



SISTEMA FOTOVOLTAICO DE ILUMINACIÓN SOLAR

VÍCTOR HUGO BENÍTEZ BALTAZAR*, GUADALUPE ARACELI TORRES VALVERDE, LUIS ARMANDO GÁMEZ VALDÉZ, JESÚS HORACIO PACHECO RAMÍREZ

El artículo es el resultado de un trabajo de investigación enfocado al uso de sistemas fotovoltaicos para la iluminación por medio de diodos emisores de luz tipo LED. Se busca reducir el consumo energético mediante la implementación de un sistema de iluminación basado en LED hasta en un 80%, donde la fuente primaria de energía es el Sol. Se demuestra la viabilidad de los sistemas solares de iluminación LED mediante la construcción de un prototipo. Los sistemas de iluminación fotovoltaicos son una alternativa real para ahorrar energía eléctrica e igualmente representan un campo de investigación abierto en muchos sentidos.

Dr. Víctor Hugo Benítez Baltazar
Correo: vbenitez@industrial.uson.mx
M.C. Guadalupe Araceli Torres Valverde
Correo: atorres@industrial.uson.mx
Ing. Luis Armando Gámez Valdez
Correo: armando_gamezv@hotmail.com

M.C Jesús Horacio Pacheco Ramírez
Correo: jpacheco@industrial.uson.mx
Departamento de Ingeniería Industrial,
Universidad de Sonora

*Autor para correspondencia: Víctor Hugo Benítez Baltazar
Correo electrónico: vbenitez@industrial.uson.mx
Recibido: 25 de Enero de 2013
Aceptado: 14 de Noviembre de 2013
ISSN: 2007-4530

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presentan las simulaciones y experimentos llevados a cabo en un proyecto de investigación para desarrollar un sistema de iluminación solar basado en diodos emisores de luz tipo LED (*Light-Emitting Diode*), por sus siglas en inglés, con el fin de hacer un uso eficiente de la energía, contribuyendo al cuidado del medio ambiente y aprovechando una fuente energética inagotable que no ocasiona contaminación.

Actualmente la tecnología de las energías renovables todavía se encuentra en una etapa de desarrollo (1). En particular para la energía solar fotovoltaica, el desarrollo se centra principalmente en mejorar su eficiencia y garantizar un almacenamiento adecuado de la energía producida (2). El modelo energético actual, a base de combustibles fósiles como principal fuente, genera un gran impacto ambiental y no es sustentable (7).

DIODOS EMISORES DE LUZ

Uno de los elementos fundamentales de este proyecto lo constituye la tecnología LED, cuyo funcionamiento se describe a continuación. La emisión de luz debida a la inyección de electrones en un semiconductor, es uno de los hechos más notables en la tecnología moderna de semiconductores. La luz emitida en este caso procede de la recombinación electrón-hueco en un semiconductor (Figura 1). Cuando un electrón se recombina, cae desde un nivel de alta energía, a su estado neutro y se obtiene luz de una longitud de onda correspondiente a la diferencia de niveles de energía asociada con esta transición.

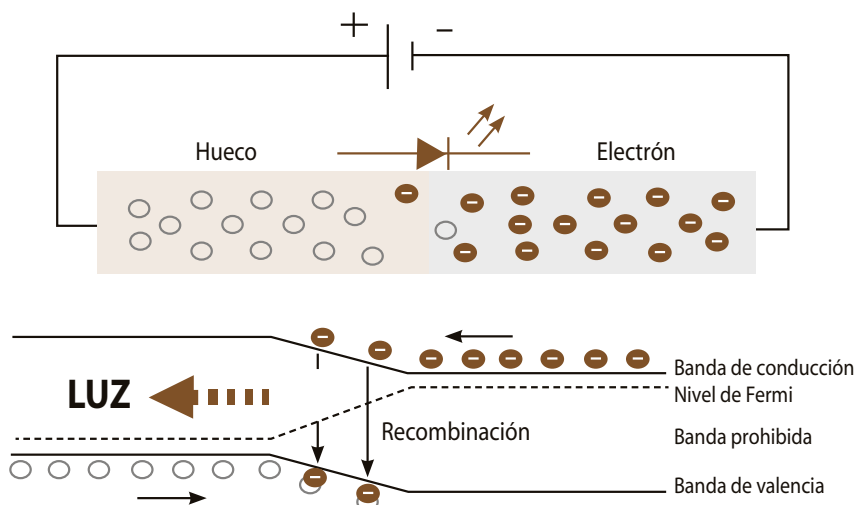


Figura 1. Luz emitida por la recombinación electrón-hueco.

El diodo entra en funcionamiento cuando polariza directamente la unión p-n, es decir, el polo positivo de la fuente conectado al ánodo del diodo y el polo negativo debe conectarse al cátodo del diodo, esto genera una corriente eléctrica, provocando una recombinación de huecos y electrones con el paso de la corriente.

ENERGÍA SOLAR EN SONORA

Sonora cuenta con una media de 320 días en el año con exposición solar y la región ha sido señalada por académicos, investigadores y especialistas en energías renovables como una gran oportunidad de explotación de un nicho de negocio incipiente en el país (Figura 2).

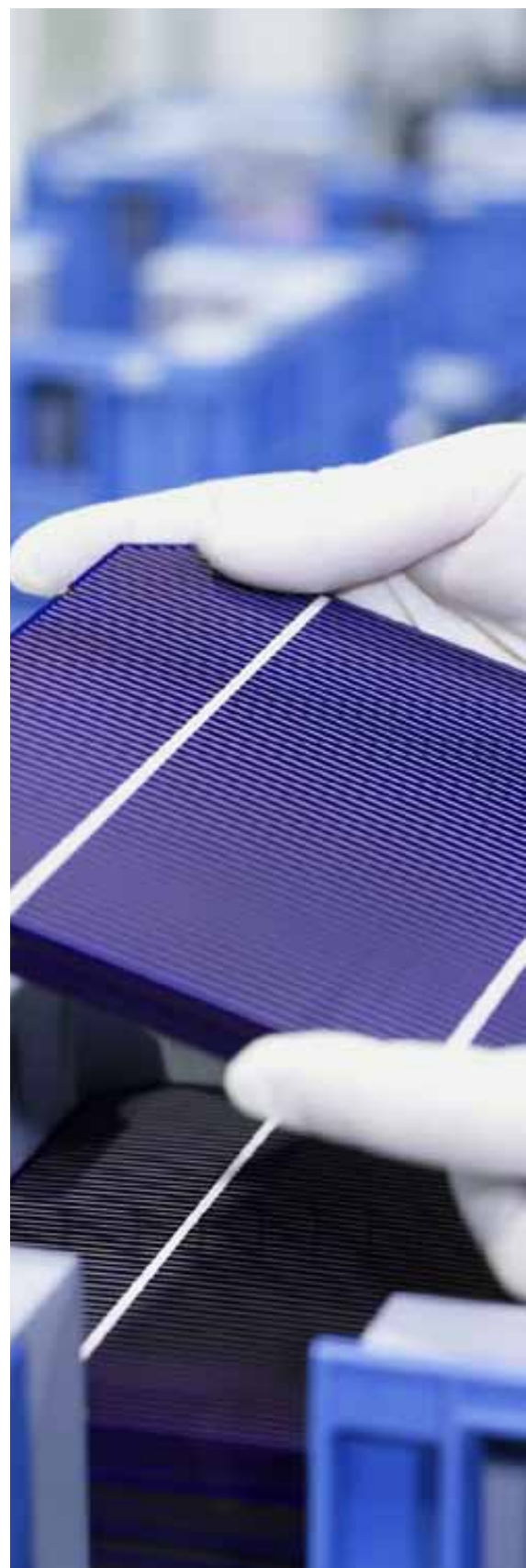




Figura 2. Radiación solar en México (<http://solmart.com.mx/que-es-energia-solar>).

Se usan diferentes unidades para expresar el valor de la insolación de un lugar, la más conveniente es el Kilowatt hora por metro cuadrado (KWh/m^2). La insolación es medida en horas de Sol efectivas. Una hora de máxima luz solar recibida por una celda equivale a una hora de Sol efectivo. Los fabricantes de paneles fotovoltaicos determinan la máxima potencia eléctrica de salida usando una fuente con una potencia luminosa de $1 KW/m^2$. Este valor, conocido con el nombre de SOL, se ha convertido en un estándar para la industria, facilitando la comparación de paneles de distintos orígenes. Se define $1 SOL = 1 KW/m^2 = 100 \text{ miliwatts/cm}^2$

La radiación que es dispersada por la atmósfera se conoce como radiación difusa y la que llega a la superficie de la tierra sin haber sufrido alteración en su trayectoria lineal desde el disco solar, se llama radiación directa. La insolación es un parámetro clave en el diseño de sistemas

basados en energía solar. Los factores principales que afectan la insolación sobre una superficie captadora son las condiciones climáticas y el ángulo de la superficie captadora con respecto a la posición del Sol.

EL FENÓMENO FOTOVOLTAICO

Cuando la luz incide sobre un semiconductor, el bombardeo de los fotones libera electrones de los átomos de silicio creando dos cargas libres, una positiva y otra negativa. El equilibrio eléctrico de la unión p-n se ve alterado por la presencia de estas nuevas cargas libres. Si en el semiconductor se conectan dos cables (uno por cada zona), se verifica la existencia de un voltaje entre los mismos (Figura 3).

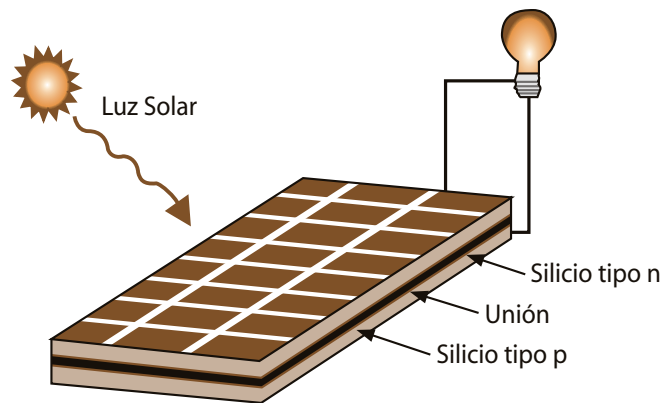


Figura 3. Celda fotovoltaica con carga eléctrica.

El voltaje de salida de un panel fotovoltaico es de corriente continua, hay un lado positivo y uno negativo. En un instante determinado, la potencia eléctrica proporcionada por la celda fotovoltaica está dada por el producto de los valores instantáneos del voltaje y la corriente de salida.

EFICIENCIA DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

La eficiencia de un sistema fotovoltaico depende de la eficiencia de sus componentes, la figura 4 muestra el mejor caso de eficiencia existente de los componentes en la actualidad (3). Con la adición de cada componente se ocasiona más pérdida, haciendo que un sistema conectado a la red sea más eficiente que uno aislado con almacenamiento de energía.

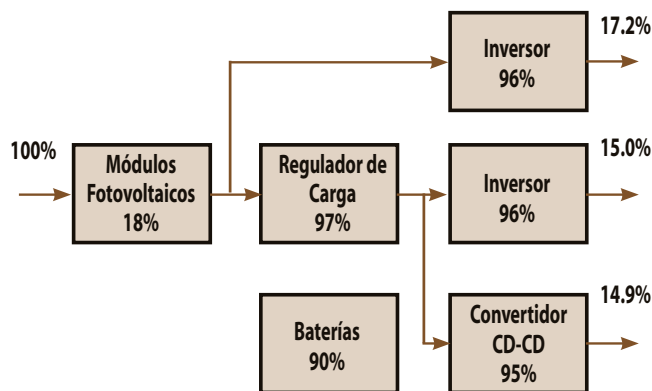


Figura 4. Eficiencia de un sistema fotovoltaico.

Se observa que el componente más crítico del sistema es el panel fotovoltaico con una eficiencia muy baja la cual es afectada por las condiciones de operación. Dado que no es posible actuar sobre las condiciones climáticas para mejorar la eficiencia del panel, surge la opción de corregir la orientación de los paneles con respecto al Sol, obteniéndose un incremento, en condiciones de laboratorio, de la eficiencia hasta de un 42.8%, pero con la utilización de un seguidor solar (4).

DESARROLLO

Para llevar a cabo la investigación es necesario conocer a priori la posición aparente del Sol. Para tal fin se empleó la herramienta *Sun Earth Tools* bajo diferentes días del año, se indica la trayectoria aparente del Sol en la figura 5.

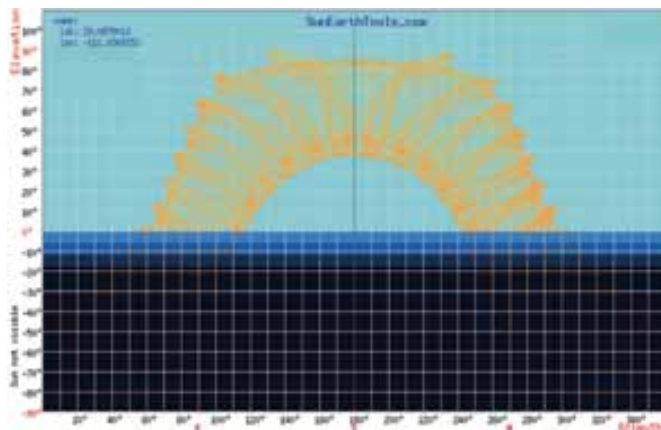


Figura 5. Simulación de trayectorias del Sol.

La prueba de simulación se realizó para la ciudad de Hermosillo, el ángulo de elevación del Sol oscila entre los 40° y 80° aproximadamente durante el transcurso del año. Se debe tomar en cuenta que los grados de elevación de la tabla 1, resultado de la simulación, son respecto a la horizontal y no del panel.

Tabla 1. Coordenadas de la ubicación geográfica del panel fotovoltaico.

Zona horaria	GTM-7	
Latitud	Norte	29° 5' 16.443"
Longitud	Oeste	111° 2' 12.9294"

DETERMINACIÓN DEL ÁNGULO DE INCLINACIÓN

La siguiente etapa del proyecto consistió en determinar el impacto del ángulo de elevación ideal del panel y corroborarlo con el sugerido por el *NREL (National Renewable Energy Laboratory)* (5) que consiste en sumar 15° a la latitud donde se encuentre el panel para estipular el ángulo de inclinación. El 4 de junio se realizó el experimento, con una elevación del panel aproximada de 80° y 12:30 horas, dado que el Sol tiene cerca de 180° de azimut.

Para obtener el ángulo idóneo y el recomendado, en el cual los rayos del Sol formen una perpendicular con el plano del panel, calcular:

- Ángulo ideal: $180^\circ - 80^\circ - 90^\circ = 10^\circ$
- Ángulo recomendado por el NREL: $29^\circ + 15^\circ = 44^\circ$



Las figuras de la 6 a la 9 exhiben las mediciones de corriente y voltaje para esos ángulos.

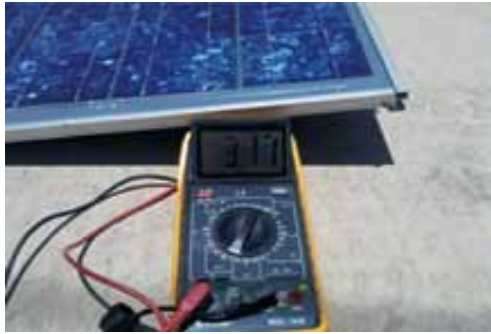


Figura 6. Prueba de corriente (I_{sc})
Elevación de 10° con un resultado de 3.17 A



Figura 8. Prueba de corriente (I_{sc})
Elevación de 44° con un resultado de 2.37 A



Figura 7. Prueba de voltaje (V_{oc})
Elevación de 10° con un resultado de 18.85 V



Figura 9. Prueba de voltaje (V_{oc})
Elevación de 44° con un resultado de 18.70 V

Como se observa en las imágenes del experimento se llega a la conclusión de que la radiación directa es la que produce amperaje y la radiación difusa el voltaje. Mientras que el ángulo de inclinación induce un cambio significativo en la corriente, no así en el voltaje.

$$3.17 \text{ A} - 2.37 \text{ A} = 0.80 \text{ A} \\ (0.80 \text{ A} / 3.17 \text{ A}) * 100 = 25.23 \%$$

$$18.85 \text{ V} - 18.70 \text{ V} = 0.15 \text{ V} \\ (0.15 \text{ V} / 18.85 \text{ V}) * 100 = 0.79 \%$$

Una vez terminada la experimentación, se realizan proposiciones basadas en la simulación consistentes en establecer un ángulo sin corrección (fijo), dos y cuatro acciones de corrección del ángulo durante el año; sin dejar atrás que entre más ajustes, mayor eficiencia dará el panel.

RECOMENDACIONES DE AJUSTE DE ÁNGULO

Ángulo fijo

En base a los grados de elevación del Sol que oscilan entre los 40° y los 80° aproximadamente (Figura 10), correspondientes a los meses de enero y junio en sus puntos mínimos y máximos de elevación, la mitad de la trayectoria está en los 60°, que no son los mismos grados del panel:

$$180^\circ - 60^\circ - 90^\circ = 30^\circ$$

Así, la primera recomendación de ángulo fijo es 30° de acuerdo a la simulación hecha con la herramienta *Sun Earth Tools*.

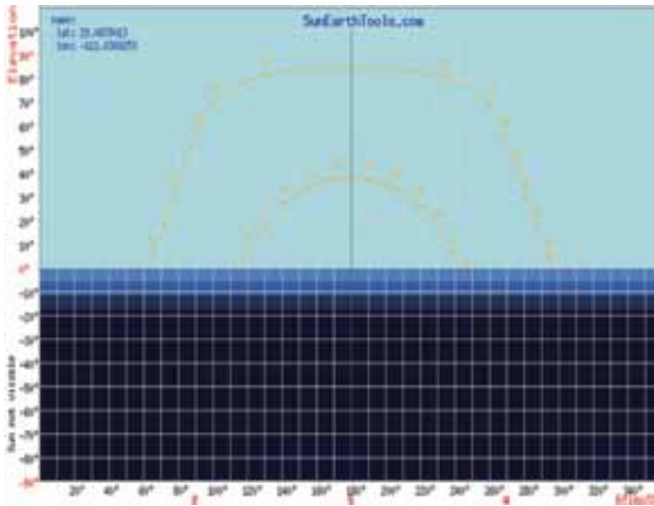


Figura 10. Puntos mínimos y máximos de elevación en enero y junio.

Dos ajustes de ángulo

En la recomendación previa de ángulo fijo se decidió establecer 60° porque es la mitad de entre los mínimos y máximos valores y justamente poder aprovechar lo mejor posible la captación solar. Ahora en la figura 11, existen 3 trayectorias en las que se recomendará ajustar el panel al centro de cada una de ellas, quedando 50° y 70° por lo que:

$$180^\circ - 50^\circ - 90^\circ = 40^\circ$$

$$180^\circ - 70^\circ - 90^\circ = 20^\circ$$

Se tienen dos ángulos, uno de 40° y otro 20° para la inclinación del panel. Estos ajustes se harán cada seis meses, en los primeros días de octubre y abril.

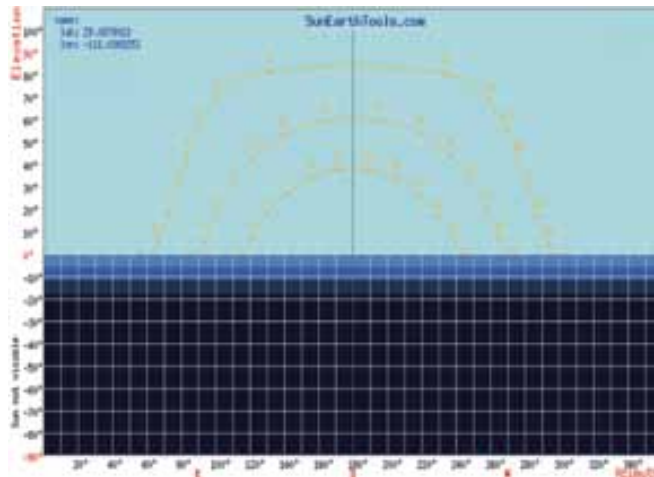


Figura 11. Tres trayectorias solares.

Cuatro ajustes de ángulo

En la sugerencia de cuatro ajustes de ángulo durante el

año, las trayectorias se muestran en la figura 12. Se plantea poseer cuatro ocasiones donde los rayos del Sol lleguen perpendicularmente al plano del panel, teniendo mayor generación de energía. Para lograr esto, se obtendrán cuatro ángulos en el centro entre cada trayectoria entonces:

$$180^\circ - 50^\circ - 90^\circ = 40^\circ$$

$$180^\circ - 80^\circ - 90^\circ = 10^\circ$$

$$180^\circ - 70^\circ - 90^\circ = 20^\circ$$

$$180^\circ - 40^\circ - 90^\circ = 50^\circ$$

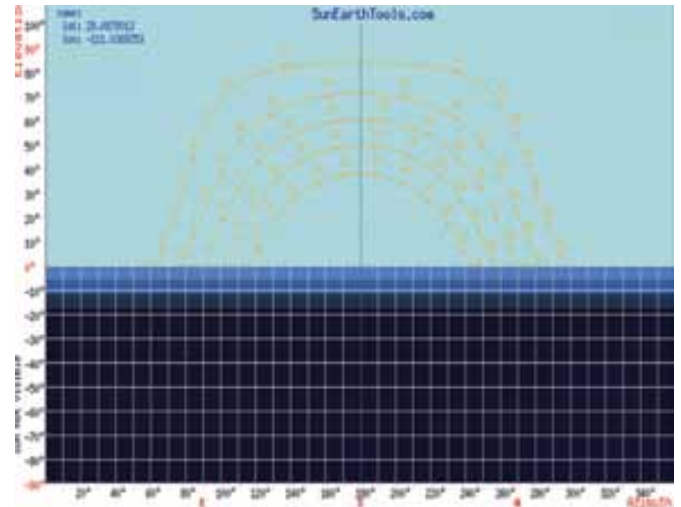


Figura 12. Cinco trayectorias solares.

La tabla 2 reúne las sugerencias de ajuste de ángulo de elevación del panel fotovoltaico para la ciudad de Hermosillo.

Tabla 2. Sugerencias de posicionamiento del ángulo de elevación del panel.

Mes	Cuatro ajustes	Dos ajustes	Fijo
Enero	40°	40°	30°
Febrero			
Marzo			
Abril	10°	20°	
Mayo			
Junio			
Julio			
Agosto	20°		
Septiembre			
Octubre			
Noviembre	50°	40°	
Diciembre			

Cálculos de generación de potencia del panel fotovoltaico

Después de determinar las horas solares pico durante un año, a continuación se expone la potencia pico que generará el panel fotovoltaico en la ciudad de Hermosillo diariamente para cada mes (Tabla 3) con los datos de insolación global de México (6).



Tabla 3. Watts-hora pico generados por el panel.

Mes	KWh/m ² por día	Horas solares pico	Watts-hora promedio
Enero	4.0	4.0	212.0
Febrero	4.6	4.6	243.8
Marzo	5.4	5.4	286.2
Abril	6.6	6.6	349.8
Mayo	8.3	8.3	439.9
Junio	8.6	8.6	455.8
Julio	6.9	6.9	365.7
Agosto	6.6	6.6	349.8
Septiembre	6.7	6.7	355.1
Octubre	6.0	6.0	318.0
Noviembre	4.7	4.7	249.1
Diciembre	3.9	3.9	206.7
Mínimo	3.9	3.9	206.7
Medio	6.0	6.0	318.0
Máximo	8.6	8.6	455.8

Nota. El panel fotovoltaico modelo VLX-53 genera 53 Watts pico si la insolación es de 1 KWh/m²

En la figura 13 se constituye el resultado completo del trabajo de investigación, se exhiben los componentes del sistema conectados; una sección del sistema cuenta con una protección de sobrecarga con fusibles para evitar daños al LED.



Figura 13. Sistema fotovoltaico de iluminación solar.

CONCLUSIONES

En nuestros días la preocupación más apremiante a la comunidad científica es el ahorro de energía en el consumo. La mayor problemática radica en el almacenamiento y no en sí la fuente, ya que existen varias alternativas energéticas. Se conoce que gran parte de la energía eléctrica la consumen los sistemas de iluminación. Puede decirse, entonces, que existe la necesidad de desarrollar nuevos sistemas de iluminación que mejoren las características de desempeño de los actuales.

Con la aparición de la tecnología LED, inició una línea de investigación encaminada a buscar otra forma de hacer más eficiente el uso de la energía en los sistemas de iluminación. Recientemente la tecnología de estado sólido tuvo una revolución trascendental debido a la creación del LED de potencia, dispositivo que presenta una alta eficiencia permitiendo competir con algunos sistemas de iluminación actuales y además tiene una vida útil mayor. Los sistemas de iluminación con LED de potencia son una real alternativa para ahorrar energía eléctrica, siendo aún objeto de investigación con diversas vertientes.

La investigación fue enfocada principalmente en el panel fotovoltaico para acceder a un panorama general de su funcionamiento bajo diferentes condiciones de operación, características eléctricas y principio de funcionamiento. El uso y aplicación del panel fotovoltaico, podrá entonces diseñarse de manera más objetiva para garantizar el funcionamiento del sistema de iluminación con una mayor eficiencia y sin problemas de abastecimiento de energía eléctrica.

BIBLIOGRAFÍA

- Hollander, J.M. (2003). *The Real Environmental Crisis*. University of California Press.
- Luque, A., Hegedus, S. (2003). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, John Wiley & Sons.
- Sandia National Laboratories (2007). *Photovoltaic Systems Research & Development*.
- Universidad de Delaware (2007). *Proyecto "Célula Solar de Muy Alto Rendimiento (VHESC)"*.
- Solar Radiation Data Manual for Flat-Plate and Concentrating Collectors* (2012). Recuperado el 1 de Junio de 2012 en: <http://rredc.nrel.gov/solar/pubs/redbook/HTML/interp.html>.
- Almanza S., R., Cajigal R., E., Barrientos A., J. (1997). *Actualización de los Mapas de Irradiación Global Solar en la República Mexicana y Reportes de Insolación de México*. Southwest Technology Development Institute, NMSU, 1999.
- Suárez, R.V., Ugalde, J.V. (2006). *Alternativas Energéticas para el Siglo XXI*, UNAM.