la ubicación geográfica del arreglo fotovoltaico (2006 Google™).

Los módulos fotovoltaicos se montaron en unas estructuras metálicas de aluminio como se observa en la figura 75, a una inclinación de aproximadamente 18.5° con orientación hacia el sur verdadero con el fin de lograr captar la mayor cantidad de irradiancia solar alrededor del medio día solar. En las mismas estructuras se montaron el dispositivo electrónico de prueba desarrollado y el piranómetro para medir la irradiancia solar que llega a los módulos fotovoltaicos.





Figura 75. Fotografías del equipo instalado (tomada por Fco. Núñez).

Las pruebas se realizaron entre las 12 y 14 horas con el fin de contar con valores más altos de irradiancia solar y la temperatura se midió en el punto central de la parte posterior del módulo fotovoltaico con el termómetro de infrarrojos.

3.7 Procedimiento experimental.

Con todo el equipo e instrumentos montados el procedimiento se resume en el siguiente algoritmo:

- Se instalan el módulo o los módulos fotovoltaicos en la base de conexión y se conectan al sistema electrónico de prueba.
- Se verifica que el capacitor este descargado utilizando un multímetro; de no ser así, se descarga al capacitor por medio de la resistencia de descarga.
- Se conecta la interfase entre el Scopemeter y la computadora, se ejecuta el programa Flukeview ® y se configuran ambos (como se describió en el punto 3.4 de éste capítulo).
- Las puntas de voltaje se conectan en paralelo al capacitor por medio de un par de conductores libres que han sido soldados al circuito de potencia. La punta de corriente se coloca preferentemente en el conductor de la terminal negativa del módulo fotovoltaico que van en dirección al circuito de potencia respetando el sentido de paso de corriente en el conductor marcado en el extremo de la punta de corriente.
- A través de un multímetro, se miden y observan las lecturas que proporciona el piranómetro hasta obtener la irradiancia solar más próxima a los 1000 W m^{-2} (medio día solar).
- Al tener la mayor irradiancia solar se presiona el botón de pulso en el sistema de control.

- Se mide y registra la temperatura en el centro de la parte posterior del módulo fotovoltaico con el termómetro de infrarrojos.
- Después del pulso de disparo del circuito de control las curvas de voltaje y corriente son medidas y registradas por el Scopemeter y mediante el software Flukeview ® se selecciona el icono  para desplegar las formas de onda del canal A y B simultáneamente en pantalla de la computadora. Después se selecciona guardar desde el menú FILE o presionando el icono  y se elige la ruta donde se desea almacenar el archivo y la extensión de mismo. Preferentemente la extensión debe ser *.fvf o *.csv; éste último permite trabajar directamente los datos desde una hoja de electrónica de cálculo.
- El capacitor es regresado a sus condiciones iniciales por medio de la resistencia de descarga y el Scopemeter se configura nuevamente para quedar en estado de espera de un solo disparo. Con lo anterior el sistema queda listo para repetir la prueba y obtener las curvas de otro módulo o arreglo fotovoltaico.
- Posteriormente los datos guardados son analizados y procesados en la computadora por medio de una hoja electrónica de cálculo para finalmente graficar la curva V-I.

Las condiciones atmosféricas como la lluvia y nublados que se tenían en el sitio de prueba, así como la falta de una estructura de montaje con el espacio suficiente para instalar a los ocho módulos fotovoltaicos de manera simultánea, causaron un retraso en la realización de la caracterización. Esto incluye el tiempo dedicado a las pruebas preliminares del sistema electrónico desarrollado, que dieran confianza a los resultados que se obtenían de él; y claro, el tiempo requerido para la caracterización de cada uno de los módulos fotovoltaicos en sí.

Pese a todo lo anterior las pruebas se realizaron y los resultados obtenidos reportan el desempeño real de los módulos fotovoltaicos en sitio. Este desempeño, al ser realizado bajo condiciones naturales de irradiancia solar y temperatura del módulo fotovoltaico, proporciona información del módulo bajo las condiciones reales de trabajo y no bajo las condiciones ideales que se tienen en laboratorio.

Capítulo IV - Resultados experimentales

En este capítulo se presentan los principales resultados experimentales de la caracterización eléctrica del arreglo fotovoltaico. Las curvas V-I que describen el comportamiento de generación de energía eléctrica de los ocho módulos fotovoltaicos. Los efectos en la curva V-I debidos a las interconexiones entre los módulos fotovoltaicos, y a las magnitudes de la temperatura e irradiancia solar presente en los módulos fotovoltaicos.

Los ocho módulos fotovoltaicos a caracterizados se enumeraron con números del uno al ocho para diferenciarlos.

La irradiancia solar registrada oscila entre los 850 y 990 W m^{-2} para la caracterización de cada uno de los módulos y entre 650 y 900 W m^{-2} para las mediciones en grupos. Las temperaturas en los módulos fotovoltaicos oscilan entre los 45 y 60 $^{\circ}\text{C}$.

4.1 Curva característica de cada módulo fotovoltaico.

En las figuras 76 a la 83 se presentan las curvas V-I de cada uno de los módulos fotovoltaicos obtenidas experimentalmente. La fecha en la cual se realizó la prueba y los valores de la temperatura en el módulo e irradiancia solar registrados en ese instante. Como se menciono en el capítulo anterior las pruebas se realizaron, en promedio, entre las 12:00 y las 14:00 horas.

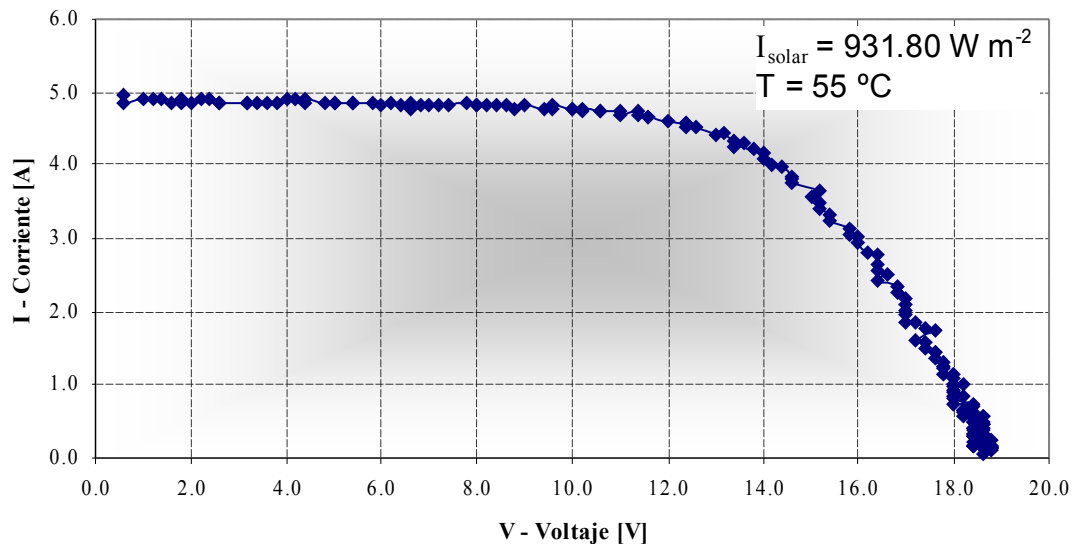


Figura 76. Curva V-I del módulo 1. $I_{\text{solar}} = 931.80 \text{ W m}^{-2}$, $T = 55 \text{ }^{\circ}\text{C}$. 30-mar-06.

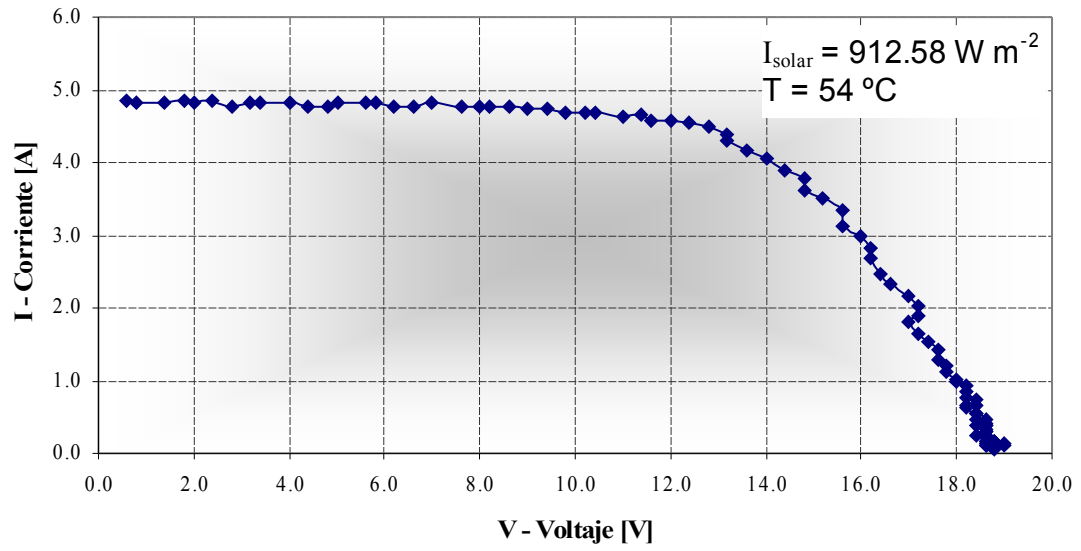


Figura 77. Curva V-I del módulo 2. $I_{\text{solar}} = 912.58 \text{ W m}^{-2}$, $T = 54 \text{ }^{\circ}\text{C}$. 30-mar-06.

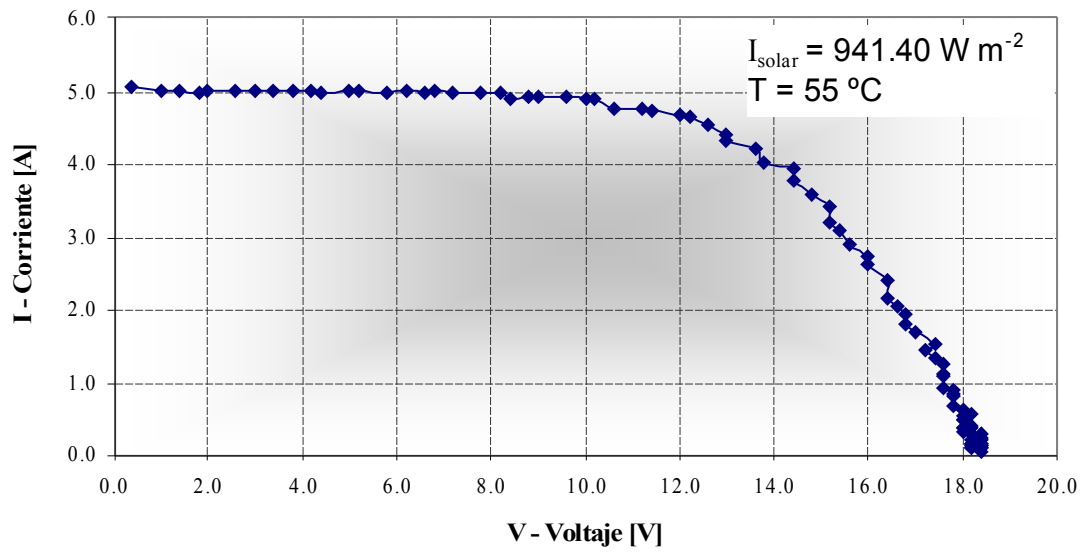


Figura 78. Curva V-I del módulo 3. $I_{\text{solar}} = 941.40 \text{ W m}^{-2}$, $T = 55 \text{ }^{\circ}\text{C}$. 04-abr-06.

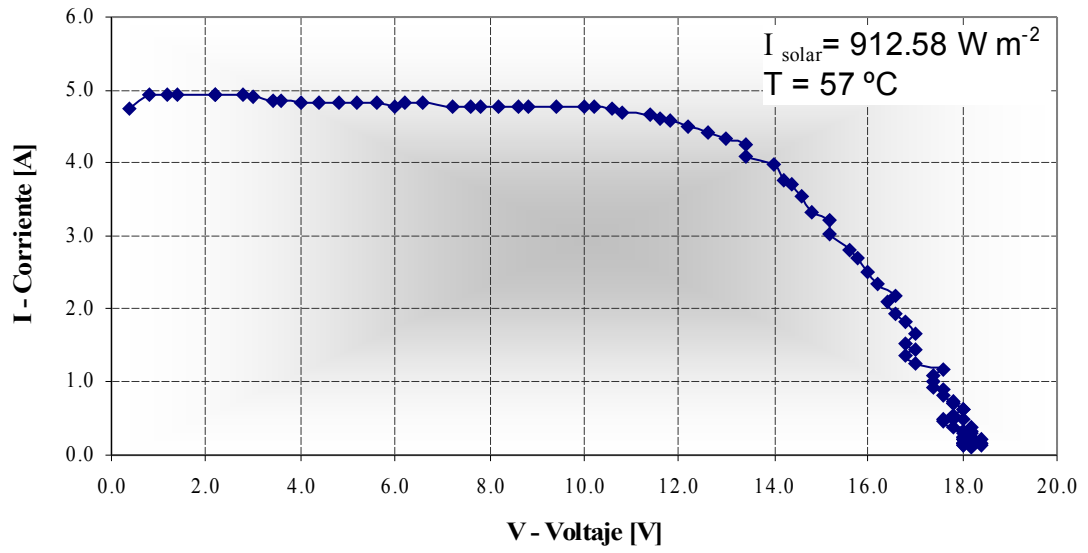


Figura 79. Curva V-I del módulo 4. $I_{\text{solar}} = 912.58 \text{ W m}^{-2}$, $T = 57 \text{ }^{\circ}\text{C}$. 04-abr-06.

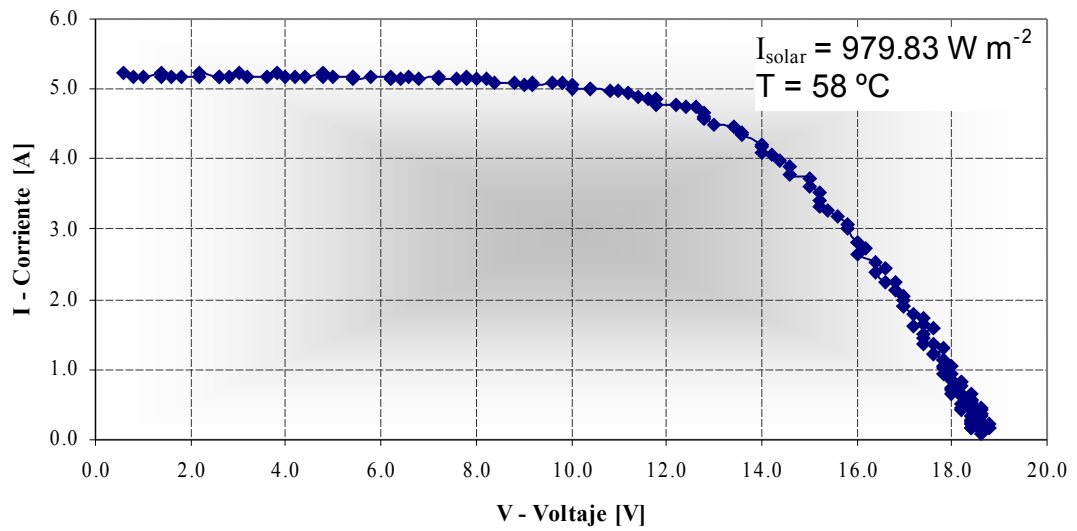


Figura 80. Curva V-I del módulo 5. $I_{\text{solar}} = 979.83 \text{ W m}^{-2}$, $T = 58 \text{ }^{\circ}\text{C}$. 06-abr-06.

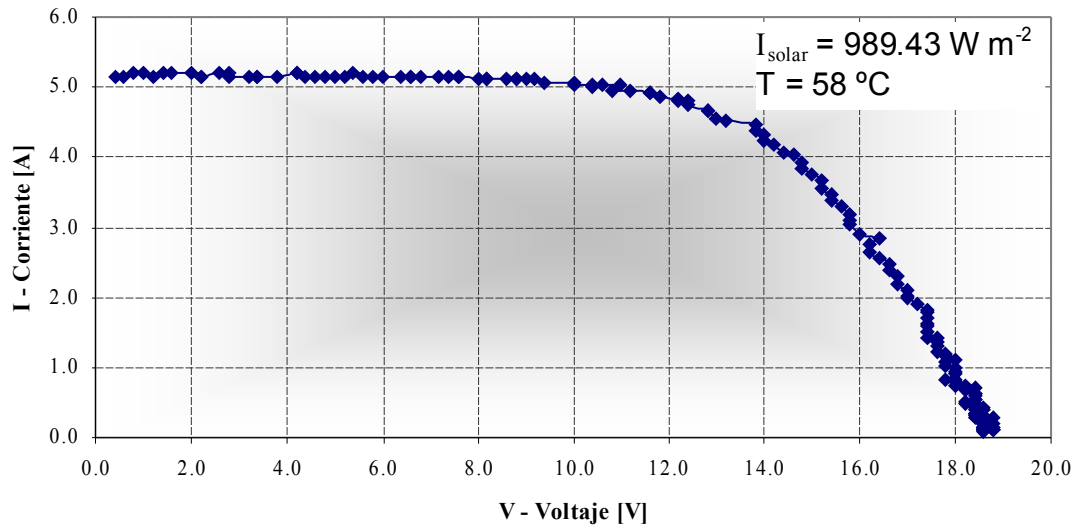


Figura 81. Curva V-I del módulo 6. $I_{\text{solar}} = 989.43 \text{ W m}^{-2}$, $T = 58 \text{ }^{\circ}\text{C}$. 06-abr-06.

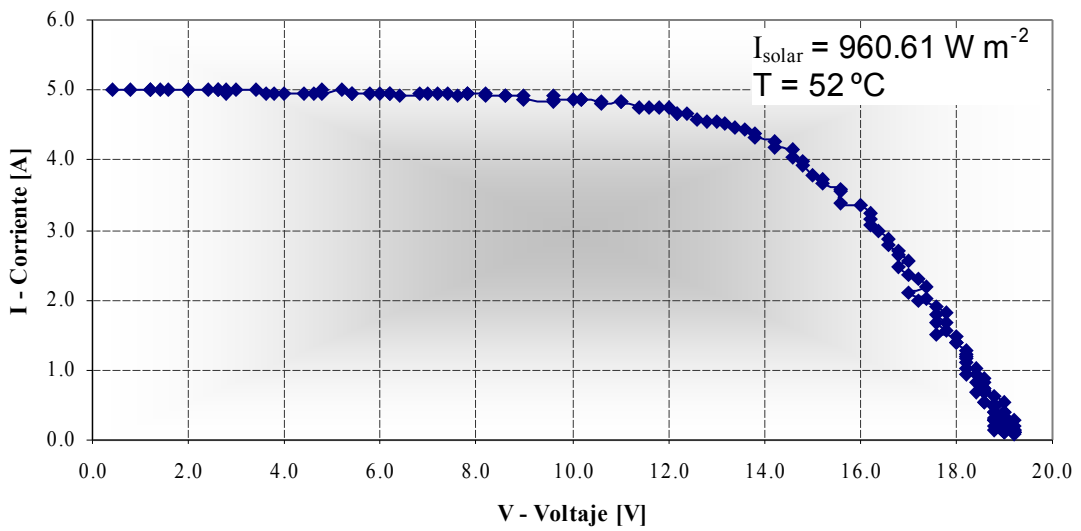


Figura 82. Curva V-I del módulo 7. $I_{\text{solar}} = 960.61 \text{ W m}^{-2}$, $T = 52 \text{ }^{\circ}\text{C}$. 06-abr-06.

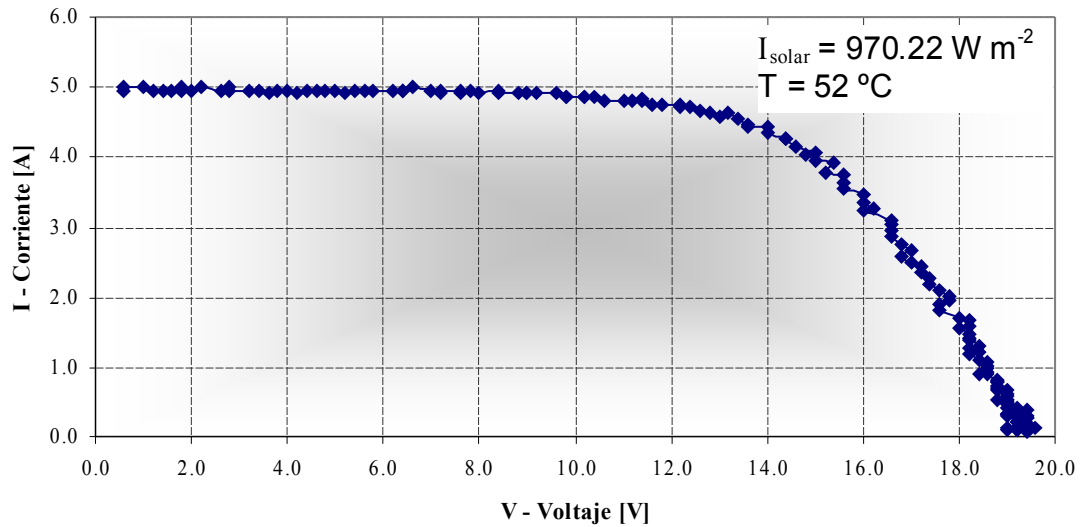


Figura 83. Curva V-I del módulo 8. $I_{\text{solar}} = 970.22 \text{ W m}^{-2}$, $T = 52 \text{ }^{\circ}\text{C}$. 06-abr-06.

Como puede observarse en las figuras 76 a la 83 el comportamiento de las curvas tienen la forma de la curva teórica V-I que se presenta en la literatura y en el capítulo uno. Las curvas inician con una corriente máxima, la corriente de corto circuito del módulo fotovoltaico. Conforme se avanza sobre el eje del voltaje la corriente va decreciendo de manera constante y ligera, hasta el punto en que se tiene un decremento más abrupto de ésta que consecuentemente causa que el gráfico se curve. A partir de la flexión en el gráfico, la corriente decrece con mayor rapidez hasta reducirse a cero. En cambio el voltaje inicia con un valor mínimo (cero) que se incrementa hasta el voltaje a circuito abierto del módulo fotovoltaico. Se observa también que para cada valor de voltaje del módulo fotovoltaico corresponde un valor específico de corriente; esta corriente está en función de la magnitud de la irradiancia solar a la que el módulo está siendo sometido y de la temperatura que el módulo alcance bajo los rayos del Sol.

Los principales parámetros medidos de cada uno de los módulos caracterizados se encuentran resumidos entre las tablas 7, 8 y 9.

Tabla 7. Corriente de corto circuito y voltaje a circuito abierto de cada uno de los módulos fotovoltaicos.

Número del Módulo	Datos medidos				Porcentaje por encima o por debajo de los datos de placa: 21.8 V y 5.0 A.	
	Irradiancia solar [W m^{-2}]	Temperatura del módulo [$^{\circ}\text{C}$]	Icc [A]	Vca [V]	Icc [%]	Vca [%]
1	931.8	55.0	5.0	18.8	-0.4	-13.8
2	912.6	54.0	4.9	19.0	-2.8	-12.8
3	941.4	55.0	5.1	18.4	1.2	-15.6
4	912.6	57.0	4.9	18.4	-1.2	-15.6
5	979.8	58.0	5.2	18.8	4.4	-13.8
6	989.4	58.0	5.2	18.8	3.0	-13.8
7	960.6	52.0	5.0	19.2	-0.2	-11.9
8	970.2	52.0	5.0	19.6	-0.2	-10.1
Promedio	949.8	55.00	5.0	18.9	0.5	-13.4

Los valores de irradiancia solar para estas pruebas se mantuvieron por encima de los 910 W m^{-2} , a un promedio de casi 950 W m^{-2} . El valor más alto se tuvo en el módulo número 6 con 979.8 W m^{-2} y los valores más bajos en los módulos 2 y 4 con 912.6 W m^{-2} .

La temperatura en los módulos fotovoltaicos se debe al tiempo de exposición de estos a los rayos del Sol. Es normal que los módulos durante su operación diaria estén a una temperatura mayor que la temperatura ambiente.

Los valores promedio de la corriente de corto circuito y el voltaje a circuito abierto para los módulos fotovoltaicos es de 5.0 A y 18.9 V respectivamente; en tanto que el valor nominal es 5.0 A y 21.8 V . Cinco de los módulos tienen una corriente de corto circuito ligeramente menor que la nominal y en los tres módulos restantes es ligeramente mayor, como puede observarse en la columna 6 de la tabla 7. En cambio el voltaje a circuito abierto se vio considerablemente afectado por la temperatura, ya que los ocho módulos se encontraron un 13.4% por debajo del valor nominal en promedio, como se observa en la columna 7 de la misma tabla.

En la figura 84 se encuentran graficados los valores medidos correspondientes a la corriente de corto circuito y el voltaje a circuito abierto de cada uno de los módulos fotovoltaicos y su comparación con los valores proporcionados por el fabricante.

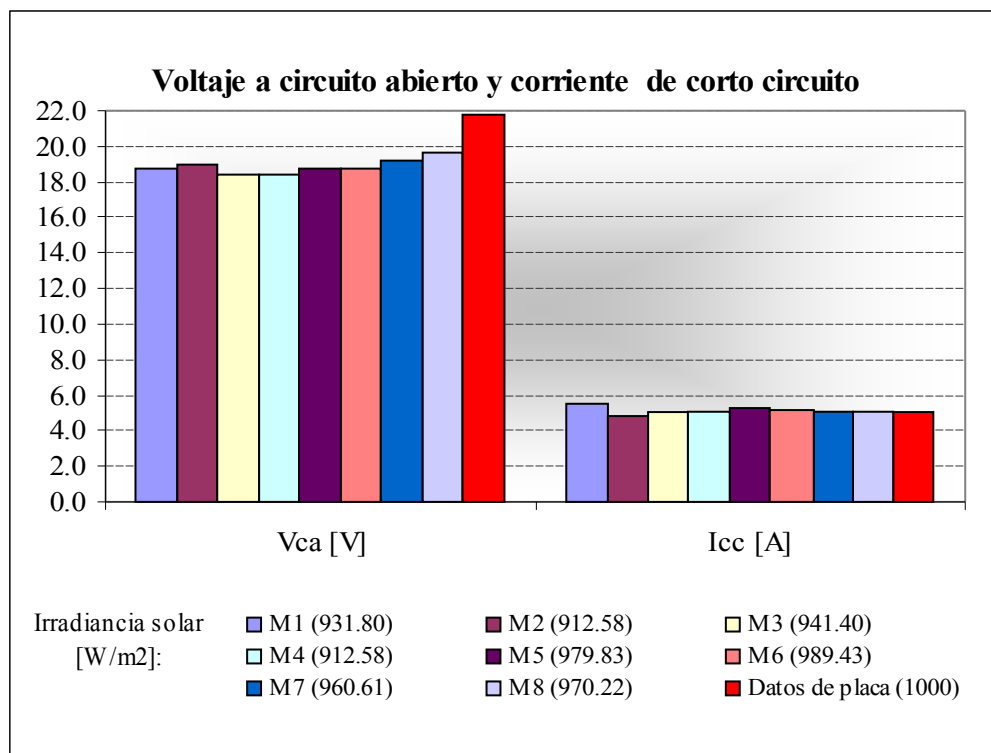


Figura 84. Gráfico comparativo de las corrientes de corto circuito y voltajes a circuito abierto de cada uno de los módulos fotovoltaicos.

Las razones por las cuales las magnitudes difieren entre módulo y módulo se debe a la combinación de la irradiancia solar, la temperatura a la cual estaban sometidos y a la eficiencia de conversión de la energía solar a energía eléctrica de cada uno de los módulos. Para muestra de ello, en la tabla 8 se observan los efectos de estas variables en las potencias máximas y las corrientes y voltajes a máxima potencia medidas en los módulos fotovoltaicos.

Tabla 8. Corrientes y voltajes de máxima potencia y potencia máxima de los módulos caracterizados.

Número del Módulo	Datos Medidos					Porcentaje por encima o por debajo de los datos de placa: 17.3 V, 4.6 A y 80 W		
	Irradiancia solar [W m ⁻²]	T. del M [°C]	Imp [A]	Vmp [V]	Pmax [W]	Imp [%]	Vmp [%]	Pmax [%]
1	931.8	55.0	4.5	13.2	58.8	-3.0	-23.7	-26.5
2	912.6	54.0	4.4	13.2	57.8	-4.8	-23.7	-27.8
3	941.4	55.0	4.4	13.0	57.4	-3.9	-24.9	-28.2
4	912.6	57.0	4.3	13.4	57.0	-7.4	-22.5	-28.7
5	979.8	58.0	4.5	13.4	59.7	-3.0	-22.5	-25.3
6	989.4	58.0	4.5	13.8	61.7	-2.8	-20.2	-22.9
7	960.6	52.0	4.8	14.2	60.7	3.9	-17.9	-24.2
8	970.2	52.0	4.4	14.0	62.0	-3.7	-19.1	-22.4
Promedio	949.8	55.0	4.5	13.5	59.4	-3.1	-21.8	-25.7

A pesar de que el módulo número 6 tiene el mayor valor de irradiación solar, el valor más alto de máxima potencia es alcanzado por el módulo 8 con 62.0 W. Mientras el valor promedio es de 59.4 W que corresponde al 74.3% del valor nominal.

Para observar rápidamente la diferencia entre los parámetros obtenidos, en la figura 85 están graficados los datos de las corrientes y voltaje a máxima potencia de los módulos fotovoltaicos y en la figura 86 los datos de sus potencias máximas.

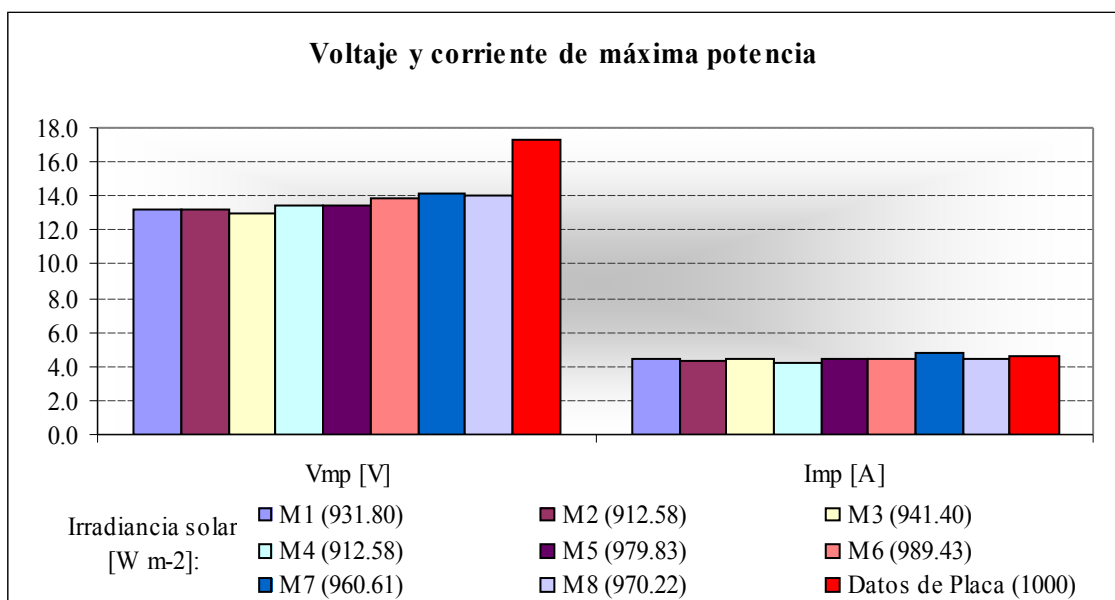


Figura 85. Gráfico comparativo de las corrientes y voltajes de máxima potencia de cada módulo fotovoltaico.

Las temperaturas causan nuevamente pérdidas considerables en los voltajes registrados. En promedio los módulos sólo alcanzaron el 78% del valor nominal del voltaje de máxima potencia, en cambio que las corrientes de máxima potencia se encuentran 3.1% a bajo de su valor nominal, como se observa en las columnas 7 y 8 de la tabla 8.

En la figura 86 se graficaron los datos de las potencias máximas de los módulos fotovoltaicos para una comparación rápida.

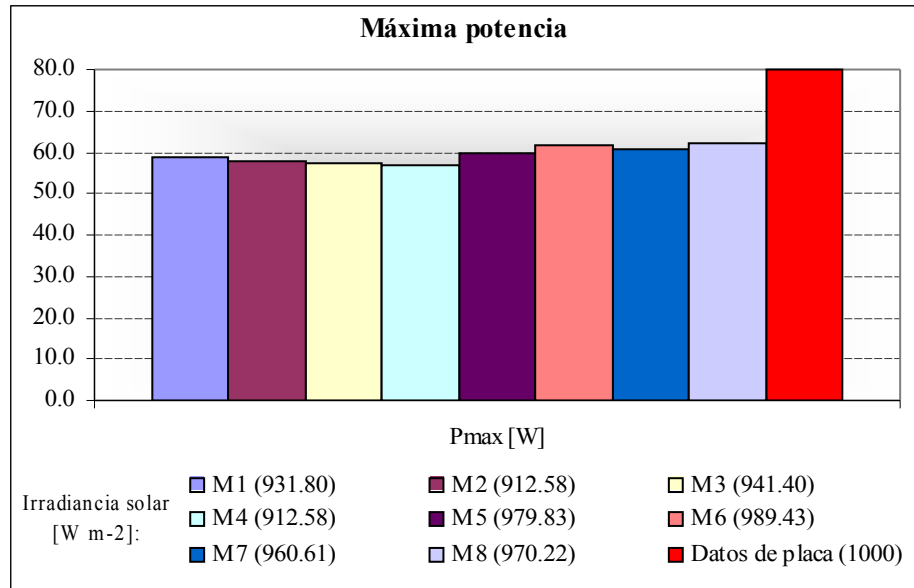
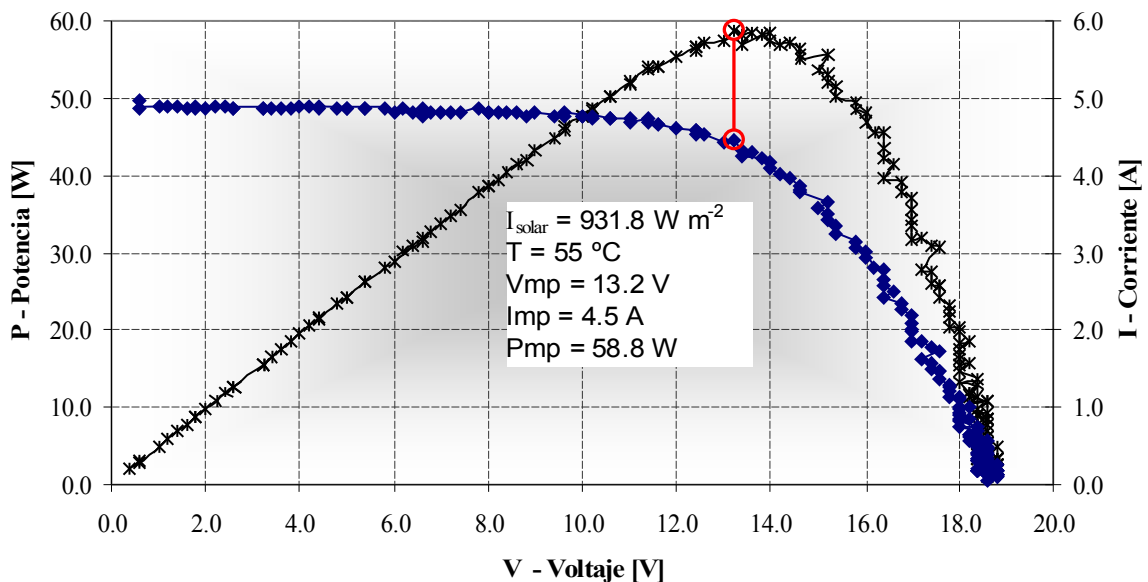


Figura 86. Gráfico comparativo de la potencia máxima de cada módulo fotovoltaico.

Los efectos de la temperatura producen caídas de voltaje y afectan directamente la potencia máxima como se observa en la figura 86. Sin embargo los módulos trabajan adecuadamente y generan más del 70% de su valor pico. La potencia máxima más elevada pertenece al módulo número 8 con 62 W.

Con los datos obtenidos de corriente y voltaje se puede obtener la potencia y graficar la curva P-V, en donde se identifica fácilmente la potencia óptima de operación de un módulo fotovoltaico. Esta potencia corresponde al punto más alto de la curva. Un ejemplo se presenta en la figura 87, en la cual se utilizaron los datos del módulo 1.



$I_{\text{solar}} = 931.8 \text{ W m}^{-2}$, $T = 55 \text{ }^{\circ}\text{C}$. 30-mar-06.

Figura 87. Curva de V-P para el módulo 1.

El punto más alto de la curva P-V corresponde al valor del punto de potencia máxima de la curva V-I.

4.2 Eficiencia de cada módulo fotovoltaico caracterizado.

De los datos proporcionados por el fabricante se tiene:

Potencia luminosa: $P_{luminosa} = 1000 \text{ W m}^{-2}$

Superficie del modulo: $S = (0.556 \text{ m}) (1.231 \text{ m}) = 0.684 \text{ m}^2$

Tamaño de celda: 12.5 cm x 12.5 cm

Potencia Nominal: $P_{max} = 80 \text{ W}$

Área efectiva: $Ae = N_{oceldas} \times \text{Tamaño de celda} = 36(0.125\text{m} \times 0.125\text{m}) = 0.5625\text{m}^2 \approx 0.563\text{m}^2$

- Eficiencia de las celdas encapsuladas:

$$\eta_{celdas} = \frac{P_{max}}{P_i} \times 100 = \frac{P_{max}}{P_{luminosa} Ae} \times 100 = \frac{80W}{1000 \frac{W}{m^2} \times 0.563m^2} \times 100 = 14.21\%$$

- Eficiencia teórica del módulo fotovoltaico:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_i} \times 100 = \frac{P_{max}}{P_{luminosa} S} \times 100 = \frac{80W}{1000 \frac{W}{m^2} \times 0.684m^2} \times 100 = 11.695\% \approx 11.70\%$$

En la tabla 9 se presentan las eficiencias obtenidas en la caracterización y el porcentaje alcanzado por estos respecto a la eficiencia nominal.

Tabla 9. Eficiencias de los módulos caracterizados.

Número del módulo	Irradiancia solar [W m ⁻²]	T. del Módulo [°C]	η [%]	Porcentaje de la eficiencia alcanzada por el módulo respecto al valor teórico: 11.70 %
1	931.8	55.0	9.2	78.9
2	912.6	54.0	9.3	79.1
3	941.4	55.0	8.9	76.2
4	912.6	57.0	9.1	78.1
5	979.8	58.0	8.9	76.2
6	989.4	58.0	9.1	78.0
7	960.6	52.0	9.2	78.9
8	970.2	52.0	9.4	79.9

En la figura 88 se encuentran graficadas las eficiencias de cada uno de los módulos fotovoltaicos y su comparación con la eficiencia teórica.

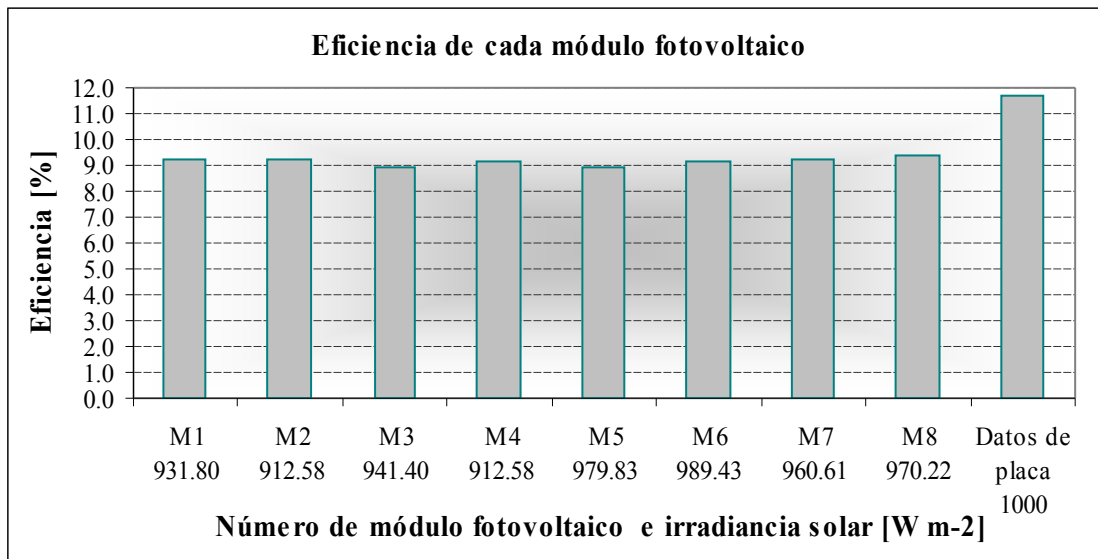


Figura 88. Gráfico de la eficiencia de cada módulo fotovoltaico.

La mayor eficiencia de conversión de energía solar a energía eléctrica es de 9.4% perteneciente al módulo fotovoltaico número 8 y que corresponde al 80% del valor nominal. En promedio los módulos fotovoltaicos caracterizados se encuentran aproximadamente un 22% por debajo de la eficiencia nominal. Esto significa que al realizar un dimensionamiento con este grupo de módulos, se debe prever que no se está obteniendo los 80 Wp de la potencia nominal.

En la tabla 10 se presenta el resumen de los principales parámetros eléctricos obtenidos a través de la caracterización de este grupo de módulos fotovoltaicos.

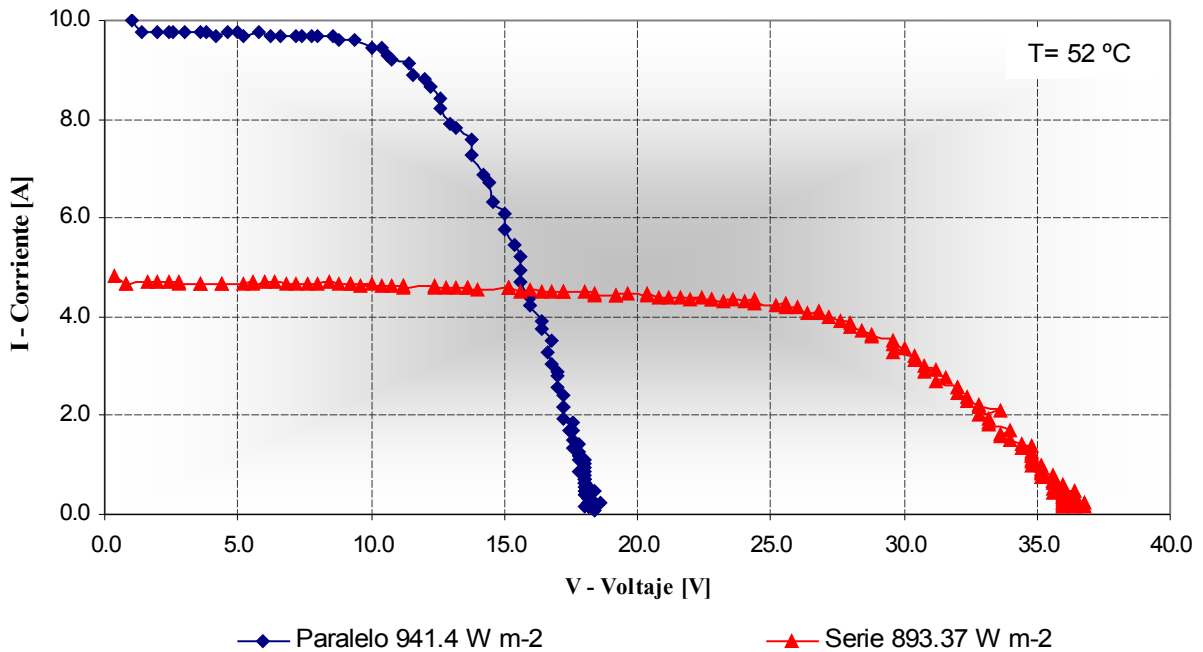
Tabla 10. Principales parámetros obtenidos de la caracterización de los ocho módulos TE850.

M	I_{solar} [W m ⁻²]	T. del M [°C]	Vca [V]	Icc [A]	Vmp [V]	Imp [A]	Pmax [W]	η [%]
1	931.8	55.0	18.8	5.0	13.2	4.5	58.8	9.2
2	912.6	54.0	19.0	4.9	13.2	4.4	57.8	9.3
3	941.4	55.0	18.4	5.1	13.0	4.4	57.4	8.9
4	912.6	57.0	18.4	4.9	13.4	4.3	57.0	9.1
5	979.8	58.0	18.8	5.2	13.4	4.5	59.7	8.9
6	989.4	58.0	18.8	5.2	13.8	4.5	61.7	9.1
7	960.6	52.0	19.2	5.0	14.2	4.8	60.7	9.2
8	970.2	52.0	19.6	5.0	14.0	4.4	62.1	9.4

4.3 Conexiones serie y paralelo.

En el capítulo 2 se explicó que se puede aumentar los valores de corriente y voltaje de salida al realizar conexiones en paralelo y en serie entre los módulos fotovoltaicos. Para verificar este hecho se graficaron las curvas V-I para una conexión en serie y una conexión en paralelo de dos de los módulos (módulos 5 y 6) en la figura 89 y para una conexión en serie y una conexión en paralelo de cuatro de los módulos (módulos 5 al 8) en la figura 90.

Comparación entre dos módulos en conexión paralelo y serie



T= 52 °C, 13,14-abr-06.

Figura 89. Curvas V-I para una conexión en serie y paralelo de dos módulos fotovoltaicos.

En la tabla 11 se resumen los valores de los principales parámetros eléctricos obtenidos de la curva V-I de los módulos 5 y 6 en una conexión serie y en una conexión paralelo.

Tabla 11. Datos teóricos contra datos medidos para una conexión serie y conexión paralelo de dos módulos fotovoltaicos.

Conexión	Valores	Comparación de valores					Porcentaje por encima o por debajo de los datos de placa				
		I _{mp} [A]	V _{mp} [V]	P _{max} [W]	I _{cc} [A]	V _{ca} [V]	I _{mp} [%]	V _{mp} [%]	P _{max} [%]	I _{cc} [%]	V _{ca} [%]
Paralelo	Teóricos	9.2	17.3	160.0	10.0	21.8	-4.4	-30.6	-34.1	0.0	-14.7
	Medidos	8.8	12.0	105.5	10.0	18.6					
Serie	Teóricos	4.6	34.6	160.0	5.0	43.6	-10.4	-22.5	-31.0	-3.2	-15.6
	Medidos	4.1	26.8	110.4	4.8	36.8					

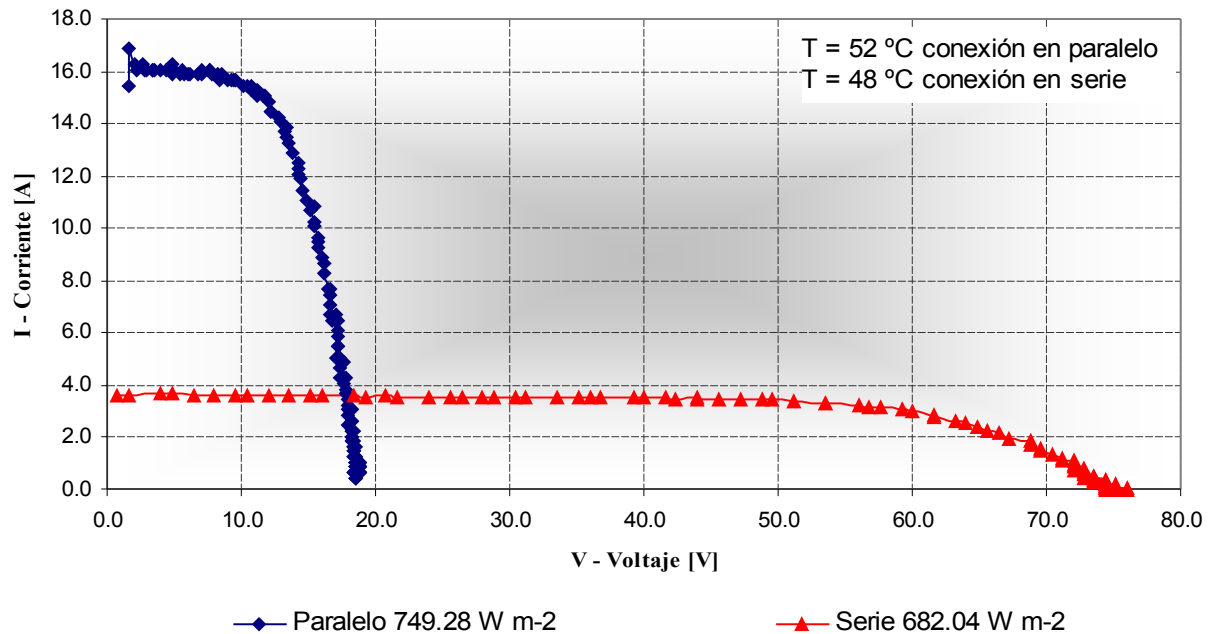
Datos nominales: T=25 °C, I_{solar}=1000 W m²

Datos medidos: para la conexión paralelo T=52 °C, I_{solar}=941.40 W m² y para la conexión serie I_{solar}=893.37 W m² y T=52 °C.

Bajo la irradiancia solar y temperatura registrada en los módulos fotovoltaicos se obtuvieron valores cercanos a los datos nominales en las corrientes de corto circuito y corrientes de máxima potencia. En cambio, los valores en el voltaje de máxima potencia se encuentran, en promedio, a un 73 % del valor nominal y los voltajes a circuito abierto a un 85%. La potencia máxima alcanza aproximadamente el 65 y 69% del valor nominal para la conexión paralelo y serie respectivamente.

En la figura 90 se tiene la curva V-I de los módulos 5, 6, 7, y 8 para las mismas configuraciones.

Comparación entre cuatro módulos en conexión paralelo y serie



T = 52 °C conexión en paralelo, T = 48 °C conexión en serie, 19-jun-06.

Figura 90. Curvas V-I de la conexión en serie y la conexión en paralelo de cuatro módulos fotovoltaicos.

En la tabla 12 se resumen los valores de los principales parámetros eléctricos obtenidos de la curva V-I de la figura 90.

Tabla 12. Datos teóricos contra datos medidos para una conexión serie y una conexión paralelo de cuatro módulos fotovoltaicos.

Conexión	Valores	Comparación de valores					Porcentaje por debajo de los datos de placa				
		Imp [A]	Vmp [V]	Pmax [W]	Icc [A]	Vca [V]	Imp [%]	Vmp [%]	Pmax [%]	Icc [%]	Vca [%]
Paralelo	Teóricos	18.40	17.30	320.00	20.00	21.80	-24.6	-22.5	-42.0	-15.7	-13.8
	Medidos	13.87	13.40	185.60	16.87	18.80					
Serie	Teóricos	4.60	69.20	320.00	5.00	87.20	-28.9	-19.1	-42.8	-26.6	-12.6
	Medidos	3.27	56.00	183.12	3.67	76.20					

Datos teóricos: T=25 °C, $I_{solar}=1000 \text{ W m}^{-2}$

Datos medidos: para la conexión paralelo T=52 °C, $I_{solar}=749.28 \text{ W m}^{-2}$ y para la conexión serie $I_{solar}=682.04 \text{ W m}^{-2}$ y T=48 °C.

En el caso de los cuatro módulos conectados simultáneamente se tienen un 75 y 68% de la irradiancia solar deseada. Esto provoca que los valores de las corrientes de corto circuito y de máxima potencia medidas sólo alcancen el 84 y 75% (respectivamente) para la conexión en paralelo y el 73 y 71% para la conexión serie. Además la potencias alcanzadas en el punto de máxima potencia se encuentran en un 58 y 57% de los 320 W nominales.

De esta forma se constata que al conectarse un par de módulos fotovoltaicos en serie, el voltaje final será la suma de los voltajes individuales de cada uno de los módulos y la corriente eléctrica se mantendrá sin cambios notables. Caso contrario es un par de módulos en paralelo, ya que logran que la corriente final sea la suma de las corrientes individuales de cada uno de ellos y que el voltaje se mantenga sin cambios

notables. Hay que observar también, que la potencia máxima en teoría debe conservarse sin importar si los módulos se conectan en serie o paralelo, ya que ésta es producto de la corriente por el voltaje.

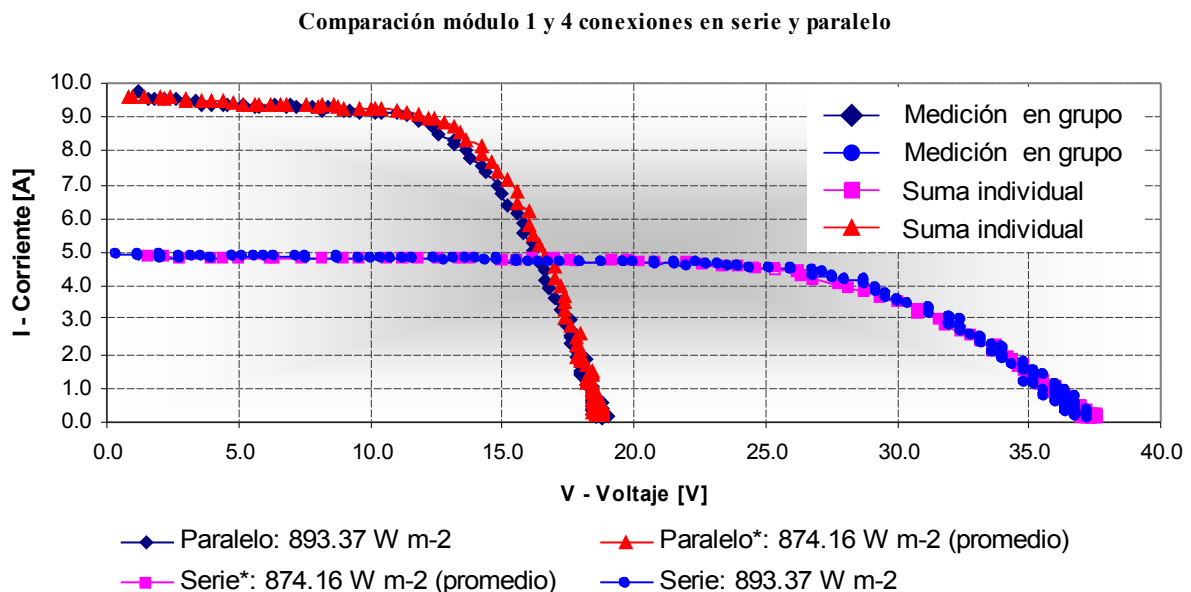
En un dimensionamiento, es necesario considerar en el párrafo anterior las pérdidas debido a caídas de voltaje por la longitud de los conductores que se usen, pérdidas por calentamiento de conductores mal dimensionados y principalmente tener presente que un grupo de módulos fotovoltaicos que sean del mismo modelo y lote de fabricación, no poseen exactamente las mismas características eléctricas. Siempre hay una tolerancia o grado de error.

4.4 Prueba de linealidad.

En la figura 89 se tiene la curva V-I descrita por la conexión simultánea de dos módulos fotovoltaicos. En esta sección se compara si el aumento de corriente y voltaje en dicha conexión es lineal para los módulos considerando que poseen características eléctricas "iguales" al ser del mismo modelo y marca, es decir, se compara si la suma individual de los valores de voltaje y corriente de cada uno de los módulos es igual al valor de la conexión física de ambos. Para realizar la prueba los ocho módulos se dividieron en cuatro grupos de 2 elementos.

Grupo	Módulos que lo conforman
1	1 y 4
2	2 y 3
3	5 y 6
4	7 y 8

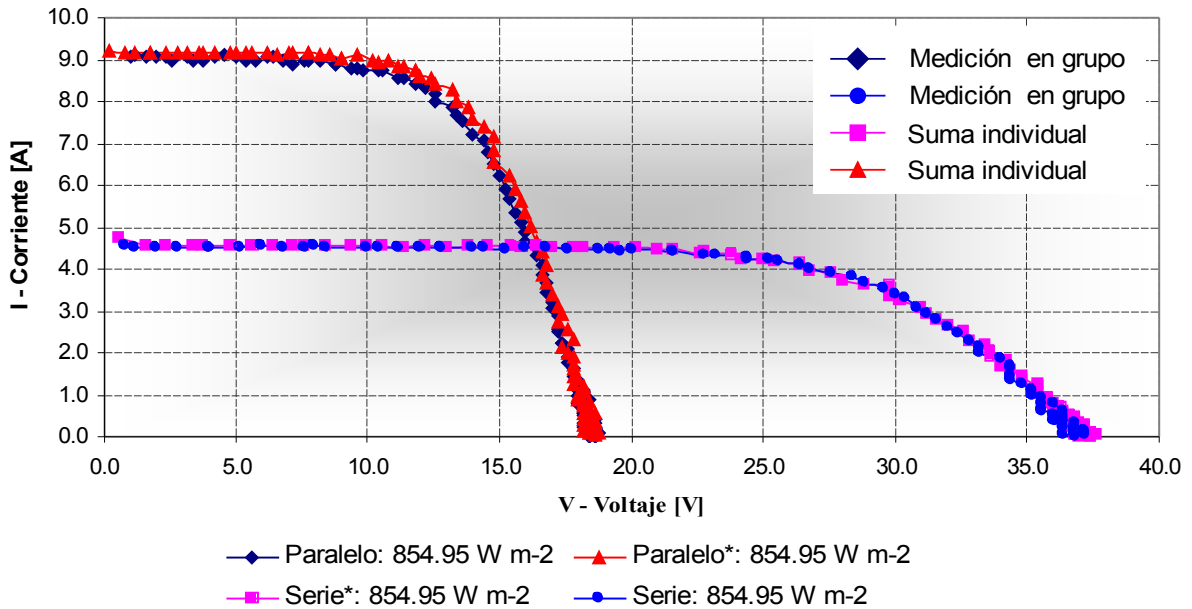
Primero se obtenía la curva V-I de cada uno de los módulos que conformaban al grupo que se deseaba medir, y una vez registrados los datos, se realizaba la conexión serie y paralelo y se registraban las curvas V-I correspondientes. El resultado se encuentra graficado en las figuras 91, 92, 93 y 94.



T = 59 °C, 23-ago-06.

Figura 91. Gráfico para la comparación entre la curva teórica y la curva real de las conexiones en serie y paralelo del primer grupo.

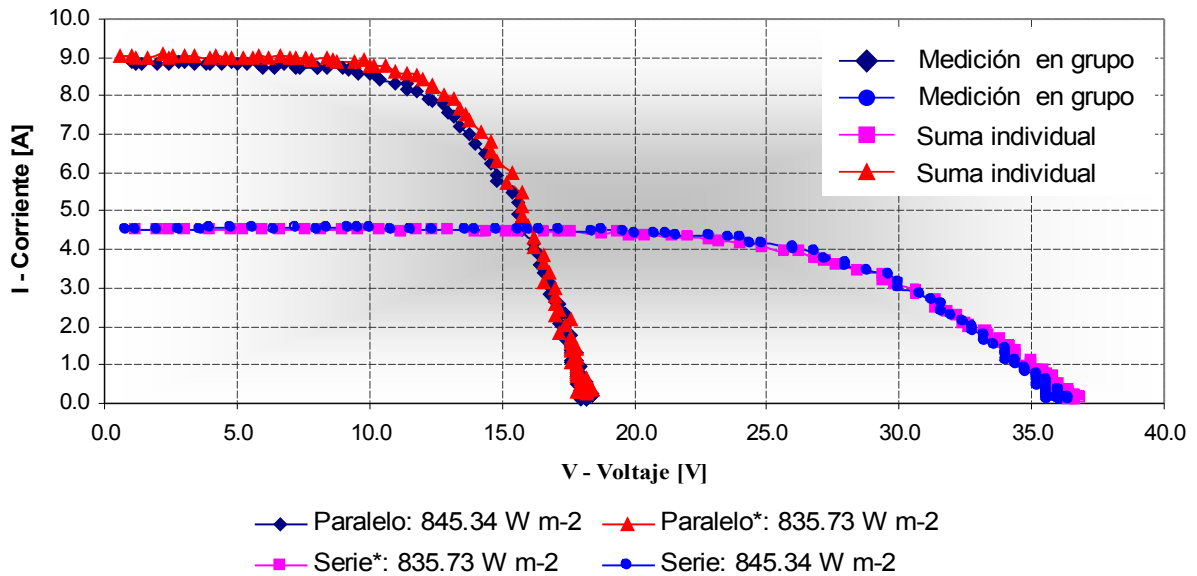
Comparación módulo 2 y 3 conexiones en serie y paralelo



T = 63 °C, 6-jul-06.

Figura 92. Gráfico para la comparación entre la curva teórica y la curva real de las conexiones en serie y paralelo del segundo grupo.

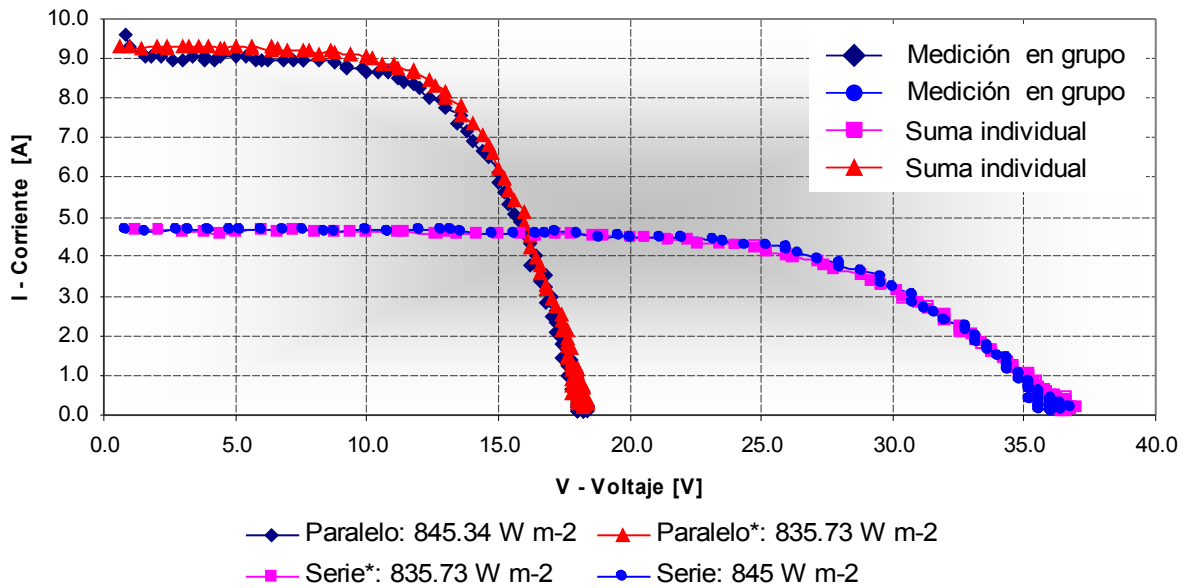
Comparación módulo 5 y 6 conexiones en serie y paralelo



T = 68 °C, 4-jul-06

Figura 93. Gráfico para la comparación entre la curva teórica y la curva real de las conexiones en serie y paralelo del tercer grupo.

Comparación módulo 7 y 8 conexiones en serie y paralelo



T = 68 °C, 4-jul-06

Figura 94. Gráfico para la comparación entre la curva teórica y la curva real de las conexiones en serie y paralelo del cuarto grupo.

En las cuatro graficas presentadas es evidente que las curvas V-I tienen la misma tendencia y son próximas entre sí; sin embargo las magnitudes de la corriente y voltaje tienen un ligero cambio entre si. La comparación más representativa corresponde a las curvas del gráfico de la figura 92 (módulos 2 y 3). Debido a que se tiene los mismos valores de irradiancia solar y temperatura en la suma individual como en la conexión en grupo para la conexión serie y de manera similar a una irradiancia solar diferente para la conexión en paralelo.

En las cuatro gráficas, la curva V-I conformada por la suma de los valores individuales de los módulos de un mismo grupo presenta valores ligeramente mayores a los obtenidos por la conexión física del grupo. Esto se debe a que en la conexión individual no se consideran que los módulos no son 100% idénticos entre sí, por lo tanto cada uno genera una cantidad diferente de energía eléctrica, diferencia mínima, pero existente. Además de que hay pérdidas debidas a la conexión física de los módulos, ya que por el simple hecho de usar un conductor, se suma una pequeña resistencia que se opone al paso de la corriente eléctrica en la conexión. Esta resistencia de no tenerse cuidado y con el aumento de la longitud y temperatura, se incrementa y produce caídas de voltaje.

Con un valor promedio de los datos individuales de cada módulo, es posible estimar el resultado de la curva V-I para el arreglo solar de los ocho módulos con un cierto grado de tolerancia.

En resumen la investigación desarrollada en esta tesis se enfocó a la obtención de las curvas V-I que describen el comportamiento de los módulos fotovoltaicos, a partir de tecnología desarrollada en la propia Universidad de Quintana Roo, con el fin de caracterizar eléctricamente un arreglo fotovoltaico de 640 W_p.

5.1 Conclusiones.

Se obtuvieron las curvas experimentales de los ocho módulos fotovoltaicos a base de Silicio policristalino, Total Energie TE850, bajo condiciones de irradiancia solar y temperaturas del sitio de trabajo. Se realizaron pruebas comparativas entre la curva teórica V-I esperada y las obtenidas experimentalmente. Se presentó el efecto de la irradiancia solar y la temperatura en las curvas V-I, así como los efectos de las interconexiones de los módulos fotovoltaicos entre si.

De los resultados de las pruebas experimentales realizadas y respecto a las hipótesis planteadas en principio, se tienen las siguientes conclusiones:

- Se desarrolló satisfactoriamente un sistema electrónico de prueba, el cual cumplió con la función para la cual fue creado: dispositivo de prueba para la medición de la curva V-I de módulos fotovoltaicos, paneles fotovoltaicos y arreglos fotovoltaicos que no excedan 50 A en corrientes de corto circuito y 200 V en los voltajes a circuito abierto.
- El sistema electrónico de prueba en conjunto con la metodología descrita en este trabajo, logran que se pueda obtener la curva V-I de un módulo fotovoltaico de manera sencilla y rápida. Debido a esto, tiene aplicación directa en asignaturas dentro de la Universidad, por ejemplo como una de las prácticas para la asignatura de energía solar fotovoltaica. Las curvas de voltaje y corriente contra tiempo se obtienen de manera casi instantánea, por lo que no es necesario que la irradiancia solar deseada se mantenga constante por un espacio prolongado de tiempo. El proceso de estos datos para graficar la curva V-I es del orden de minutos,
- Las magnitudes de las corrientes de corto circuito y corrientes de máxima potencia medidas en los ocho módulos fotovoltaicos son prácticamente cercanos a los valores nominales; pero los voltajes a circuito abierto y los voltajes de máxima potencia resultaron inferiores al valor nominal. En promedio, la corriente de corto circuito se encontró en un 0.5% por encima del valor nominal y para el caso de la corriente de máxima potencia se encontró en un 3.1% por debajo; en cambio el voltaje a circuito abierto promedio se encontró en un 13.4% por debajo del valor nominal y el voltaje de máxima potencia se encontró por debajo también, en un 21.8%. La disminución en el voltaje producido se debe principalmente al efecto de la temperatura sobre los módulos fotovoltaicos.
- La potencia promedio para los módulos fotovoltaicos fue de 59.4 Wp, que equivale al 74.3% de la potencia óptima nominal (80 Wp). Esta potencia se debe principalmente a los efectos de la temperatura, ya que causan caídas de voltaje que disminuyen la potencia máxima que puede generar el módulo fotovoltaico. Esta potencia generada permite conocer cual es la potencia máxima que la carga a alimentar debe poseer.
- La eficiencia promedio de conversión de energía solar a energía eléctrica del módulo fotovoltaico fue de 9.1%, lo cual corresponde al 78.2% del valor de la eficiencia nominal (11.7%). La eficiencia de conversión bajo las condiciones de irradiancia solar y temperatura del sitio de trabajo, resultó inferior a las eficiencias típicas para módulos fotovoltaicos a base de Silicio policristalino que reporta

la literatura. Sin embargo, los módulos fotovoltaicos operan de manera correcta y ofrecen una potencia y eficiencia superior al 70% de su capacidad nominal.

- El aumento en la potencia que se adquiere al realizar las interconexiones en el arreglo fotovoltaico, no es exactamente lineal, ya que se tienen pérdidas debidas a la temperatura principalmente y también las debidas a la longitud y calibre de los conductores y a la generación no idéntica de energía eléctrica en los módulos fotovoltaicos. Sin embargo se puede tomar de manera lineal el aumento en la potencia, siempre y cuando se penalice con un factor de seguridad.
- Se tienen diferencias entre la teoría y la práctica y como se observa en la prueba de linealidad, en la conexión física de los módulos fotovoltaicos se tienen pérdidas debido a que no existe una generación eléctrica de las mismas proporciones en cada uno de los módulos fotovoltaicos. Estas diferencias entre la generación de energía eléctrica se deben a que no existen módulos 100% “idénticos” entre sí; aún el fabricante reporta un grado de tolerancia en las especificaciones.
- Se confirmó que la cantidad de electricidad generada por un módulo fotovoltaico está en función de la irradiancia solar que sobre el se aplique, de la temperatura que el módulo alcance al estar expuesto a los rayos del Sol, de la proporción del área que sea iluminada sobre su superficie (sombreados) y de la orientación del módulo mismo.
- Los valores nominales de los módulos fotovoltaicos, registrados a Condiciones Estándar de Prueba, proporcionan los valores óptimos del módulo; sin embargo, para un dimensionamiento se debe tener información a las condiciones reales del sitio de trabajo (condiciones naturales que afectan el desempeño ideal del equipo). Con el fin de evitar problemas por no conseguirse la cantidad de energía eléctrica esperada.
- Los datos registrados en conjunto con el acervo histórico de las variables ambientales, pueden emplearse para estimar el desempeño que tendría uno de los módulos fotovoltaicos en lugares con condiciones de irradiancia y temperatura diferentes, es decir, en un sitio cualquiera. Para ello será necesario tomar en cuenta algunos parámetros extras como lo son la humedad y la velocidad del viento. Por ejemplo, con una velocidad del viento constante y considerable, la convección natural ayudaría a disipar parte de la temperatura ganada por el módulo al estar expuesto a los rayos del Sol. Esto permitiría que las celdas en el interior del módulo fotovoltaico tuvieran una temperatura menor.
- La energía solar fotovoltaica como una fuente de energía renovable ayuda en la reducción de la emisión de contaminantes al medio ambiente y se optimiza cuando los procesos de manufactura de los productos de estas tecnología hayan sido también los correctos y debidos. Pese a que el recurso solar es intermitente, los módulos fotovoltaicos en conjunto con un sistema de respaldo bien dimensionado y un mantenimiento programado, generan energía eléctrica constante y tienen el extra de evitar contaminación por emisión de gases calientes, contaminación auditiva y eliminación del riesgo de una posible explosión por causa de combustibles inflamables.

5.2 Recomendaciones.

Contar con una estructura para montar de manera fija a los módulos fotovoltaicos y que permita un acceso rápido y cómodo a la caja de conexiones. Esto es con el fin de no dedicar tiempo al montaje diario de cada módulo fotovoltaico y consecuentemente, a las dificultades que se tienen al realizar las conexiones necesarias.

Desarrollar y adquirir la instrumentación necesaria para monitorear y registrar la producción de energía eléctrica que generen los módulos fotovoltaicos; con el fin de tener un acervo histórico de la producción de energía eléctrica diaria, mensual y anual, así como la evaluación del recurso solar disponible.

Realizar un mallado en la superficie posterior del módulo fotovoltaico y medir la temperatura en cada uno de los nodos de la malla con el fin de obtener una temperatura promedio, proporciona un valor más representativo de la temperatura que alcanza el módulo fotovoltaico al estar a la intemperie, comparado con aquel que por lo general, se obtiene de medir solamente en el centro de la parte posterior del módulo fotovoltaico.

Un factor que debe tenerse presente, es que al realizar una interconexión entre módulos fotovoltaicos se debe dimensionar apropiadamente los conductores eléctricos. Esto se debe a que el calentamiento del conductor por la exposición al Sol cambia la ampacidad permitida del conductor y una longitud inapropiada del conductor causa caídas de voltaje y disminución en la potencia eléctrica del módulo fotovoltaico.

Punto de vista personal.

Con la elaboración de este trabajo de titulación y la formación académica como profesional que en la Universidad de Quintana Roo he recibido, he podido observar lo siguiente:

La parte teórica de nuestra formación como estudiantes explica lo que sucede con un fenómeno de estudio, pero no siempre resulta fácil de comprender. Si la teoría siempre estuviera complementada con una parte práctica, en la cual se realizarán experimentos, sería más fácil de entender el fenómeno. Esto se debe a que existen situaciones que se presentan en la parte experimental que en la teoría no figuraban y no eran posibles de observar. Por ejemplo, las dificultades que se presentaron para realizar la parte experimental de la tesis sólo pude conocerlas al realizar las pruebas experimentales.

El desarrollo de tecnología propia así como la generación de nuestros propios conocimientos, no son sencillos y resulta cada vez más difícil con la constante compra de los mismos. En revistas y otros medios de comunicación se encuentran casos de que en otros Estados de nuestro República Mexicana y comúnmente en otros países, las universidades desarrollan su propia tecnología y conocimientos propios. En nuestra Universidad de Quintana Roo en la mayor parte de las ocasiones los materiales, herramientas y recursos que necesitamos para realizar proyectos, pruebas y experimentos no son suficientes o no se encuentran disponibles en la misma Universidad e inclusive en la propia ciudad. Sin embargo los estudiantes de la carrera Ingeniería en Sistemas de Energía con el apoyo y orientación de algunos de sus profesores, en la mayor parte de los casos han podido ingeniárselas para desarrollar y construir sus modelos para las asignaturas correspondientes con cuanto material disponible se puedan rodear. En mi caso y en particular con la parte experimental de este trabajo no conté con todas las herramientas que hubiera deseado o con la estructura de montaje para los ocho módulos fotovoltaicos que necesité y tampoco poseía un dispositivo para caracterizar un módulo fotovoltaico. Sin embargo con el apoyo de mi director de tesis, pude desarrollar instrumentación propia y conjuntamente con la orientación y sugerencias de mis revisores utilizarla debidamente para realizar y comprender las pruebas en la caracterización eléctrica del arreglo fotovoltaico.

Las aplicaciones de las energías renovables y en especial aquellas que se basen en el aprovechamiento de la energía solar, requieren estudio, cultura, paciencia y optimismo. Esto se debe a que al no tener información adecuada y existir una falta de cultura, buenos proyectos de energías renovables no pueden ser tan exitosos como uno deseara y causan una imagen inadecuada de las virtudes de estas tecnologías renovables.

Fuentes de Información

- [1] Acosta Olea Roberto. Celdas, módulos, arreglos y sistemas fotovoltaicos. Material de apoyo en el curso-taller: Aplicaciones de la energía renovable en el medio rural. Centro de Investigación en Energía. Celebrado en la Universidad de Quintana Roo. Chetumal, Quintana Roo del 23 al 25 de noviembre de 2005.
- [2] Acosta Olea Roberto. Notas del curso: Energía solar fotovoltaica. Universidad de Quintana Roo. Chetumal, Quintana Roo, enero de 2003.
- [3] Chan Puc Freddy. Notas del curso: Semiconductores. Universidad de Quintana Roo. Chetumal, Quintana Roo, mayo de 2003
- [4] Duffie John A., Beckman William A. Solar engineering of thermal processes. Second edition. Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons, Inc. 1991.
- [5] Efecto fotoeléctrico. Microsoft® Encarta® 2006 [DVD]. Microsoft Corporation, 2005.
- [6] Flores Lara Vicente. Notas del curso: Energía solar fototérmica. Universidad de Quintana Roo. Chetumal, Quintana Roo, diciembre de 2003.
- [7] http://sky.net.co/energia/FV_Capi1.PDF
- [8] Fabricación de celdas de silicio. Material de apoyo en el curso-taller: Aplicaciones de la energía renovable en el medio rural. Centro de Investigación en Energía. Celebrado en la Universidad de Quintana Roo. Chetumal, Quintana Roo del 23 al 25 de noviembre de 2005.
- [9] H. L. Madcomber et al. Photovoltaic stand-alone systems, DOE/NASA/01905-1 (1981) Washington.
- [10] <http://cipres.cec.uchile.cl/~lferrer/tallerii/colecfot.html>
- [11] <http://dei.uca.edu.sv/dei/html/proyectos/aulasc/histo-esolar.html>.
- [12] http://sky.net.co/energia/FV_Capi3.PDF
- [13] <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia11/HTML/articulo05.htm>
- [14] <http://www.re.sandia.gov/>
- [15] <http://www.solartronic.com/>
- [16] International Rectifier. IRFP250 and IRFP260N data sheet. www.irf.com.
- [17] L. Baylestal Robert y Nashelsky Louis. Fundamentos de electrónica. 4a edición, editorial Prentice Hall. Impreso en México, 1997.
- [18] Motorola inc. BD135 and BD136 data sheets. 1995.
- [19] Muhlia V. Agustín. Notas para el curso de solarimetría. Observatorio de Radiación Solar del Instituto de Geofísica, UNAM. En la XXVIII Semana Nacional de Energía Solar, celebrado en Oaxaca, Oaxaca del 4 al 8 de octubre de 2004.
- [20] National semiconductor. LM555 data sheet. February 2002. www.national.com.
- [21] National semiconductor. TL081 data sheet. December 1995. www.national.com.
- [22] Módulos fotovoltaicos policristalinos Total Energie TE-850, hoja de datos. www.total-energie.com.
- [23] Sánchez Juárez Aarón. Conceptos básicos de energía solar. Material de apoyo en el curso-taller: Aplicaciones de la energía renovable en el medio rural. Centro de Investigación en Energía. Celebrado en la Universidad de Quintana Roo. Chetumal, Quintana Roo del 23 al 25 de noviembre de 2005.

[24] Sánchez Juárez Aarón. Medición de radiación solar. Material de apoyo en el curso-taller: Aplicaciones de la energía renovable en el medio rural. Centro de Investigación en Energía. Celebrado en la Universidad de Quintana Roo. Chetumal, Quintana Roo del 23 al 25 de noviembre de 2005.

[25] Sánchez Juárez Aarón. Principios de la conversión y tecnologías fotovoltaicas. Material de apoyo en el curso-taller: Aplicaciones de la energía renovable en el medio rural. Centro de Investigación en Energía. Celebrado en la Universidad de Quintana Roo. Chetumal, Quintana Roo del 23 al 25 de noviembre de 2005.

[26] Sánchez Juárez Aarón. Tecnología fotovoltaica aplicada al bombeo de agua. Material de apoyo en el curso-taller: Aplicaciones de la energía renovable en el medio rural. Centro de Investigación en Energía. Celebrado en la Universidad de Quintana Roo. Chetumal, Quintana Roo del 23 al 25 de noviembre de 2005.

[27] Torres Reyes Ernestina. Notas del Curso: Secado Solar, XXVI Semana Nacional de Energía Solar, Chetumal Quintana Roo noviembre de 2004. ANES.