



UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE MORELOS

**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**

DEPENDENCIA DE LA FOTOCORRIENTE EN CELDAS DE LUZ CONCENTRADA, CON EL ESPECTRO SOLAR.

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRÍA EN SUSTENTABILIDAD ENERGETICA.**

**PRESENTA:
I.E.M. RODOLFO SANTOS SÁNCHEZ**

Director de tesis: **Dr. Diego Seuret Jiménez.**

Codirector de tesis: **Dr. José Antonio Marbán Salgado.**

SINODALES.

Dr. J Jesús Escobedo Alatorre.

Dr. Álvaro Zamudio Lara.

Dr. Miguel Ángel Basurto Pensado.

CUERNAVACA MOR.

JUNIO 2019



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS



INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

Jefatura de Posgrado en Sustentabilidad Energética



"2019, a 100 años del asesinato del General Emiliano Zapata Salazar"

Cuernavaca, Morelos, a 18 de febrero de 2019

DRA. ELSA CARMINA MENCHACA CAMPOS
DIRECTORA INTERINA DEL CIICAp
P R E S E N T E

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada "DEPENDENCIA DE LA FOTOCORRIENTE EN CELDAS DE LUZ CONCENTRADA, CON EL ESPECTRO SOLAR" que presenta el alumno RODOLFO SANTOS SANCHEZ, para obtener el título de **MAESTRÍA EN SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA**.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es:

NOMBRE	DICTAMEN	FIRMA
DR. ÁLVARO ZAMUDIO LARA	Aprobado	
DR. MIGUEL ÁNGEL BASURTO PENSADO	Aprobado	
DR. J JESÚS ESCOBEDO ALATORRE	Aprobado	
DR. JOSÉ ANTONIO MARBÁN SALGADO	Aprobado	
DR. DIEGO SEURET JIMÉNEZ	Aprobado	

PLAZO PARA LA REVISIÓN 20 DÍAS HÁBILES (A PARTIR DE LA FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO)

NOTA. POR CUESTION DE REGLAMENTACIÓN LE SOLICITAMOS NO EXCEDER EL PLAZO SEÑALADO, DE LO CONTRARIO LE AGRADECEMOS SU ATENCIÓN Y NUESTRA INVITACIÓN SERÁ CANCELADA.

DSJ*MLGE/nmc

Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México. 62209
Tel. (777) 329 70 00. Ext. 6212 / correo: merle.garcia@uaem.mx



Una universidad de excelencia

SECTORIA
2017-2023

Resumen.

El presente trabajo está basado en el modelo de caracterización de sistemas fotovoltaicos, desarrollado por los laboratorios SANDIA en el estado de California de los Estados Unidos de Norte América, el modelo involucra una función polinómica, la cual relaciona la variación del espectro solar con los cambios en la corriente de cortocircuito (I_{sc}). Dicha función es característica de la tecnología fotovoltaica empleada en el panel y del sitio donde esté ubicado el sistema fotovoltaico. La tarea fundamental de esta tesis es describir la influencia del espectro en la corriente de cortocircuito (I_{sc}) en celdas que utilizan luz concentrada, en las condiciones atmosféricas del Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas ubicado en la parte norte de la ciudad de Cuernavaca, Morelos. Para ello se realizó un pequeño panel solar con 6 celdas GaInP/GaAs/Ge, el cual se montó sobre un seguidor solar manual, junto con un piranómetro SP-02, para medir la irradiancia solar directa, las pruebas realizadas fueron sometidas al procedimiento descrito por la ASTM (American Society Testing Materials), y un análisis de regresión lineal para obtener los coeficientes del polinomio que describe la dependencia de la corriente de cortocircuito (I_{sc}) con respecto al espectro solar de la tecnología antes mencionada y el sitio de prueba.

Abstrac.

The present work is based on the model of photovoltaic systems characterization, developed by the SANDIA laboratories in the state of California of the United States of North America, the model involves a polynomial function that relates the variation of the solar spectrum with the changes in the short-circuit current (I_{sc}). This function is characteristic of the photovoltaic technology used in the panel and of the site where the photovoltaic system is located. The main task of this thesis is to describe the influence of the spectrum on the short-circuit current (I_{sc}) in cells using concentrated light, under atmospheric conditions of the Center for Research in Engineering and Applied Sciences located in the northern part of the city of Cuernavaca, Morelos. For this purpose a small solar panel with 6 GaInP/GaAs/Ge solar cells, which was mounted on a manual solar tracker, together with a SP-02 pyranometer was used to measure the direct solar irradiance, the tests performed were subjected to the procedure described by the ASTM (American Society Testing Materials), and a linear regression analysis to obtain the polynomial coefficients describing the dependence of the short-circuit current with respect the solar spectrum on the of the above-mentioned technology and the test site.

Agradecimientos.

Primeramente, a Dios, por darme a través de mis padres la VIDA.

A mi amada esposa Ángeles, por su amor y apoyo durante este tiempo en el que he dedicado al estudio, por sus consejos y regaños, porque todos esos momentos de alegrías y discusión han rendido frutos. A mi hijo Maximiliano, por ser la personita que alegra mis días y hace olvidar cualquier cansancio o enojo con sus travesuras. Los Amo.

Al Dr. Diego Seuret por permitirme formar parte de su equipo de trabajo, por sus consejos, regaños y aportaciones para que este trabajo fuera posible. Por la amistad y cariño demostrado durante este corto tiempo de convivencia.

Al Dr. José Antonio Marbán, Dr. Jesús Escobedo, Dr. Álvaro Zamudio y Dr. Miguel Ángel Basurto, por sus opiniones en los tutoriales, los cuales reforzaron los conocimientos básicos y aportaron ideas al proyecto.

A mi Padre y familiares, que a pesar de la distancia siempre estuvieron al pendiente de mí y de la familia que he formado, por sus sabios consejos mil gracias. Los quiero a todos.

A la Familia Quiroz Vega, que, a nuestra llegada a Morelos, nos cobijó y han tendido la mano. Por sus colaboraciones en la realización de algunas partes mecánicas del proyecto.

A Edgardo, Iván, Abisai, Aldo, Abraham y Fernando, por la amistad que se ha forjado entre nosotros, espero nunca dejemos de frecuentarnos.

Al CONACYT por la beca otorgada.

Al Ciicap por aceptar que realizará mis estudios de posgrado en dicho centro.

Nomenclatura.

Simbología.	Descripción.	Unidad
AM	Masa de aire.	
Ama	Masa de aire absoluta.	
C	Velocidad de la luz. $2.99792458 \cdot 10^8$	m/s
E	Irradiancia medida por el piranómetro	W/m ²
Ee	Irradiancia eficaz.	W/m ²
Eg	Ancho de banda prohibida de un material	eV
E _o	Irradiancia de referencia de la celda.	1 kW/m ²
FF	Fill factor.	
GalnP/GaAs/Ge	Materiales de la celda solar de triple juntura utilizada en este estudio.	
G _{sc}	Constante solar. 1367	W/m ²
h	Constante de Planck. $6.6260755 \cdot 10^{-34}$	J·s
I _{D1}	Corriente del primer diodo.	A
I _{D2}	Corriente del segundo diodo.	A
I _L	Corriente total del sistema.	A
I _{mp}	Corriente en el punto de máxima potencia	A
I _{ph}	Fotocorriente generada de la celda.	A
I _{sc}	Corriente de cortocircuito.	A
I _{sh}	Corriente en la resistencia shunt.	A
k	Constante de Boltzmann. 1.3806610^{-23}	J / K
η	Eficiencia de la celda o panel solar.	
n ₁ , n ₂	Factor de idealidad de difusión y recombinación del diodo respectivamente.	
N _p	Numero de celdas en paralelo.	
N _s	Numero de celdas en serie.	
P _{mp}	Potencia en el punto de máxima potencia	W
q	Carga del electrón. 1.6021810^{-19}	coulomb
R _s	Resistencia en serie.	Ω
R _{sh}	Resistencia de shunt o paralelo.	Ω
SF	Factor de suciedad.	
Si	Silicio.	
T	Temperatura.	kelvin
T ₀	Temperatura de referencia de la celda.	25°C
T _c	Temperatura de la celda al interior del módulo.	°C
V _L	Voltaje en la terminal.	V
V _{mp}	Voltaje en el punto de máxima potencia.	V
V _{oc}	Voltaje a circuito abierto.	V
Z, Z _s	Angulo zenit.	°
λ	Longitud de onda.	nm

Índice.

Resumen.....	III
Abstrac.....	IV
Agradecimientos.....	V
Nomenclatura.....	VI
Índice.....	VII
Índice de Figuras.....	IX
Índice de tablas.....	XI
Capítulo 1.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Objetivo General.....	2
1.3 Objetivos Específicos.....	2
1.4 Justificación.....	3
Capítulo 2.....	4
MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 Radiación Solar.....	4
2.2 Espectro solar.....	9
2.3 Constante solar.....	10
2.4 Masa de Aire.....	10
2.4.1 Masa Absoluta de Aire.....	11
2.5 Celda solar.....	12
2.6 Tipos de celdas solares en el mercado.....	13
2.6.1 Tecnologías del silicio.....	13
2.6.2 Celdas de película delgada.....	13
2.6.3 Celdas del grupo III-V.....	14
2.7 Parámetros de una celda o modulo fotovoltaico.....	16
2.7.1 Corriente de cortocircuito.....	16
2.7.2 Voltaje a Circuito Abierto.....	17

2.7.3 Punto de Máxima Potencia.....	17
2.7.4 Fill Factor.	18
2.7.5 Eficiencia de un módulo fotovoltaico.....	19
2.8 Modelos Matemáticos de una celda o panel fotovoltaico.	19
2.8.1. Modelo de un diodo.	20
2.8.2 Modelo de dos diodos.	21
2.9 Modelo emperico desarrollado por laboratorios sandia.	23
2.9.1 Ecuaciones del modelo.	23
2.9.2 Parámetros relacionados con la fuente “el sol”.....	29
Capítulo 3.....	33
METODOLOGIA EXPERIMENTAL.	33
3.1 Preparación de las condiciones necesarias.....	33
3.2 Arreglo experimental para la toma de espectros.	34
3.3 Obtención del polinomio empírico $f_1(AM_a)$	35
3.3.1 Medición de la irradiancia solar.	37
3.3.2 Midiendo corriente de cortocircuito.....	38
3.4 Procesamiento de la información.	39
Capítulo 4.....	40
ANÁLISIS DE RESULTADOS.	40
4.1 Espectros solares obtenidos en el Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas.	40
4.2 Corriente de cortocircuito e irradiancia solar directa.	44
4.3 Polinomio empírico de la función de masa de aire absoluta $f_1(AM_a)$. 45	
4.4 Cálculo de la corriente de cortocircuito mediante el polinomio empírico $f_1(AM_a)$	48
Capítulo 5.....	49
CONCLUSIONES.....	49
5.1 Conclusiones.....	49

Índice de Figuras.

Figura 2.1 Componentes de la radiación terrestre.	6
Figura 2.2 Mapa de la radiación solar global terrestre en el mundo.	8
Figura 2.3 Irradiación solar en la República Mexicana.	8
Figura 2.4 Rango del espectro solar visible.	9
Figura 2.5 Ángulo Zenit y Valores de AM.	11
Figura 2.6 Estructura de una celda solar convencional.	13
Figura 2.7 Esquema de una Celda solar de 3 uniones y la forma en que se distribuye el espectro solar.	14
Figura 2.8 Eficiencia cuántica de una celda solar multiunión.	15
Figura 2.9 Característica I-V que muestra el punto de la corriente de cortocircuito.	16
Figura 2.10 Característica I-V que muestra el punto donde se encuentra el voltaje a circuito abierto.	17
Figura 2.11 Punto de Máxima Potencia, Voltaje y Corriente de Máxima Potencia.	18
Figura 2.12 Fill Factor o Factor de Forma o llenado (FF).	18
Figura 2.13 Circuito equivalente del modelo de un solo diodo.	20
Figura 2.14 Circuito equivalente del modelo de dos diodos.	21
Figura 2.15 Curva I-V de un módulo fotovoltaico que muestra los 5 puntos de la curva que caracterizan al modelo de rendimiento Sandia.	26
Figura 2.16 Datos experimentales de un módulo de silicio, donde se relaciona el Voc y Vmp con la irradiancia efectiva.	26
Figura 2.17 Datos experimentales de un módulo de silicio, donde se relaciona Isc y Imp con la irradiancia efectiva.	27
Figura 2.18 Medición de irradiancia espectral solar en un día claro en Davis, CA, en diferentes condiciones de masa de aire durante el día. La respuesta espectral normalizada de una célula solar de silicio típica se superpone para comparación.	30
Figura 2.19 Relación empírica típica que ilustra la influencia de la variación espectral solar en la corriente de cortocircuito del módulo, con relación a la condición de referencia $AM_a = 1,5$	30
Figura 2.20 Relación empírica típica que ilustra la influencia del ángulo de incidencia solar en la reducción de la corriente de cortocircuito de un módulo.	31
Figura 3.1 Equipo Experimental.	33
Figura 3.2 Esquema experimental para la toma de espectros.	34
Figura 3.3 Piranómetro LP02.	37

Figura 3.4 Multímetro Digital.	38
Figura 3.5 Panel Solar.	38
Figura 3.6 Software Profesional para el procesamiento de los datos.	39
Figura 4.1 Espectro solar incidente en el Centro de Investigación en Ingeniería y ciencias Aplicadas, a diferentes valores de Masa de aire absoluta en el mes de septiembre.	40
Figura 4.2 Espectro solar incidente en el Centro de Investigación en Ingeniería y ciencias Aplicadas, a diferentes valores de Masa de aire absoluta en el mes de marzo.	41
Figura 4.3 Espectro solar incidente en el Centro de Investigación en Ingeniería y ciencias Aplicadas, a diferentes valores de Masa de aire absoluta en el mes de marzo.	42
Figura 4.4 Espectro solar incidente en el Centro de Investigación en Ingeniería y ciencias Aplicadas, a igual Masa de aire absoluta de dos días del mes de marzo.	43
Figura 4.5 Mediciones de corriente de cortocircuito e Irradiancia.	44
Figura 4.6 Comportamiento de la respuesta relativa $f_1(AMa)$, bajo diferentes condiciones meteorológicas.	45
Figura 4.7 Relación empírica del espectro solar con la corriente de cortocircuito en Ciicap con cielo despejado.	46
Figura 4.8 Obtención de los coeficientes del polinomio empírico de la función de masa de aire absoluta.	47

Índice de tablas.

Tabla 4.1 Valor de los coeficientes del polinomio empírico.	47
Tabla 4.2 Estimación de Corriente de cortocircuito.	48

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN.

1.1 Introducción.

Dentro del marco de las energías renovables, la energía solar fotovoltaica es considerada como una de las prometedoras para la industria de la producción de energía eléctrica, el fácil acceso al combustible principal (sol), hace de esta fuente que las distintas organizaciones y gobiernos nacionales e internacionales, muestren el interés por la explotación de la tecnología fotovoltaica.

El interés por la energía solar fotovoltaica ha llevado a los investigadores en este campo, a poner énfasis en el desarrollo de nuevas celdas solares, en el cual se busca llegar a mejores eficiencias, la cual nos permita convertir en energía eléctrica la mayor parte de la energía irradiado por el sol.

En busca porque todas estas celdas sean efectivas y de provecho en el mercado, se han desarrollados diferentes métodos para caracterizar las celdas solares o módulos fotovoltaicos. Por lo general las celdas o módulos fotovoltaicos son fabricados con valores de referencias establecidos en laboratorio, por lo que los parámetros; voltaje a circuito abierto (V_{oc}), corriente de cortocircuito (I_{sc}), voltaje de máxima potencia (V_{mp}), corriente de máxima potencia (I_{mp}), Fill Factor (FF), eficiencia (η), difieren en el momento en que operan bajo condiciones normales de campo, esto se debe a que las condiciones de laboratorio suelen ser diferentes a las condiciones de campo. En el afán de encontrar las verdaderas condiciones de operación de los sistemas fotovoltaicos, hemos puesto en práctica un método desarrollado por los laboratorios SANDIA en California, USA., aplicado a tecnología de silicio (Si). Para nuestro caso en particular la tecnología aplicada al método serán celdas multiunión GaInP/GaAs/Ge, las cuales utilizan luz concentrada.

1.2 Objetivo General.

Estudiar las características del espectro solar y su influencia en las celdas fotovoltaicas de luz concentrada, en la latitud de la zona norte de Cuernavaca, Morelos.

1.3 Objetivos Específicos.

- Estudiar la dependencia de la Fotocorriente en celdas fotovoltaicas de luz concentrada, con el espectro solar.
- Estudiar la irradiancia solar en el centro de investigación en ingeniería y ciencias aplicadas.
- Obtener los coeficientes del polinomio que relacionan la corriente de cortocircuito con el espectro solar.

1.4 Justificación.

La caracterización de celdas solares fotovoltaicas o de sistemas fotovoltaico juega un papel importante en la industria fotovoltaica. Los módulos fotovoltaicos de fábrica vienen caracterizados bajo condiciones de laboratorio, estas son pruebas hechas bajo condiciones establecidas de irradiancia bajo un espectro solar estándar AM 1.5 y temperatura de 25 °C.

Dado que, en el caso de operación en campo, no se cumplen las condiciones de laboratorio, los sistemas fotovoltaicos tienden a tener pérdidas en la producción de energía respecto a lo predicho en el diseño de la instalación fotovoltaica, esto sugiere la necesidad de la implementación de modelos de caracterización de campos solares, que nos permita realizar una estimación de la cantidad de energía que se producirá en determinado instante.

Uno de estos modelos está desarrollado por los laboratorios SANDIA, ubicado en el estado de California, Estados Unidos. En el modelo implementado por laboratorios SANDIA, aplican un método como parte del modelo que relaciona a la corriente de cortocircuito con la variación del espectro solar, el cual predice una pérdida del 3% por desajuste espectral, este método se pretende reproducir en el Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, aplicado a una tecnología de celdas solares del grupo III-V (GaInP/GaAs/Ge.), capaces de utilizar luz concentrada, con el fin de determinar la influencia del espectro solar en la corriente de cortocircuito de un dispositivo fotovoltaico de 6 celdas.

Capítulo 2

MARCO TEÓRICO.

En el presente capítulo se recopila toda la base teórica del proyecto, se plasma lo esencial de la fuente generadora de energía en sistemas fotovoltaicos, los tipos de celdas solares que actualmente predominan el mercado, los principales parámetros de las celdas solares fotovoltaicas y los modelos matemáticos que se han estudiado a lo largo de los años, para hacer eficientes, optimizar y dimensionar los parámetros eléctricos de instalaciones fotovoltaicas.

2.1 Radiación Solar.

El sol es una fuente altamente energizante que nos proporciona la energía que los seres vivos necesitamos para subsistir, dos de las principales funciones del sol son proporcionarnos calor y luz. Sin embargo, no solo esos beneficios obtenemos del sol, gracias a la ciencia y tecnología se logró observar que la energía proveniente del sol podría ser utilizada para producción de energía eléctrica.

La radiación solar la podemos definir como el flujo de energía que recibimos del Sol en forma de ondas electromagnéticas, que permite la transferencia de energía solar a la superficie terrestre. La radiación solar puede ser analizada atendiendo a su naturaleza ondulatoria o corpuscular. De acuerdo con el primer aspecto, la radiación solar se comporta, como una onda electromagnética en el espacio libre, caracterizada por su longitud de onda (λ) y su velocidad de propagación en el espacio, $c = 2.99792458 \cdot 10^8$ m/s (SEARS, ZEMANSKY, YOUNG, & FEEDMAN, 1996).

Estudiada la radiación desde el punto de vista corpuscular, ésta puede ser considerada como un conjunto de fotones dotados de diferente energía según sea la longitud de onda de la radiación, que se relaciona con la energía de los fotones atendiendo a la Ecuación de Planck (SEARS, ZEMANSKY, YOUNG, & FEEDMAN, 1996).

$$e = h \frac{c}{\lambda} \dots \dots \dots 1.1$$

Donde h es la constante de Planck ($6.6260755 \cdot 10^{-34}$ J·s), “λ” es la longitud de onda expresada en metros y “c” la velocidad de la luz en m/s. Según esta ecuación, la energía asociada a los fotones es inversamente proporcional a su longitud de onda.

Estas ondas electromagnéticas son de diferentes longitudes de onda y aproximadamente la mitad de las que recibimos están en el rango de 400 nm y 700 nm, y pueden ser detectadas por el ojo humano, constituyendo lo que conocemos como luz visible. De la otra mitad, la mayoría se sitúa en la parte infrarroja del espectro y una pequeña parte en la ultravioleta.

Es preciso recalcar que no toda la energía procedente del sol llega a la superficie terrestre, dependerá de las sustancias presentes en la atmósfera, ya que pueden ocurrir procesos de dispersión, absorción y reflexión de radiación solar. La figura 2.1 nos muestra las componentes de la radiación terrestre.

Por estas causas la radiación solar que llega a la superficie de la tierra se puede dividir en:

- **Radiación solar directa:** es la radiación recibida del sol que no ha sido absorbida ni dispersada. La radiación solar fuera de la atmósfera la

podemos considerar en su totalidad directa, ya que no hay presencia de cuerpos o fenómenos que modifiquen su trayectoria. Sin embargo, cuando los rayos del sol atraviesan la atmosfera una parte de ellos son adsorbidos o dispersados por moléculas de agua, gases, polvo, etc., y el resto logra tocar la superficie terrestre en forma directa.

- **Radiación solar difusa:** se le denomina radiación difusa a la porción de la radiación recibida en la superficie terrestre que su dirección ha sido modificado por la dispersión en la atmósfera.
- **Radiación solar global:** la radiación global la podemos definir como la suma de la radiación solar directa y la radiación solar difusa.

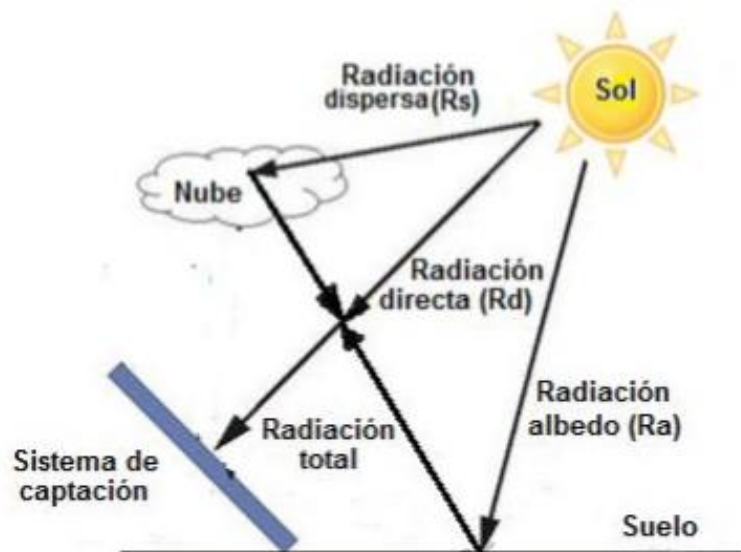


Figura 2.1 Componentes de la radiación terrestre.

Las porciones de radiación directa y difusa recibida por una superficie dependen de:

- Las condiciones meteorológicas: en un día nublado la radiación es prácticamente difusa en su totalidad; en un día despejado con clima seco predomina la componente directa y podría ser hasta el 90 % de la radiación total (Maza, 2010).
- La inclinación de la superficie respecto al plano horizontal: una superficie horizontal recibe la radiación difusa máxima si no hay alrededor objetos a una altura superior a la de la superficie (Maza, 2010).
- La presencia de superficies reflectantes: debido a que las superficies claras son las más reflectantes; la radiación del albedo aumenta en invierno por el efecto de la nieve (para lugares donde existen nevadas) y disminuye en verano por la presencia del efecto de absorción de la hierba o del terreno (Maza, 2010).

Otros conceptos importantes dentro de la radiación solar son:

- **Irradiancia:** Podemos definirla como la potencia que se capta en un área. Su unidad de medida es el W/m^2 .
- **Irradiación:** Se define como la energía por unidad de área durante un determinado tiempo. Su unidad de medida es el Wh/m^2 .

El aprovechamiento de la energía del sol está condicionado por la intensidad de radiación que se recibe en la tierra. La radiación varía según la latitud del lugar, el momento del día, las condiciones atmosféricas y climatológicas. La figura 2.2 muestra un mapa de la radiación solar global terrestre, y podemos observar una franja solar en la que México se encuentra beneficiado por la cantidad de radiación solar que recibe, eso hace de este país candidato a la explotación de este recurso solar.

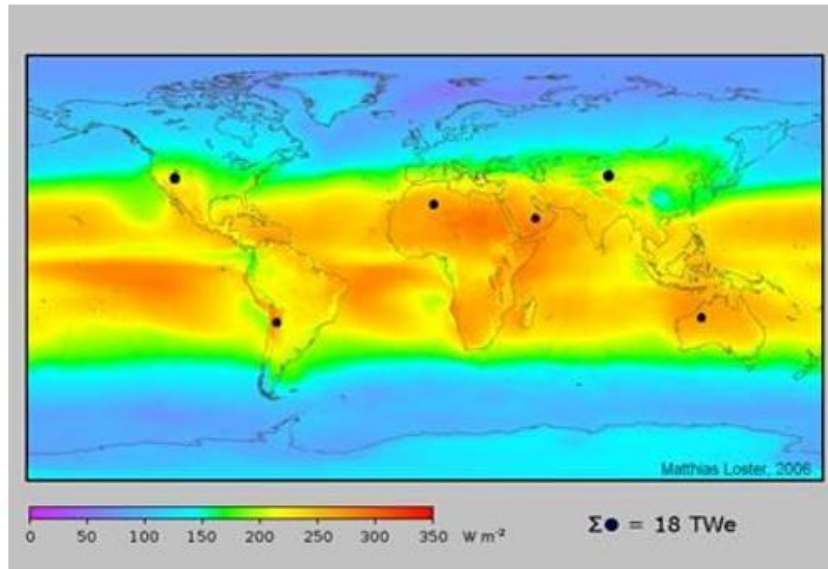


Figura 2.2 Mapa de la radiación solar global terrestre en el mundo.

La figura 2.3 muestra la irradiación solar recibida en el territorio de la República Mexicana, siendo territorio altamente apto para el aprovechamiento del recurso solar debido a que se recibe una irradiación media anual aproximadamente de 5.5 kW-h/m², principalmente en los estados del norte del país.



Figura 2.3 Irradiación solar en la República Mexicana.

2.2 Espectro solar.

El espectro solar lo podemos definir como la forma que toman las ondas electromagnéticas del sol, cuando estas son ordenadas según su frecuencia o longitud de onda, este fenómeno lo podemos observar cuando hacemos pasar por un espectrómetro la luz incidente del sol. Las ondas electromagnéticas cubren un espectro extremadamente amplio de longitudes de onda y frecuencia. Este espectro electromagnético incluye las ondas de radio y televisión, la luz visible, la radiación infrarroja y ultravioleta, los rayos x y los rayos gamma. Nosotros sólo podemos detectar directamente una parte muy pequeña del espectro con nuestro sentido de la vista, y a ese intervalo lo denominamos luz visible. Su intervalo de longitud de onda se encuentra de los 400 a 700 nm, con frecuencias correspondientes de 750 a 430 THz aproximadamente. Las distintas partes del espectro visible evocan en los humanos las sensaciones de los diferentes colores (SEARS, ZEMANSKY, YOUNG, & FEEDMAN). La figura 2.4 nos muestra la parte de la luz visible del espectro solar.

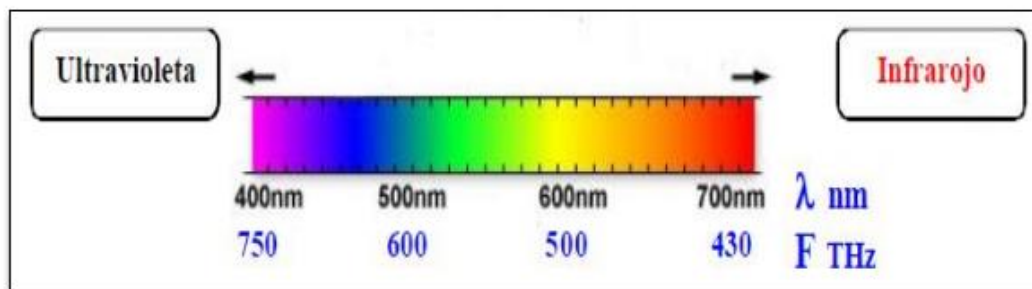


Figura 2.4 Rango del espectro solar visible.

Dentro de la tecnología solar fotovoltaica, el espectro solar se relaciona al termino “masa de aire”, puesto que es importante definir el espectro de radiación de la fuente luminosa que se utiliza para evaluar la celda fotovoltaica (Gasquet, 2004).

2.3 Constante solar.

La constante solar (G_{sc}), es la energía proveniente del Sol, por unidad de tiempo, recibida en un área de superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación, a una unidad astronómica fuera de la atmósfera. El Centro de Radiación Mundial o WRC (por sus siglas en inglés de World Radiation Center), ha adoptado el valor de 1367 W/m^2 para la constante solar, con una incertidumbre del orden de 1% (M, 1983). Normalmente este es uno de los parámetros dentro de la energía fotovoltaica que es considerado para caracterizar celdas o paneles fotovoltaicos.

2.4 Masa de Aire.

El termino masa de aire se refiere a la longitud en la trayectoria relativa de los rayos del sol, a partir de que atraviesan la atmosfera hasta su llegada al suelo. Se obtiene un valor de AM 1 cuando el sol esta justo encima del observador, este valor equivale a un ángulo zenit de 90° , cuando el ángulo zenit es de 60° tenemos un AM 2, y el valor de referencia en los paneles fotovoltaicos es AM 1.5 cuando el ángulo zenit es 48.2° , a nivel del mar. Entonces según la posición del sol en un día u hora determinada podemos determinar el valor de la masa de aire.

$$AM = \frac{1}{\cos Z} \dots \dots \dots 2.1$$

Donde Z es al ángulo zenit.

Ángulo zenit es el ángulo que se forma entre la proyección de la elevación del sol y la vertical del observador. La figura 2.5 muestra el ángulo zenit y algunos valores de AM.

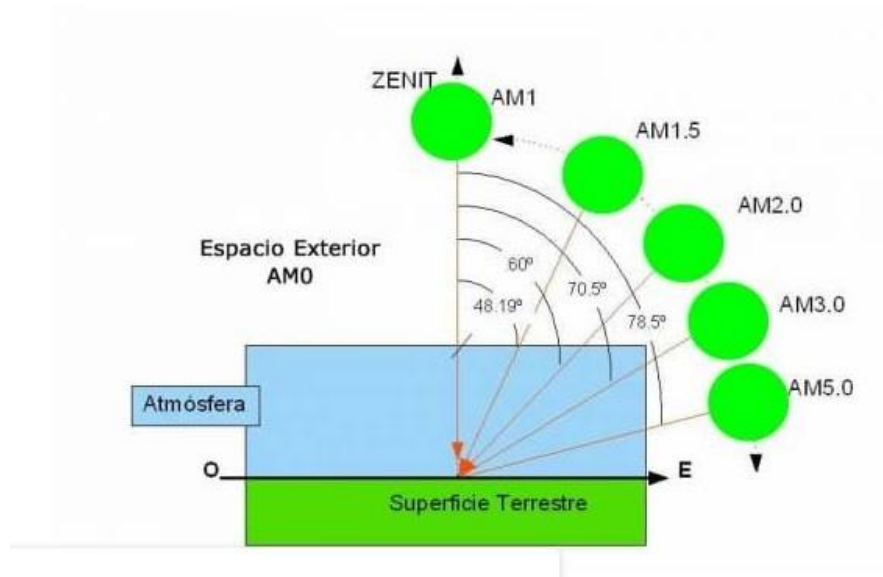


Figura 2.5 Ángulo Zenit y Valores de AM.

Para ángulos mayores a 70°, el efecto de la curvatura de la Tierra se vuelve significativo y debe tomarse en cuenta. Por tanto, el cálculo de la masa de aire (AM) en función del ángulo zenit la expresa la ecuación (2.2) (Krenzinger, 1993) (Young, 1989).

$$AM = (\cos(Zs) + 0.5057 (96.080 - Zs)^{-1.634})^{-1} \dots \dots \dots 2.2$$

Donde Zs corresponde al ángulo Zenit.

2.4.1 Masa Absoluta de Aire.

La masa de aire (AM) aplica para lugares a nivel del mar, cuando tenemos lugares donde la altitud es diferente a la del nivel del mar, se usa el termino masa de aire absoluta (AMa) y resulta de la multiplicación de la masa de aire

(AM) por el cociente de la presión atmosférica del sitio entre la presión atmosférica a nivel del mar (King, 1996).

$$AMa = AM \left(\frac{P}{P_o} \right) \dots \dots \dots 2.3$$

Donde:

P= presión atmosférica del sitio.

P_o= presión atmosférica a nivel del mar.

Podemos aproximar el cociente de las presiones mediante la siguiente ecuación (Krenzinger, 1993).

$$\frac{P}{P_o} \approx e^{(-0.0001184 h)} \dots \dots \dots 2.4$$

Donde:

h= altura del sitio en metros.

2.5 Celda solar.

Una celda solar es un dispositivo formado por uno o más semiconductores capaces de transformar la energía irradiada por el sol en energía eléctrica, esto debido al fenómeno llamado efecto fotovoltaico. Al incidir los rayos del sol en un semiconductor, algunos de los electrones de la banda de valencia absorben energía de los fotones y pasan a la banda de conducción donde pueden ser llevados fácilmente a un circuito externo generando por tanto una corriente eléctrica. En la práctica casi todas las conversiones de energía se llevan a cabo en uniones p-n, de materiales semiconductores. La figura 2.6 nos muestra la estructura de una celda solar convencional.

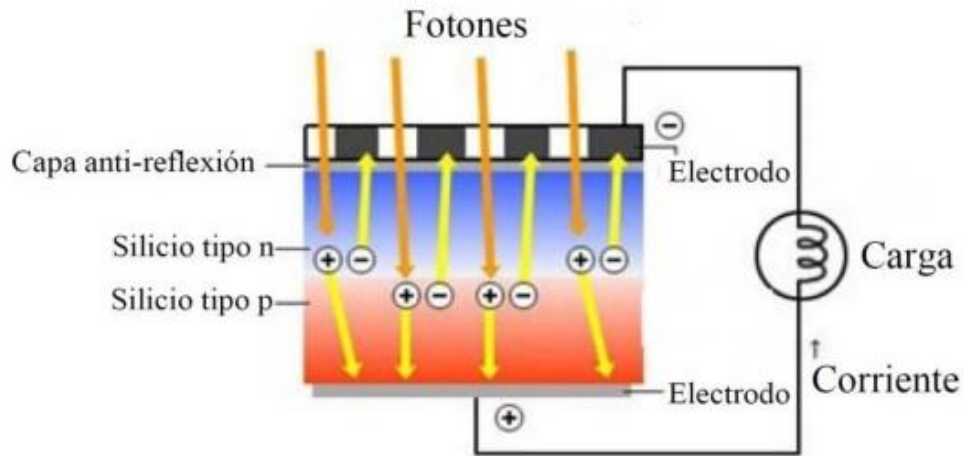


Figura 2.6 Estructura de una celda solar convencional.

2.6 Tipos de celdas solares en el mercado.

2.6.1 Tecnologías del silicio.

Sin duda alguna las celdas solares más comerciales son las de silicio, en la cual estas se pueden clasificar en 3 tecnologías; silicio monocristalino, silicio policristalino y silicio amorfo, siendo la primera la que mejores eficiencias de operación ha reportado, estos valores se encuentran entre el 14% a 20% (Vlatkovi, 2004).

2.6.2 Celdas de película delgada.

Dentro de las celdas de película delgada, tenemos la tecnología de las llamadas celdas de segunda generación reportando eficiencias entre 16.6 % y 19.2 % (Oyola & Gordillo G, julio-diciembre, 2007), con las cuales se utilizan materiales abundantes en la corteza terrestre tales como; Indio, Telurio, Selenio, Zinc, Cadmio, Cobre, Azufre y Estaño. Esta generación de celdas

donde se combinan los diferentes elementos antes mencionados tiene la ventaja de ser de bajo costo, pero por la utilización de Cadmio, el cual se considera un elemento altamente toxico, se han visto afectadas en su producción en masa.

2.6.3 Celdas del grupo III-V.

Estas celdas aún no son tan comerciales, sin embargo, según estudios realizados a diferentes tecnologías, las celdas solares constituidas por materiales semiconductores III-V poseen alta eficiencia y resistencia al daño por radiación, y por ello son particularmente aptas para aplicaciones espaciales y terrestres (M.A. Stan, 2000) (N.S. Fatemi, 2001). Ejemplo de este tipo de dispositivos son las celdas solares multiunión, las que están formadas por dos o más celdas de materiales con distinto band gap (E_g), interconectados en serie de manera que se aproveche de una forma mas eficiente la energía del espectro solar incidente (Fernandez, 2012). La figura 2.7 muestra el esquema de una forma simple de una celda de tres uniones y la forma en la que el espectro solar se distribuye para cada una de estas uniones.

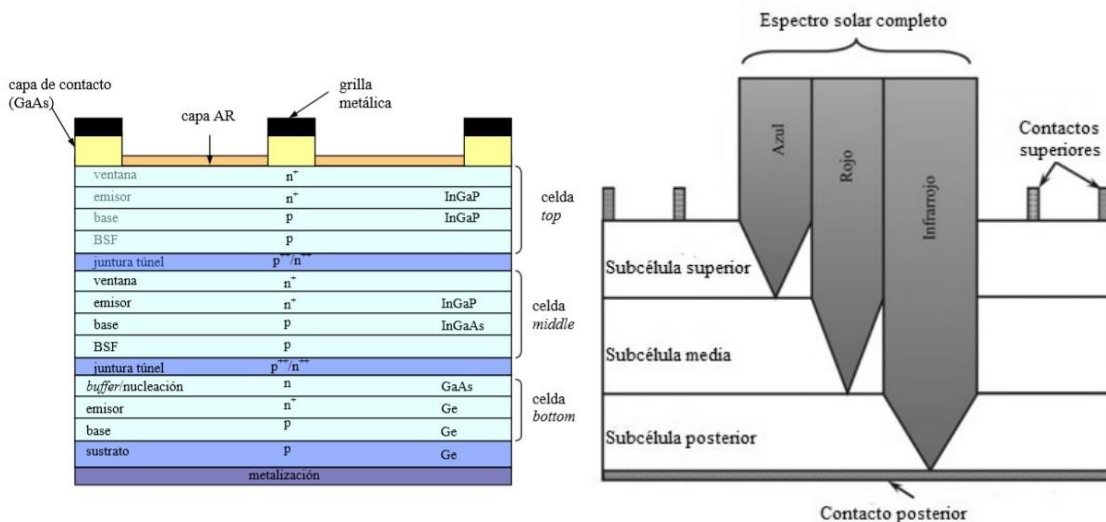


Figura 2.7 Esquema de una Celda solar de 3 uniones y la forma en que se distribuye el espectro solar.

Una ventaja que ofrece este tipo de celdas pertenecientes al grupo III-V de la tabla periódica es su alta eficiencia de conversión de la energía luminosa del sol. Eficiencias reportadas entre 34.5% y 43.5% (Oyola & Gordillo G, julio-diciembre, 2007). Estas celdas multiunión están implementadas en varias capas de materiales diferentes, esto permite que la celda logre captar la mayor parte del espectro solar incidente. Cada capa de material en la celda es sensible a un rango muy específico del espectro solar. Esto produce que la celda en su totalidad sea sensible prácticamente a todo el rango de la luz solar, y no a un rango específico y limitado de longitudes de onda, tal y como sucede con las celdas convencionales de silicio. La figura 2.8 muestra la respuesta espectral de una celda multiunión. Otra ventaja que hace de estas celdas buenas convertoras de energía viene dada a que se puede utilizar un sistema de alta concentración de luz solar proporcionando así una mejor eficiencia en el sistema fotovoltaico. Por otra parte, el proceso de fabricación de estas celdas tiene un costo por encima del de una celda de silicio (Si). Sin embargo, el tamaño de la celda requerida disminuye al aumentar la relación en la concentración solar, esto propicia que el coste de la tecnología de concentración se reduzca (Kensuke Nishiokaa, 2006).

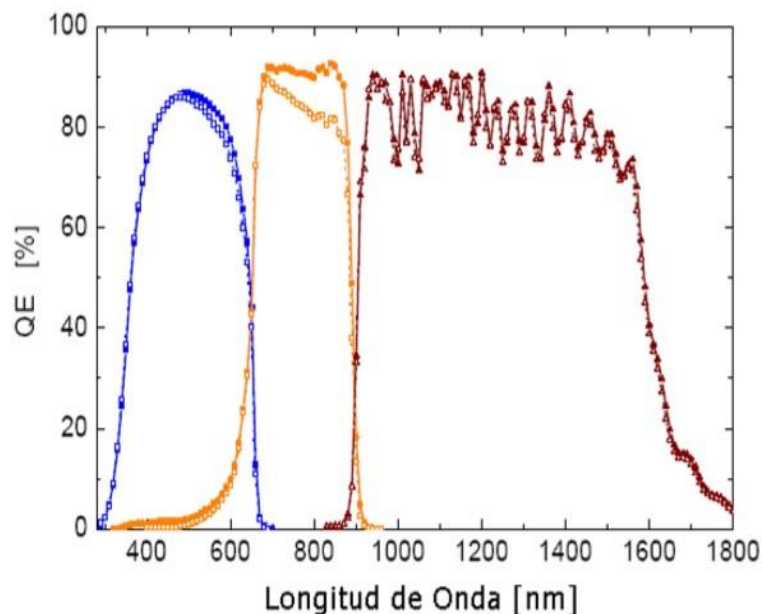


Figura 2.8 Eficiencia cuántica de una celda solar multiunión.

2.7 Parámetros de una celda o modulo fotovoltaico.

Las celdas solares fotovoltaicas tienen una serie de parámetros que las caracterizan, cuando estas celdas son conectadas en serio o paralelo forman un módulo fotovoltaico. Estos parámetros nos proporcionan la información necesaria para estimar la producción de energía a grosso modo, puesto que los valores reportados son en condiciones de laboratorio. A continuación, se describen los principales parámetros de un módulo fotovoltaico proporcionados por fabricantes.

2.7.1 Corriente de cortocircuito.

La corriente de cortocircuito es la corriente máxima del módulo fotovoltaico, cuando el voltaje a través de él es cero. Usualmente se escribe como I_{SC} . La figura 2.9 muestra una curva característica corriente-voltaje y señala el punto donde se identifica en la gráfica la corriente de cortocircuito.

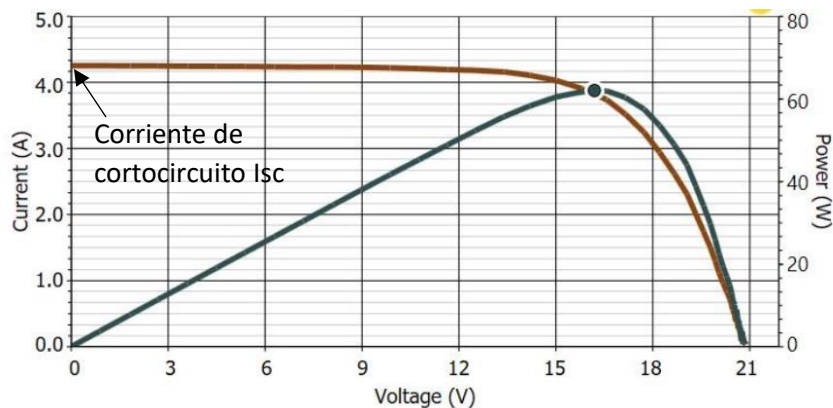


Figura 2.9 Característica I-V que muestra el punto de la corriente de cortocircuito.

Es preciso recalcar que el valor de la corriente de cortocircuito depende de las propiedades de la tecnología empleada en el módulo, de la radiación incidente

sobre el panel, del espectro incidente normalmente AM 1.5, el cual es un parámetro estandarizado de pruebas de laboratorio.

2.7.2 Voltaje a Circuito Abierto.

El voltaje a circuito abierto es el valor máximo que puede alcanzar el panel fotovoltaico cuando la corriente es nula, normalmente se denota de la siguiente forma V_{oc} . La figura 2.10 muestra una curva característica corriente-voltaje e indica el punto donde podemos localizar el voltaje a circuito abierto

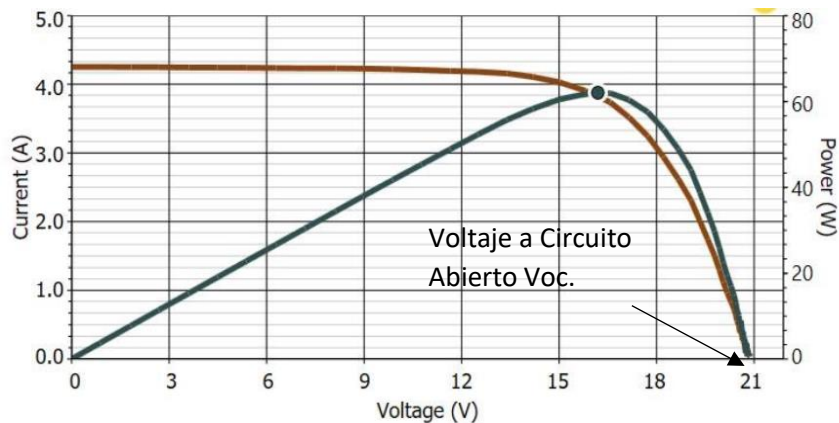


Figura 2.10 Característica I-V que muestra el punto donde se encuentra el voltaje a circuito abierto.

2.7.3 Punto de Máxima Potencia.

La potencia en la que opera un panel fotovoltaico está dada en Watts y se calcula a lo largo de la curva I-V (corriente-voltaje) mediante la ecuación $P = VI$, al punto donde la potencia es máxima se denomina punto de máxima potencia, y a los valores de corriente y voltaje para dicho punto Voltaje de máxima potencia (V_{mp}) y corriente de máxima potencia (I_{mp}). Dichos puntos se muestran en la Figura 2.11.

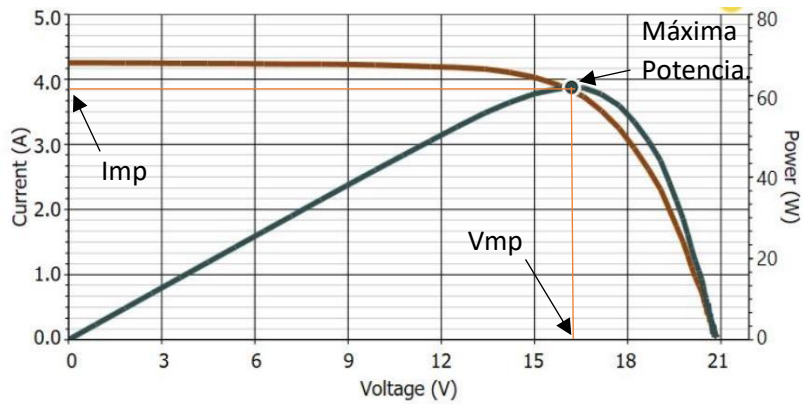


Figura 2.11 Punto de Máxima Potencia, Voltaje y Corriente de Máxima Potencia.

2.7.4 Fill Factor.

El Fill Factor o Factor de Forma en español se define como el cociente de la máxima potencia del panel entre el producto del voltaje a circuito abierto (V_{oc}) y la corriente de cortocircuito (I_{sc}). Gráficamente se puede interpretar como el rectángulo más grande que se ajusta a la curva I-V.

$$FF = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \dots \dots \dots 2.5$$

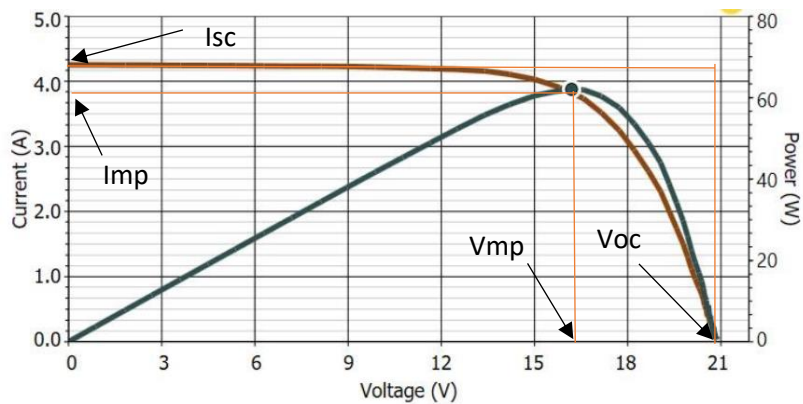


Figura 2.12 Fill Factor o Factor de Forma o llenado (FF).

2.7.5 Eficiencia de un módulo fotovoltaico.

La eficiencia se define como el porcentaje de la energía fotovoltaica generada, con relación a la energía que incide sobre el panel o celda fotovoltaica. Este parámetro es el más usado para comparar rendimientos entre tecnologías de construcción de paneles solares. Y puede ser estimada a partir de la siguiente ecuación.

$$P_{max} = V_{oc} I_{sc} FF \dots \dots 2.6$$

$$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{in}} \dots \dots 2.7$$

Donde:

V_{oc} voltaje a circuito abierto;

I_{sc} corriente en corto circuito;

FF factor de llenado, y

η eficiencia.

2.8 Modelos Matemáticos de una celda o panel fotovoltaico.

Normalmente el modelo matemático de una celda o panel fotovoltaico tiene que ver con sus parámetros eléctricos, entendidos desde el punto de vista de la física del semiconductor por el cual están compuestos. Es esencial tener un modelo matemático que represente con precisión las características eléctricas de la celda solar. En la práctica, existen dos circuitos equivalentes principales

que son utilizados para describir la relación no lineal de la curva I-V: modelo de un solo diodo y modelo de dos diodos (Avendaño, 2016).

2.8.1. Modelo de un diodo.

Aunque las corrientes de difusión y recombinación son linealmente independientes, ambas corrientes frecuentemente se consideran bajo la introducción de un factor de idealidad “*n*” de un diodo no-físico.

Este concepto se conoce también como el modelo de un solo diodo. Recientemente, se ha considerado el uso de este modelo para describir la característica I-V estática. También se ha utilizado con éxito para ajustar los datos experimentales (Avendaño, 2016). El circuito equivalente del modelo de un solo diodo se muestra en la Figura 2.13.

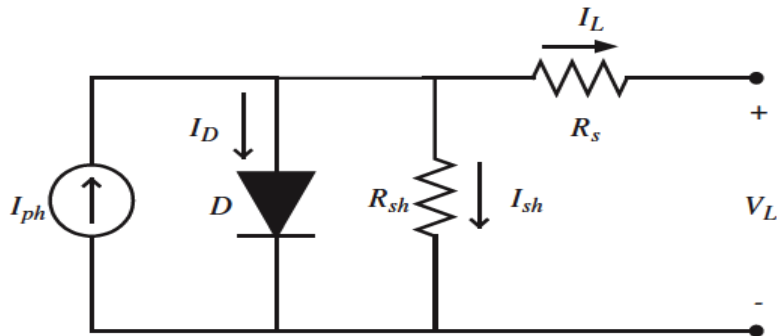


Figura 2.13 Circuito equivalente del modelo de un solo diodo.

Para este modelo, la ecuación resulta:

$$I_L = I_{ph} - I_{SD} \left[\exp\left(\frac{q(V_L + I_L R_s)}{nkT}\right) - 1 \right] - \left[\frac{(V_L + I_L R_s)}{R_{sh}} \right] \dots \dots \dots 2.8$$

consecuentemente, los parámetros a estimar son $R_s, R_{sh}, I_{ph}, I_{SD}$ y n .

2.8.2 Modelo de dos diodos.

Idealmente, la celda solar se modela como una fuente de corriente conectada en paralelo a un diodo rectificador. Sin embargo, en la práctica la fuente de corriente también se representa con otro diodo que modela la corriente de recombinación de la carga espacial y una resistencia shunt (resistencia en paralelo), que representa el corto circuito de la corriente cerca de los bordes de la celda debido a las impurezas del semiconductor y las no idealidades. Adicionalmente, los contactos de metal de la celda solar y la resistencia del material se representan mediante una resistencia conectada en serie con los elementos de la celda shunt, (Wolf, 1977). El circuito equivalente se muestra en la Figura 2.14.

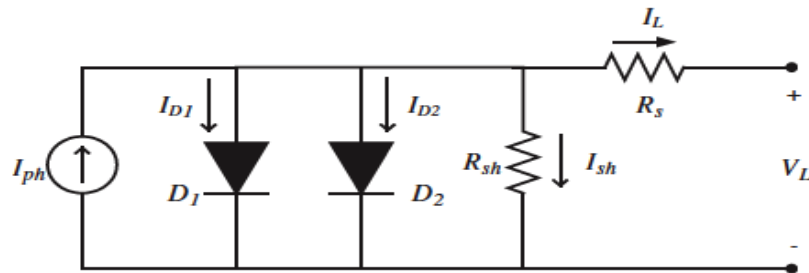


Figura 2.14 Circuito equivalente del modelo de dos diodos.

La corriente total de la celda solar para este modelo de dos diodos se calcula mediante la ley de Kirchhoff:

$$I_L = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - I_{sh} \dots \dots 2.9$$

donde I_L : es la corriente total de la celda, I_{ph} : es la fotocorriente generada por la celda, I_{D1}, I_{D2} : las corrientes del primer y segundo diodo, I_{sh} : la corriente en la resistencia shunt (resistencia en paralelo).

Las corrientes de los dos diodos se representan por la ecuación de Shockley (Shockley, 1956) como se ilustra respectivamente en las ecuaciones. (2.10) y

(2.11), mientras que la corriente de la resistencia shunt I_{sh} se formula como se muestra en la ecuación. (2.12).

$$I_{D1} = I_{SD1} \left[\exp \left(\frac{q(V_L + I_L R_s)}{n_1 k T} \right) - 1 \right] \dots \dots \dots 2.10$$

$$I_{D2} = I_{SD2} \left[\exp \left(\frac{q(V_L + I_L R_s)}{n_2 k T} \right) - 1 \right] \dots \dots \dots 2.11$$

$$I_{sh} = \frac{V_L + I_L R_s}{R_{sh}} \dots \dots \dots 2.12$$

donde R_s y R_{sh} son las resistencias en serie y shunt (resistencia en paralelo) respectivamente, I_{D1} e I_{D2} son las corrientes de difusión y saturación, respectivamente, V_L es el voltaje en las terminales, n_1 y n_2 son los factores de idealidad del diodo de difusión y recombinación respectivamente, k es la constante de Boltzmann, q es la carga del electrón y T es la temperatura absoluta en Kelvin de la celda solar. Sustituyendo las ecuaciones. (2.10) - (2.12) en la ecuación. (2.9), la corriente total de la celda se reescribe como se muestra en la ecuación. (2.13).

$$I_L = I_{ph} - I_{SD1} \left[\exp \left(\frac{q(V_L + I_L R_s)}{n_1 k T} \right) - 1 \right] - I_{SD2} \left[\exp \left(\frac{q(V_L + I_L R_s)}{n_2 k T} \right) - 1 \right] - \left[\frac{(V_L + I_L R_s)}{R_{sh}} \right] \dots \dots \dots 2.13$$

$R_s, R_{sh}, I_{ph}, I_{SD1}, I_{SD2}, n_1$ y n_2 son los siete parámetros para estimar, que describen completamente las características I-V (corriente-voltaje).

2.9 Modelo emperico desarrollado por laboratorios sandia.

Este es un modelo basado en mediciones experimentales de los parámetros eléctricos de un sistema fotovoltaico. Consiste en un estudio desarrollado durante doce años. Este es un método empírico, sin embargo, obtiene su versatilidad y precisión del hecho de que las ecuaciones individuales utilizadas en el modelo se derivan de las características de las células solares individuales. La versatilidad y precisión del modelo se ha demostrado para los módulos de placa plana (todas las tecnologías del silicio) (D.L. King, 2004).

Los modelos desarrollados por Sandia se pueden emplear en diferentes tecnologías fotovoltaicas. Son útiles para diseñar un determinado proyecto basado en una cantidad de energía esperada ya sea hora por hora, mensual o anual (D. King W. B., 2002).

El modelo incluye características térmicas, eléctricas, influencia del espectro solar y efectos ópticos en los módulos fotovoltaicos (D. King J. K., Measuring Solar Spectral and Angle-of-Incidence Effects on PV Modules and Solar Irradiance Sensors, 1997) (D. King J. K., Temperature Coefficients for PV Modules and Arrays: Measurement Methods, Difficulties, and Results, 1997).

2.9.1 Ecuaciones del modelo.

Las siguientes ecuaciones definen el modelo utilizado por el Departamento de Tecnologías Solar en Sandia para analizar y modelar el funcionamiento de los módulos fotovoltaicos. Las ecuaciones describen el funcionamiento eléctrico para módulos fotovoltaicos individuales, y se pueden escalar para cualquier serie o combinación en paralelo de los módulos en una matriz. Las mismas ecuaciones se aplican correctamente para las células individuales, para los

módulos individuales, como para grandes conjuntos de módulos, y para ambos tipos de módulos concentradores y de placa plana.

Diez ecuaciones describen al modelo, estas ecuaciones pueden ser empleadas para el cálculo de la potencia esperada y la energía producida por un módulo (D.L. King, 2004).

$$I_{SC} = I_{SC0} f_1 (AM_a) \{ (E_b f_2 (AOI) + f_d E_{diff}) / E_0 \} \{ 1 + \alpha_{I_{SC}} (T_C - T_0) \} \dots\dots\dots 2.14$$

$$I_{mp} = I_{mp0} \{ C_0 E_e + C_1 E_e^2 \} \{ 1 + \alpha_{I_{mp}} (T_C - T_0) \} \dots\dots\dots 2.15$$

$$V_{OC} = V_{OC0} + N_s \delta (T_C) \ln (E_e) + \beta_{V_{OC}} (E_e) (T_C - T_0) \dots\dots\dots 2.16$$

$$V_{mp} = V_{mp0} + C_2 N_s \delta (T_C) \ln (E_e) + C_3 N_s \{ \delta (T_C) \ln (E_e) \}^2 + \beta_{V_{mp}} (E_e) (T_C - T_0) \dots\dots\dots 2.17$$

$$P_{mp} = I_{mp} V_{mp} \dots\dots\dots 2.18$$

$$FF = P_{mp} / (I_{SC} V_{OC}) \dots\dots\dots 2.19$$

Donde

$$E_e = I_{SC} / [I_{SC0} \{ 1 + \alpha_{I_{SC}} (T_C - T_0) \}] \dots\dots\dots 2.20$$

$$\delta (T_C) = nk (T_C \times 273.15) / q \dots\dots\dots 2.21$$

$$I_X = I_{X0} \{ C_4 E_e + C_5 E_e^2 \} \{ 1 + (\alpha_{I_{SC}}) (T_C - T_0) \} \dots\dots\dots 2.22$$

$$I_{XX} = I_{XX0} \{ C_6 * E_e + C_7 E_e^2 \} \{ 1 + (\alpha_{I_{mp}}) * (T_C - T_0) \} \dots\dots\dots 2.23$$

Donde

$$I_X = I \left(\frac{1}{2} V_{OC} \right)$$

$$I_{XX} = I \left(\frac{1}{2} V_{OC} + V_{mp} \right)$$

Descripción de los parámetros de las ecuaciones:

I_{sc} = Corriente de cortocircuito (A).

I_{mp} = Corriente en el punto de máxima potencia (A).

I_x = Corriente del módulo $V = 0.5V_{oc}$, define el cuarto punto en la curva I-V.

I_{xx} = Corriente del módulo $V = 0.5(V_{oc} + V_{mp})$, define el punto 5 en la curva I-V.

V_{oc} = tensión de circuito abierto (V).

V_{mp} = Tensión en el punto de máxima potencia (V).

P_{mp} = Potencia en el punto de máxima potencia (W)

FF = Factor de llenado (sin dimensiones).

N_s = número de células en serie en un módulo o string.

N_p = Número de en paralelo en el módulo.

k = constante de Boltzmann, 1.3806610^{-23} (J / K).

q = carga primaria del electrón, 1.6021810^{-19} (coulomb).

T_c = temperatura de la célula en el interior del módulo ($^{\circ}$ C).

T_0 = Temperatura de Referencia de la célula, por lo general 25° C.

E_o = Referencia de la irradiancia solar, típicamente 1000 W / m^2

$\delta(T_c)$ = 'voltaje térmico' de la celda a T_c . Para un factor de diodo de la unidad ($n = 1$) y una temperatura de célula de 25° C, la tensión térmica es de aproximadamente 26 mV por celda.

Las ecuaciones 2.14, 2.15, 2.16 y 2.17, describen los tres puntos característicos de una curva I-V, estos puntos son la corriente de cortocircuito, voltaje a circuito abierto y el punto de máxima potencia. En la Figura 2.15 podemos observar estos 3 puntos y se le adicionan 2 más que definen mejor la forma de la curva.

Dentro del modelo hay valores que depende directamente de la irradiancia solar. Estos parámetros son la corriente y el voltaje, como resultado de ambos

el Fill Factor (D.L. King, 2004). El Voc y Vmp varían según la irradiancia efectiva. En la figura 2.16 podemos observar dicho suceso.

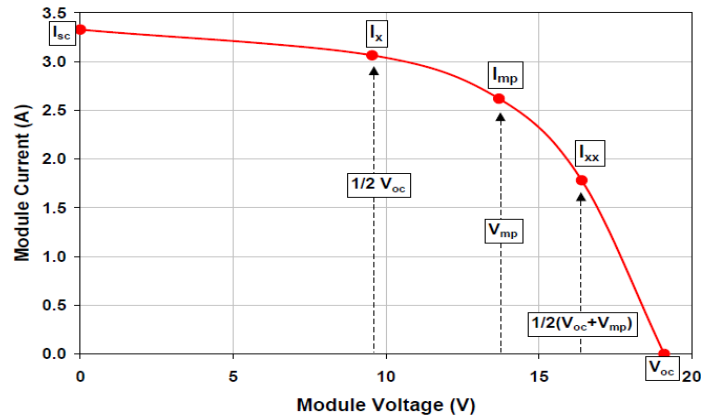


Figura 2.15 Curva I-V de un módulo fotovoltaico que muestra los 5 puntos de la curva que caracterizan al modelo de rendimiento Sandia.

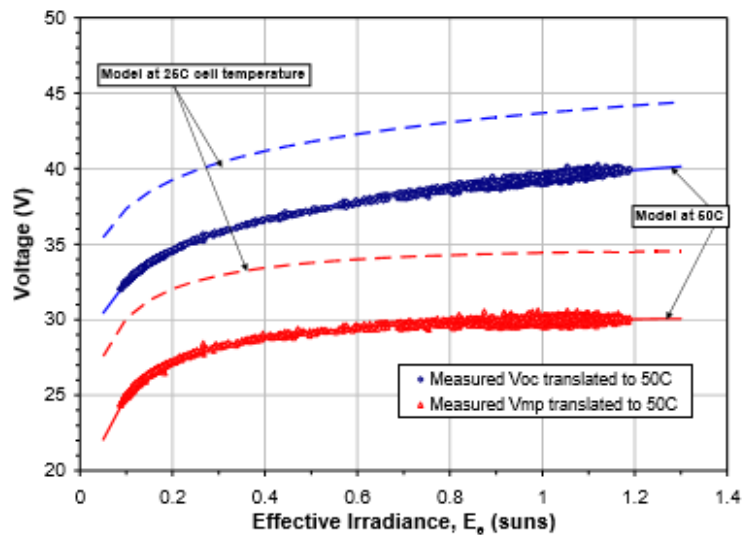


Figura 2.16 Datos experimentales de un módulo de silicio, donde se relaciona el Voc y Vmp con la irradiancia efectiva.

A partir de los datos experimentales, los coeficientes C_2 , C_3 y n , se obtienen a través de una regresión lineal basado en las ecuaciones 2.16 y 2.17.

La corriente también varía en función de la irradiancia eficaz. Esto lo podemos observar en la figura 2.17.

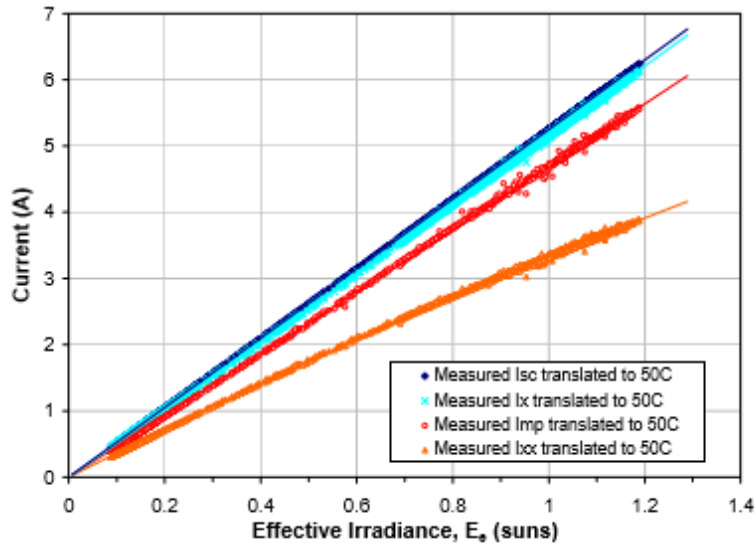


Figura 2.17 Datos experimentales de un módulo de silicio, donde se relaciona I_{sc} y I_{mp} con la irradiancia efectiva.

Similar al estudio realizado para el voltaje a circuito abierto (V_{oc}) y voltaje de máxima potencia (V_{mp}), para los datos experimentales asociados a I_{mp} , I_x e I_{xx} , se le calcula mediante un análisis de regresión lineal los coeficientes de rendimiento C_0 , C_1 , C_4 , C_5 , C_6 , C_7 , basados en las ecuaciones 2.15, 2.22 y 2.23.

La irradiancia solar "eficaz" (E_e) se define en la ecuación 2.20. Este valor describe la parte de la irradiancia solar total incidente en el módulo a la que las celdas responden en realidad. Cuando se utilizan datos solares tabulados en la predicción de rendimiento del módulo, la ecuación 2.20 se utiliza directamente. Cuando se utilizan las mediciones solares directas a irradiancia efectiva (E_e) se obtiene mediante procedimientos alternativos.

Existen alrededor de 5 métodos alternativos para calcular la irradiancia efectiva (E_e) cuando se utilizan mediciones directas, para este trabajo describiremos solo un método, no es el más eficaz, pero en pruebas de campo es simple de aplicar. El método consiste en utilizar un piranómetro para medir la irradiancia. Históricamente, este método para la cuantificación de la irradiancia solar ha sido el más utilizado, su margen de error oscila entre el 5 y 10% en las mediciones realizadas, y si el propietario del sistema fotovoltaico está de acuerdo en aceptar la magnitud del error en la medición, podemos calcular de forma sencilla el valor de la irradiancia eficaz (E_e) mediante la ecuación 2.24.

$$E_e = \left(\frac{E}{E_0} \right) * SF \dots\dots\dots 2.24$$

Donde:

E = irradiancia solar indicada por el sensor de irradiancia (W / m^2)

E_0 = Referencia irradiancia solar, típicamente $1\ 000\ W / m^2$

SF= Factor de suciedad.

El "factor de suciedad" (SF) representa la pérdida inevitable por suciedad presente cuando se realizan mediciones de rendimiento en los arreglos de paneles. SF tiene un valor de 1,0 para una matriz limpia, y es típicamente no menos de 0.95, a menos que la matriz esté visualmente bastante sucia. El SF se puede cuantificar en el campo mediante la medición de la I_{sc} de un módulo individual en el arreglo antes y después de la limpieza. (D.L. King, 2004).

2.9.2 Parámetros relacionados con la fuente “el sol”.

Para el diseño del sistema, las variables de irradiancia solar requeridas por el modelo de funcionamiento se obtienen típicamente de una base de datos o modelo meteorológico que proporciona estimaciones de los valores cada media hora (Anon, 1995) (METEONORM, 2003). Estos datos de irradiancia solar se pueden manipular utilizando diferentes métodos con el fin de calcular la irradiancia solar incidente esperada sobre la superficie de un módulo fotovoltaico posicionado en una orientación que depende del diseño del sistema y la aplicación (R. Perez, 1990) (Edition, 1991). Por otro lado, para las pruebas de campo o para la supervisión del funcionamiento a largo plazo, la irradiancia solar en el plano del módulo es a menudo un valor medido y debe ser utilizado directamente en el modelo de funcionamiento.

Las funciones empíricas $f_1(AM_a)$ y $f_2(AOI)$ cuantifican la influencia en la corriente de cortocircuito (I_{sc}) del módulo respecto a la variación del espectro solar y las pérdidas ópticas debido al ángulo de incidencia solar. Estas funciones están determinadas por un laboratorio de pruebas de módulo utilizando procedimientos de prueba al aire libre (D. King J. K., Measuring Solar Spectral and Angle-of-Incidence Effects on PV Modules and Solar Irradiance Sensors, 1997) (A. H. Fannee, 2002.). La intención de estas dos funciones es dar cuenta de los efectos sistemáticos que se producen de forma recurrente durante las condiciones predominantemente claras cuando se recoge la mayor parte de la energía solar. Para los módulos de un mismo fabricante, estas dos funciones empíricas a menudo pueden ser considerados "genéricas", siempre y cuando el tipo de celda sea la mismo.

La figura 2.18 muestra cómo la distribución espectral solar varía a medida que avanza el día de la mañana hacia el mediodía y como esta variación influye

sistemáticamente en la corriente de cortocircuito (I_{sc}) de una celda solar de silicio (Si).

Las figuras 2.19 y 2.20 ilustran ejemplos típicos para las funciones determinadas empíricamente.

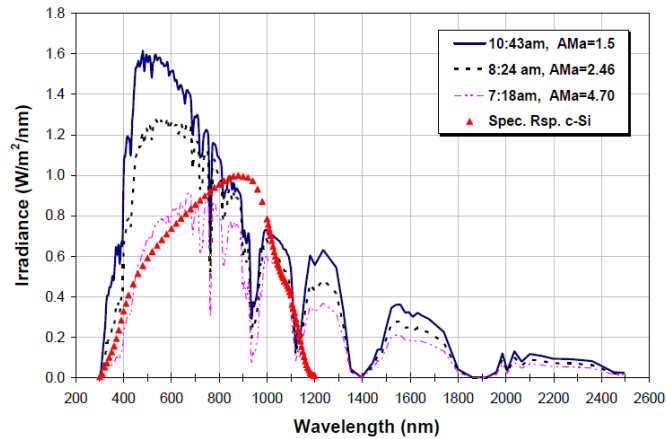


Figura 2.18 Medición de irradiancia espectral solar en un día claro en Davis, CA, en diferentes condiciones de masa de aire durante el día. La respuesta espectral normalizada de una célula solar de silicio típica se superpone para comparación.

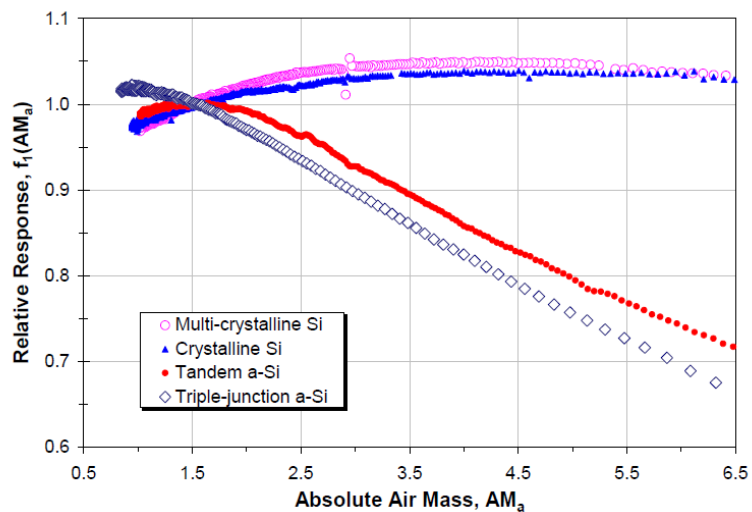


Figura 2.19 Relación empírica típica que ilustra la influencia de la variación espectral solar en la corriente de cortocircuito del módulo, con relación a la condición de referencia $AM_a = 1,5$.

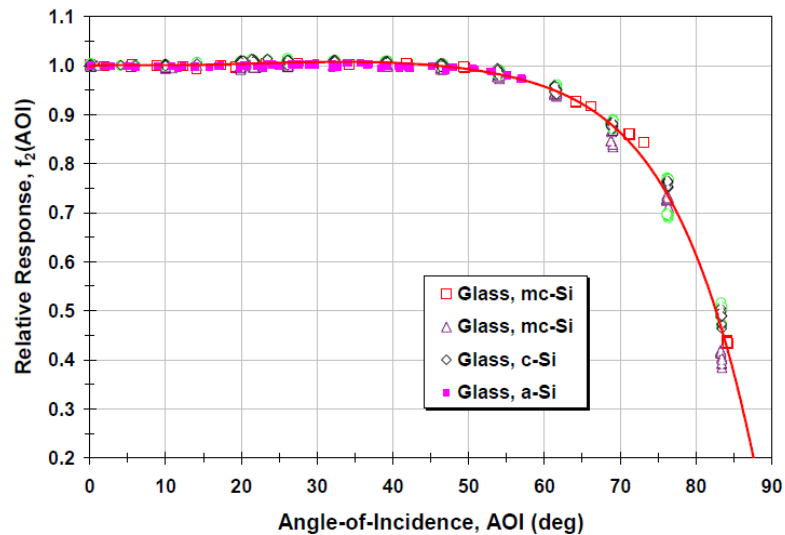


Figura 2.20 Relación empírica típica que ilustra la influencia del ángulo de incidencia solar en la reducción de la corriente de cortocircuito de un módulo.

En la figura 2.19 se puede observar que la influencia del espectro solar cambiante es relativamente pequeña para los valores de masa de aire entre 1 y 2. En el contexto de la producción anual de energía, también debe reconocerse que más del 90% de la energía solar disponible a través de todo un año se produce a valores de masa de aire de menos de 3. Como se documenta en otra parte (D. King W. B., 2002), el efecto acumulativo de la influencia del espectro solar en la producción anual de energía es normalmente bastante pequeño, menos del 3%.

En la figura 2.20 se muestra que la influencia de las pérdidas ópticas (reflectancia) para los módulos de placa plana es típicamente insignificante hasta que la incidencia de ángulo solar sea mayor que aproximadamente 55 grados. Esta pérdida es en adición a la pérdida típica 'coseno' para una superficie de módulo que no está orientada perpendicular a la trayectoria de la luz solar. El efecto acumulativo (pérdida) en el año debe ser considerado para

diferentes diseños de sistemas y orientaciones de los módulos. Para los módulos que realizan un seguimiento con precisión del sol, no hay pérdida óptica. En el caso de un módulo de placa plana orientada verticalmente en la pared sur de un edificio, la pérdida anual de energía debido a la pérdida óptica es de aproximadamente 5% (D. King W. B., 2002).

El modelo de rendimiento también se puede aplicar a módulos fotovoltaicos de luz concentrada (D.L. King, 2004). En este caso, las funciones empíricas, $f_1(AM_a)$ y $f_2(AOI)$, adquieren roles algo mayores. Los efectos de la influencia solar espectral, la variación en la eficiencia óptica durante el día, la desalineación del módulo, y el comportamiento no lineal de la corriente de cortocircuito (I_{sc}) frente a la irradiancia pueden ser contabilizados adecuadamente con $f_1(AM_a)$. La función $f_2(AOI)$ se puede utilizar para cuantificar el efecto de error de seguimiento en el rendimiento del módulo concentrador.

Capítulo 3

METODOLOGIA EXPERIMENTAL.

3.1 Preparación de las condiciones necesarias.

Para el desarrollo de este trabajo fue necesario preparar las condiciones necesarias para lograr los objetivos esperados, primeramente, la implementación de un panel solar con 6 celdas que utilizan luz concentrada, con tres arreglos en paralelo de dos celdas en serie cada arreglo, posteriormente para las pruebas fue necesario montar los dispositivos que se utilizarían en un seguidor solar, el cual era controlado manualmente cada determinado tiempo, los procedimientos para la adquisición de cada parámetro se mencionaran más adelante, para después procesar la información y obtener el polinomio emperico, para caracterizar la influencia del espectro solar en la corriente de cortocircuito del panel. La figura 3.1 muestra el arreglo experimental general.



Figura 3.1 Equipo Experimental.

A continuación, mostramos los datos de referencia del panel medidos a un espectro AM 1.5.

Isc	0.102 A
Voc	5.74 V
Imp	0.099 A
Vmp	5.098 V

3.2 Arreglo experimental para la toma de espectros.

Las pruebas para la medición de los espectros electromagnéticos fueron tomadas en distintas horas del día, se hizo uso del espectrómetro HR4000 CG-UV-NIR 190-1100nm, así como de un corrector de coseno para ampliar el rango de captación de luz solar, mediante fibra óptica de 400 μm se acoplaron los dispositivos antes mencionados. La figura 3.2 ilustra el equipo necesario para la toma del espectro.

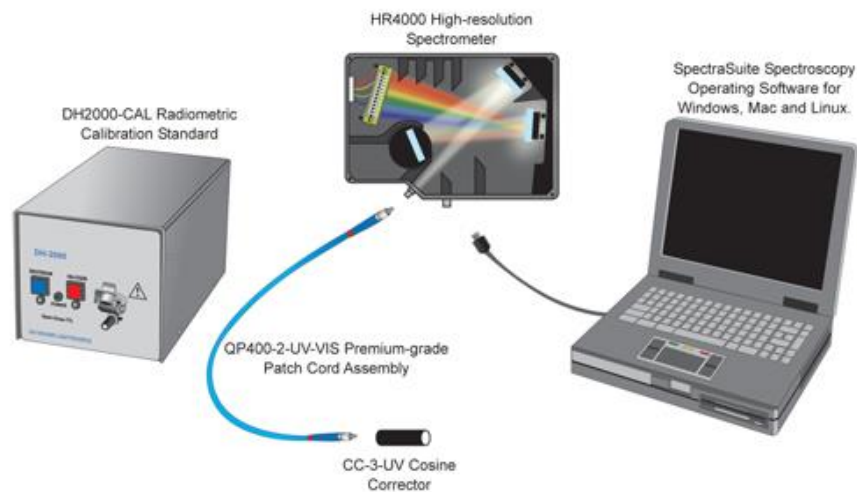


Figura 3.2 Esquema experimental para la toma de espectros.

Para esta prueba es preciso recalcar que no contamos con la fuente para calibración estándar, por lo que las muestras de los espectros están dadas en “cuentas”. A continuación, se describe el procedimiento para la toma del espectro.

- Se acoplan los dispositivos tal como lo muestra la figura 3.2.
- Se abre el programa SpectraSuite en la PC.
- Una vez abierto el programa SpectraSuite, se calibra el espectrómetro.
- Exponer al sol el coseno corrector.
- Tomar la muestra.

Los datos de cada muestra de espectro solar se guardaron en formato txt., y se procesaron en el software computacional Origin.

3.3 Obtención del polinomio empírico $f_1(AM_a)$.

Para obtener el polinomio empírico $f_1(AM_a)$, se aplica el procedimiento descrito por la ASTM (American Society Testing of Materials), el cual consiste en un método experimental donde las pruebas son realizadas al aire libre y describe la sensibilidad de los dispositivos fotovoltaicos a la variación del espectro solar (ASTM E 973) (ASTM E 892). La obtención de dicho polinomio tiene la característica de ser específicamente para la tecnología con la cual se ha calculado y las condiciones del lugar de las pruebas (King, 1996).

El efecto del espectro solar puede ser relacionado empíricamente a través de la masa de aire absoluta (AM_a). Para calcular la masa de aire absoluta (AM_a) se utiliza el ángulo conocido como zenit solar (Z_s) y la altura (h) del lugar en metros, una vez ubicado el ángulo se aplican las ecuaciones 2.2. 2.3 y 2.4.

Para encontrar el zenit solar, se ocupó un software especializado de la red (Solar Topo, s.f.).

Primeramente, calculamos la masa de aire (AM) aplicando la ecuación 2.2.

$$AM = (\cos(Z_s) + 0.5057 (96.080 - Z_s)^{-1.634})^{-1} \dots \dots 2.2$$

Seguido calculamos la AM_a, aplicando la ecuación 2.3 y 2.4.

$$AM_a = AM \left(\frac{P}{P_o} \right) \dots \dots 2.3$$

$$\frac{P}{P_o} \approx e^{(-0.0001184 h)} \dots \dots 2.4$$

La función empírica de masa de aire absoluta $f_1(AM_a)$, resulta de la ecuación 3.1, la cual proviene del procedimiento descrito por la ASTM, donde explica cómo se relaciona la corriente de cortocircuito con un parámetro de desajuste espectral (M) (ASTM E 973), al cual lo podemos llamar $f_1(AM_a)$.

$$f_1(AM_a) = \frac{I_{sc_t}}{E^*} \cdot \frac{E_0^*}{I_{sc_{to}}} \dots \dots 3.1$$

Donde:

I_{sc_t} = Corriente de cortocircuito medida durante la prueba. (A)

$I_{sc_{to}}$ = Corriente de cortocircuito de referencia. Normalmente medida a 1000 W/m² y espectro AM 1.5.

E^* = Irradiancia solar medida durante la prueba. (W/m²)

E_0^* = Irradiancia solar de referencia. Normalmente 1000 W/m²

3.3.1 Medición de la irradiancia solar.

Se realizaron mediciones de irradiancia solar durante varios días, en diferentes horarios, para ello se montó un piranómetro en un seguidor solar operado manualmente, conectado a un multímetro digital de alta precisión para la lectura de las mediciones. A continuación, se muestran los datos del equipo utilizado para la medición de la irradiancia.

- Piranómetro.
Modelo: LP02
Sensibilidad: $17.63 \mu\text{v (W/m}^2\text{)}$.
- Multímetro digital.
Modelo: DMM-4050.
Rango de medición: 10 A; 1000 V



Figura 3.3 Piranómetro LP02.



Figura 3.4 Multímetro Digital.

3.3.2 Midiendo corriente de cortocircuito.

Para las mediciones de corriente de cortocircuito, primeramente, se realizó un pequeño panel solar con seis celdas que utilizan luz concentradas, la figura 3.5 muestra el panel solar construido.



Figura 3.5 Panel Solar.

El panel fue montado a un seguidor solar manual, para la toma de las mediones de corriente, tanto la irradiancia como la corriente de cortocircuito fueron tomadas al mismo tiempo en cada una de las muestras realizadas.

3.4 Procesamiento de la información.

Los datos obtenidos tanto de la corriente cortocircuito, como de la irradiancia fueron procesados con el software Origin, como lo muestra la figura 3.6. Se aplicó el procedimiento descrito por la ASTM para la obtención del análisis y graficas que se mostraran en el siguiente capítulo. Una vez graficados los datos del valor de la función empírica $f_1(AM_a)$, se aplicó un análisis de regresión lineal para encontrar los coeficientes del polinomio empírico.

Long Name	Elevation	Zenit	AM	Po/P	Masa de A	IRRADIANCIA INCIDENTE (W/m2)	Isc (panel)	Respuesta	valor de irrad
1	36.33	53.67	1.68	0.80044	1.35	667.61	0.0628	0.90	0.01177
2	37.24	52.76	1.65	0.80044	1.32	758.93	0.0729	0.91	0.01338
3	39.07	50.93	1.58	0.80044	1.27	942.14	0.09275	0.94	0.01661
4	42.28	47.72	1.48	0.80044	1.19	882.02	0.0892	0.96	0.01555
5	42.97	47.03	1.47	0.80044	1.17	897.33	0.09051	0.96	0.01582
6	44.8	45.2	1.42	0.80044	1.13	960.29	0.09655	0.96	0.01693
7	45.72	44.28	1.40	0.80044	1.12	958.59	0.09857	0.98	0.0169
8	47.56	42.44	1.35	0.80044	1.08	971.07	0.0959	0.94	0.01712
9	48.02	41.98	1.34	0.80044	1.08	949.52	0.09438	0.95	0.01674
10	49.4	40.6	1.32	0.80044	1.05	670.45	0.06051	0.86	0.01182
11	49.86	40.14	1.31	0.80044	1.05	878.62	0.0838	0.91	0.01549
12	51.7	38.3	1.27	0.80044	1.02	923.43	0.0869	0.90	0.01628
13	52.62	37.38	1.26	0.80044	1.01	414.07	0.0325	0.75	0.0073
14	58.08	31.92	1.18	0.80044	0.94	204.20	0.00822	0.38	0.0036
15	57	33	1.19	0.80044	0.95	234.83	0.01104	0.45	0.00414
16	59.99	30.01	1.15	0.80044	0.92	289.28	0.01327	0.44	0.0051
17	60.45	29.55	1.15	0.80044	0.92	1086.78	0.10066	0.88	0.01916
18	61.6	28.4	1.14	0.80044	0.91	417.47	0.0255	0.58	0.00736
19	62.29	27.71	1.13	0.80044	0.90	601.25	0.0412	0.65	0.0106
20	66.44	23.56	1.09	0.80044	0.87	227.45	0.01019	0.43	0.00401
21	70.55	19.45	1.06	0.80044	0.85	198.53	0.00792	0.38	0.0035
22	71.47	18.53	1.05	0.80044	0.84	216.11	0.00856	0.38	0.00381
23	71.92	18.08	1.05	0.80044	0.84	221.78	0.01006	0.43	0.00391
24	72.84	17.16	1.05	0.80044	0.84	153.72	0.00572	0.35	0.00271

Figura 3.6 Software Profesional para el procesamiento de los datos.

Capítulo 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS.

4.1 Espectros solares obtenidos en el Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas.

Aplicando la metodología del capítulo anterior para la toma de espectros solares, se lograron realizar mediciones de espectros solares, tanto en horas de sol despejado, como en horas de cielo nublado, para distintos meses y días.

En la figura 4.1 observamos tres espectros solares a diferentes masas de aire absoluta (AMa) de un día semi nublado del mes de septiembre del 2015, los espectros reflejan que las intensidades aumentan a medida que la masa de aire absoluta (AMa) disminuye, esto se debe a que la trayectoria de los rayos del sol es más corta cuando nos acercamos al medio día solar.

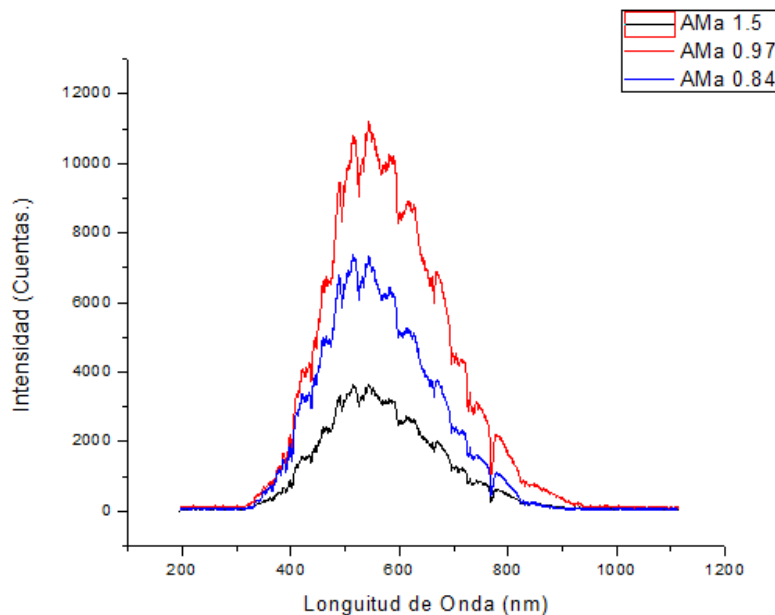


Figura 4.1 Espectro solar incidente en el Centro de Investigación en Ingeniería y ciencias Aplicadas, a diferentes valores de Masa de aire absoluta en el mes de septiembre.

La figura 4.2 muestra el espectro de diferentes masas de aire absoluta (AMa) en un día despejado del mes de marzo del 2016, podemos observar que los picos de intensidad entre el Ama 0.86 y AMa 1.04 son muy similares y el AMA 0.91 se encuentra por debajo del AMA 1.04 esto se debe a que al momento de la muestra había presencia de nubes.

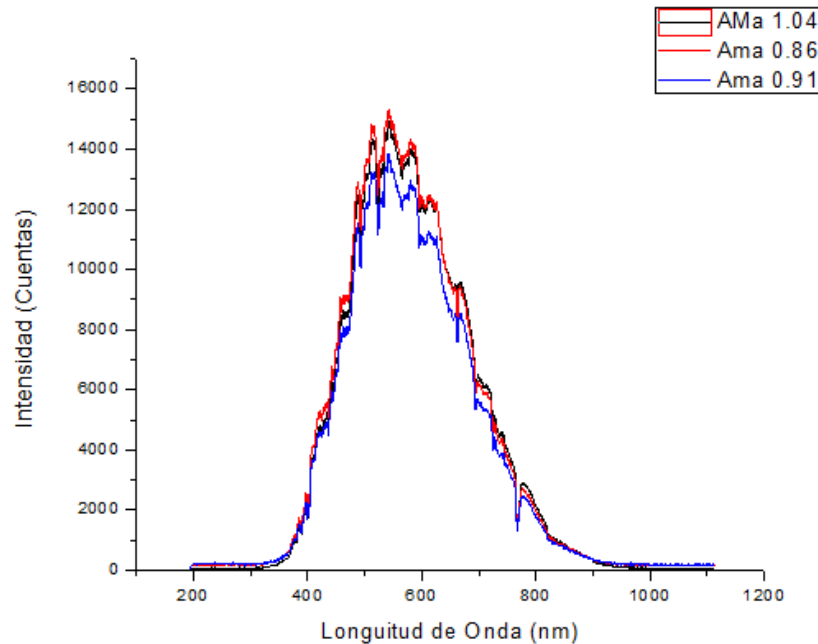


Figura 4.2 Espectro solar incidente en el Centro de Investigación en Ingeniería y ciencias Aplicadas, a diferentes valores de Masa de aire absoluta en el mes de marzo.

La figura 4.3 muestra el espectro solar incidente a diferentes masas de aire absoluta (AMa), en el mes de marzo. Se puede observar que en esta ocasión el AMA 1.05 es mayor a los AMA 0.93 y AMA 0.87, esperaríamos que fuese mayor el AMA 0.87 puesto que es la masa de aire absoluta mas cercana al medio día solar, sin embargo, al influir un cielo nublado la intensidad del espectro solar disminuye. Podríamos decir entonces que, con cielos nublados la intensidad del espectro solar no corresponderá solo a la masa de aire absoluta, sino que se ve influenciado por las condiciones climáticas que se presente a la hora de la toma de pruebas.

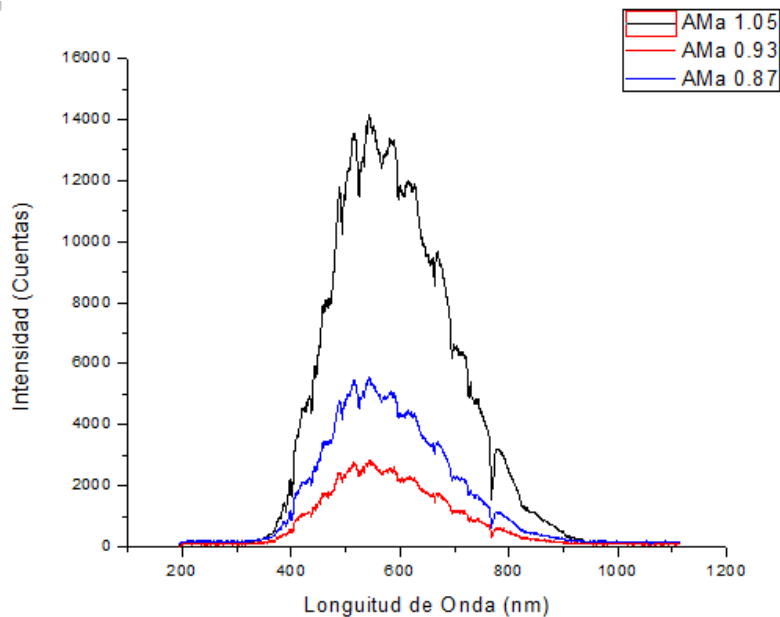


Figura 4.3 Espectro solar incidente en el Centro de Investigación en Ingeniería y ciencias Aplicadas, a diferentes valores de Masa de aire absoluta en el mes de marzo.

La figura 4.4 muestra el espectro solar incidente en dos días diferentes del mes de marzo del 2016, se observa que los picos de intensidad en dos días diferentes, a la misma masa de aire absoluta (AMa) es prácticamente la misma. Podemos decir que la cantidad de energía por longitud de onda (λ) que se recibe de un día a otro en condiciones de cielo despejado varía muy poco. Caso contrario es cuando el día se ve afectado por cambios climáticos, como lo son días nublados, días lluviosos o simplemente presencia de nubes.

En los espectros solares medidos representados por las figuras 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 cambian conforme transcurre el día, y de día a día con igual masa de aire absoluta, la presencia de nubes influye de manera significativa debido a que estas absorben gran parte de la radiación directa y solo logra pasar la parte difusa.

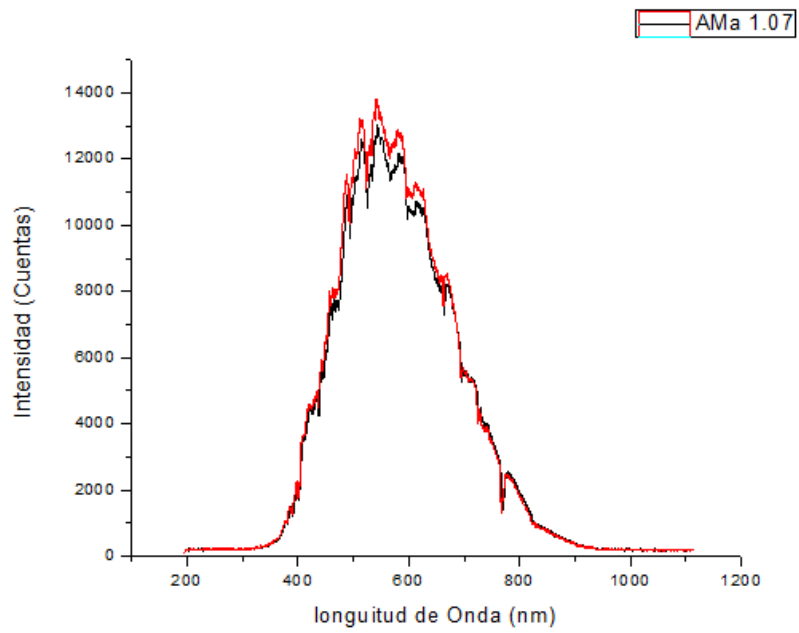


Figura 4.4 Espectro solar incidente en el Centro de Investigación en Ingeniería y ciencias Aplicadas, a igual Masa de aire absoluta de dos días del mes de marzo.

4.2 Corriente de cortocircuito e irradiancia solar directa.

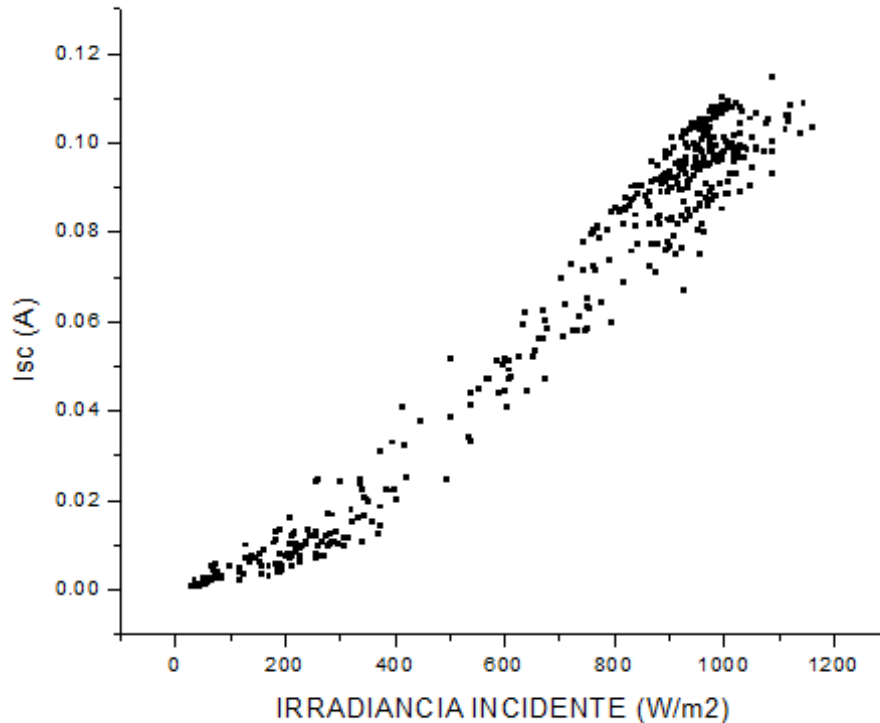


Figura 4.5 Mediciones de corriente de cortocircuito e Irradiancia.

Si observamos la Figura 4.5 podemos encontrar un comportamiento lineal en la corriente de cortocircuito a las variaciones de irradiancia. Esto nos demuestra que la corriente producida por el panel depende directamente de la iluminación que recibe. Así para valores altos de irradiancia tendremos valores altos de corriente de cortocircuito. Podríamos tener una irradiación de 1000 W/m^2 y el valor de corriente de cortocircuito no ser igual al dato de placa, en condiciones de pruebas al aire libre la presencia de nubes, polvo, o sombras afectan directamente el comportamiento de la corriente.

4.3 Polinomio empírico de la función de masa de aire absoluta $f_1(AM_a)$.

Las tomas de muestras se realizaron durante las horas donde se recolecta la mayor parte de la radiación solar. Esto es durante la masa de aire absoluta (AMa) 0.81 a 3.0.

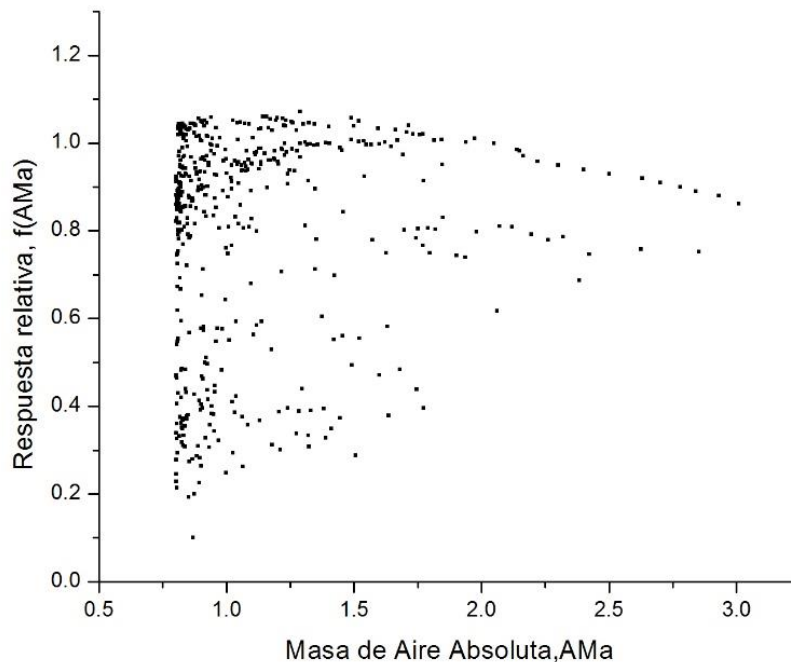


Figura 4.6 Comportamiento de la respuesta relativa $f_1(AMa)$, bajo diferentes condiciones meteorológicas.

Como podemos observar en la figura 4.6 hay una gran dispersión de datos, esto debido a los cambios en las condiciones atmosféricas presentes durante la prueba, para este caso no podríamos aplicar ningún análisis.

Para poder observar mejor el comportamiento del panel solar estudiado ante las variaciones del espectro solar respecto a la corriente de cortocircuito, se optó por eliminar los datos recabados en condiciones de cielo nublado.

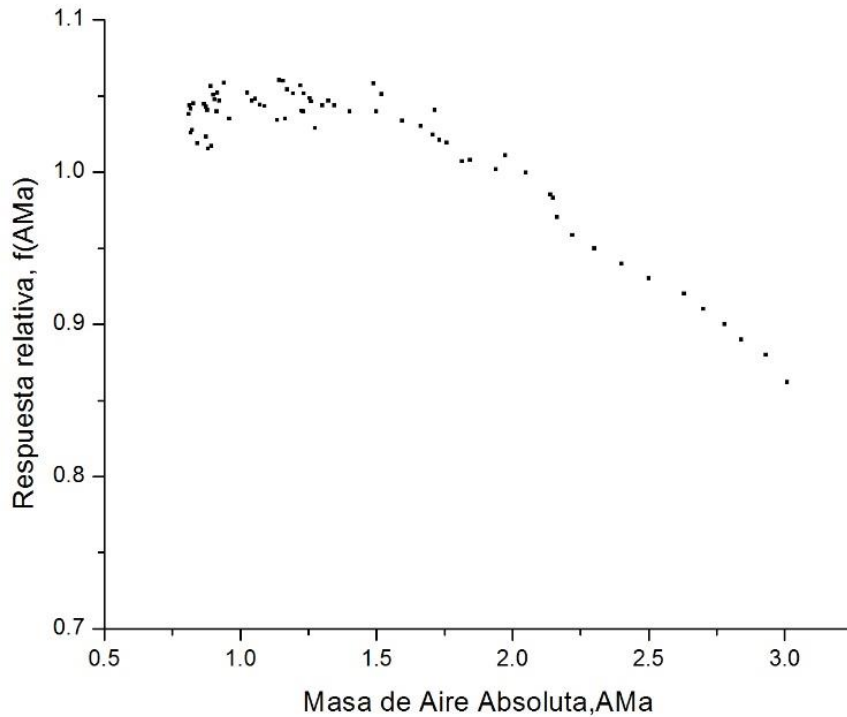


Figura 4.7 Relación empírica del espectro solar con la corriente de cortocircuito en Ciicap con cielo despejado.

La figura 4.7 muestra el comportamiento de la corriente de cortocircuito ante la variación del espectro solar en condiciones de cielo despejado para el Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, la tendencia es similar a la descrita por los laboratorios SANDIA para tecnología de concentración con silicio (Si).

La figura 4.8 representa la regresión lineal que se le aplicó a los datos obtenidos durante las pruebas, a partir de este análisis se obtiene el polinomio empírico que representa a la función de masa de aire absoluta y los coeficientes característicos, a continuación, se muestra dicha ecuación.

$$f1(AMa) = C + C1 (AMa) + C2 (AMa)^2 + C3 (AMa)^3 + C4 (AMa)^4 \dots \dots 4.1$$

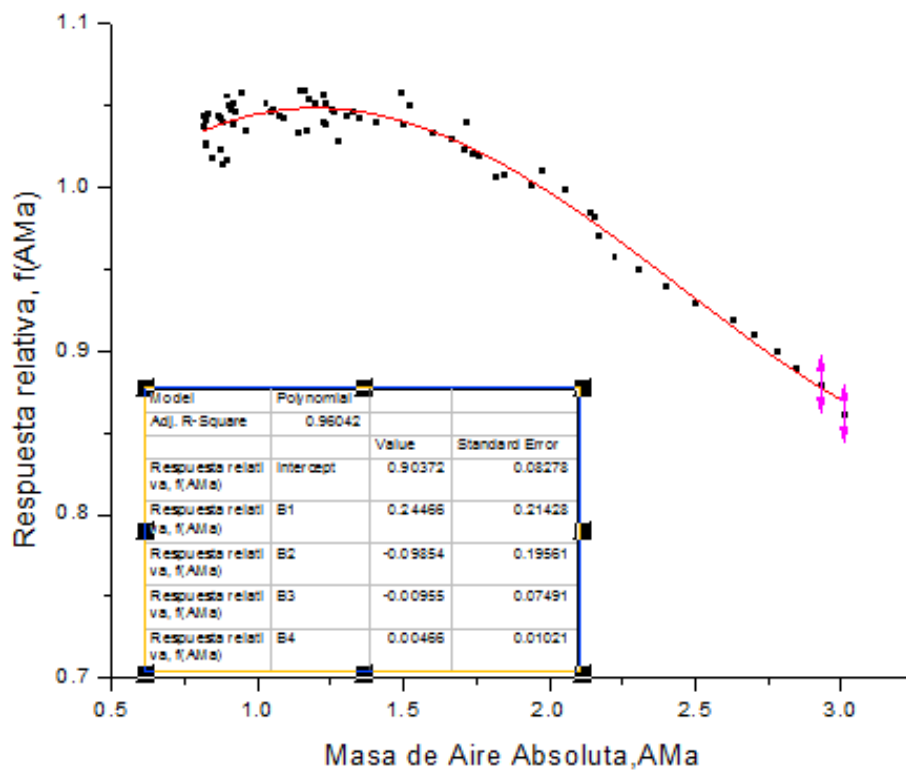


Figura 4.8 Obtención de los coeficientes del polinomio empírico de la función de masa de aire absoluta.

Tabla 4.1 Valor de los coeficientes del polinomio empírico.

Coefficients	Valor del coeficiente.
C	0.90372
C1	0.24466
C2	-0.09854
C3	-0.00955
C4	0.00466

4.4 Cálculo de la corriente de cortocircuito mediante el polinomio empírico $f_1(AM_a)$.

La tabla 4.2 muestra las corrientes de cortocircuitos estimadas por medio del polinomio empírico obtenido y se comparan estas corrientes con la corriente de cortocircuito medida, se obtuvo el error relativo entre ambas corrientes. Podemos observar que la estimación de la corriente de cortocircuito a partir del polinomio empírico $f_1(AM_a)$ se ajusta adecuadamente a lo que se espera produzca el panel solar con respecto al espectro incidente y con diferentes irradiancias. Un error relativo del 4.67 % para espectro AMa 1.5 cuando la irradiancia se eleva por encima de 1000 W/m². Estos resultados son confiables para cielo despejado, con presencia de nubes la estimación de la corriente de cortocircuito por medio de este modelo no es recomendable.

Tabla 4.2 Estimación de Corriente de cortocircuito.

Espectro (AMa)	Irradiancia. W/m²	IscMedida. (A)	IscSimulada. (A)	Error relativo (%)
0.8	970	0.1	0.102	2
	990	0.101	0.104	2.97
	1109	0.114	0.117	2.63
1.5	839	0.088	0.089	1.14
	986	0.101	0.104	2.97
	1057	0.107	0.112	4.67
2	890	0.093	0.094	1.08
	910	0.095	0.096	1.05
3	954	0.086	0.084	2.33

Capítulo 5

CONCLUSIONES.

5.1 Conclusiones.

Para las condiciones atmosféricas presentes en el Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, suele ser no recomendable la utilización de celdas solares que utilizan luz concentrada, puesto que durante las horas donde se estima tener el mayor aprovechamiento del recurso solar, el cielo permanece nublado, siendo un obstáculo importante para la concentración solar, la incidencia de la radiación solar sobre este tipo de tecnología debe ser siempre directa.

Aun con los problemas surgidos de cielo nublado se logró obtener el polinomio empírico de la función de masa de aire absoluta ($f_1(AM_a)$), con los datos de cielo despejado, para analizar los cambios en la corriente de cortocircuito respecto a las variaciones del espectro solar.

Se observa una similitud en la tendencia de los datos respecto a los reportados por los laboratorios SANDIA, para ciudades del estado de California.

Referencias.

- ASTM E 892. (s.f.). Tables for Terrestrial Solar Spectral Irradiance at Air Mass 1.5 for 37° Tilted Surface.
- A. H. Fanney, e. a. (2002.). Short-Term Characterization of Building Integrated Photovoltaic Modules. *Proceedings of Solar Forum 2002*.
- Anon. (1995). NSRDB National Solar Radiation Data Base 1961-1990. *NREL/TP-463-5784 Data available at National Renewable Energy Laboratory, Vol.2*. Obtenido de <http://www.nrel.gov>
- ASTM E 973. (s.f.). "Test Method for Determination of a Spectral Mismatch Parameter Between a Photovoltaic Device and a Photovoltaic Reference Cell."
- Avendaño, E. d. (2016). *CARACTERÍSTICAS VOLT-AMPERE DE CELDAS SOLARES CONSTRUIDAS CON KESTERITA BAJO DISTINTAS CONDICIONES DE IRRADIANCIA Y TEMPERATURA*. Cuernavaca Morelos.
- Barrera, M. P. (2009). *Simulación y caracterización de celdas solares multijuntura y de silicio cristalino para aplicaciones espaciales*. Republica Argentina.
- C. Hosnberg, S. B. (2016). "Solar Energy". *PV education.org*. Obtenido de <http://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/solar-cell-structure>.
- D. King, J. K. (1997). Measuring Solar Spectral and Angle-of-Incidence Effects on PV Modules and Solar Irradiance Sensors. *26th IEEE PV Specialists Conference*, 1113-1116.
- D. King, J. K. (1997). Temperature Coefficients for PV Modules and Arrays: Measurement Methods, Difficulties, and Results. *26th IEEE PV Specialists Conference*, 1183-1186.
- D. King, W. B. (2002). Analysis of Factors Influencing the Annual Energy Production of Photovoltaic Systems. *29th IEEE PV Specialists Conference*, 1356-1361.
- D.L. King, W. B. (2004). *Photovoltaic Array Performance Model*. Albuquerque, New Mexico : Sandia National Laboratories .
- Edition, J. D. (1991). Solar Engineering of Thermal Processes. *John Wiley & Sons*(Second Edition).
- Fernandez, E. F. (2012). *Modelización y caracterización de celdas solares III-V multiunión y de módulos de concentración*. Santiago de Compostela, España.
- Gasquet, I. H. (2004). *Conversión de la Luz Solar en Energía Eléctrica*. El Paso, Texas.
- Hulstrom, C. R. (1990). WHAT IS AN AIR MASS 1.5 SPECTRUM? *Solar Energy Research Institute* , 1085-1088.

- Kensuke Nishioka, T. T. (2006). Annual output estimation of concentrator photovoltaic systems using high-efficiency InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cells based on experimental solar cell's characteristics and field-test meteorological data. *Solar Energy Materials & Solar Cells*(90), 57-67.
- King, D. L. (1996). Photovoltaic Module and Array Performance Characterization Methods for All System Operating Conditions. *NREL/SNL Program Review*, 347-368.
- Krenzinger, I. Z. (1993). The Effects of Atmospheric Parameters on the Global Solar Irradiance and on the Current from a Silicon Solar Cell. *Progress in Photovoltaics, Vol. 1*, 169-179.
- M, I. (1983). *An Introduction to Solar Radiation*. Toronto: Elsevier.
- M.A. Stan, P. S. (2000). Design and production of extremely radiation-hard 26% InGaP/GaAs/Ge triple-junction solar cells. *Proceedings of 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 1374.
- Maza, M. Á. (2010). En *Energía Solar Fotovoltaica* (pág. 9).
- METEONORM. (2003). Global Meteorological Database for Solar Energy and Applied Climatology. *50*.
- N.S. Fatemi, P. S. (2001). Radiation-hard high-efficiency multi-junction solar cells for commercial space applications. *Proceedings of 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2155 .
- Oyola, J., & Gordillo G, G. (julio-diciembre, 2007). Estado del arte de los materiales fotovoltaicos y de la tecnología solar fotovoltaica . *PROSPECTIVA*, 5(2), 11-15.
- R. Perez, e. a. (1990). Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy*, 44(5), 271-289.
- SEARS, F., ZEMANSKY, M., YOUNG, H., & FEEDMAN, R. (1996). *Física universitaria*. México: Addison Wesley Longman.
- Solar Topo. (s.f.). *calculadora de posición solar*. Obtenido de Solar Topo
- Vlatkovi, V. (2004). Alternative energy: state of the art and implications on power electronics. *IEEE Applied Power Electronics conference and Exposition*, 1483-1488.
- Wolf, M. N. (1977). Investigation of the double exponential in the current-voltage characteristics of silicon solar cells. *IEEE Transaction on Electron Devices*, 24 (4), 419-428.
- Young, F. K. (1989). *Applied Optics*. (28), 4735-4738.