

OPTIMIZACIÓN DE LA EFICIENCIA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS A TRAVÉS DE RECOLECCIÓN SOLAR, BASADA EN LENTES DE FRESNEL

Omar Ormachea Muñoz*, Daniel Serna Revollo

*Centro de Investigaciones Ópticas - CIO

Universidad Privada Boliviana

oormachea@upb.edu

(Recibido el 08 de octubre 2009, aceptado para publicación el 29 de noviembre 2009)

RESUMEN

Se diseñó y construyó un prototipo funcional de un sistema fotovoltaico (SFV) con el objetivo principal de incrementar la eficiencia de sistemas fotovoltaicos convencionales. Este nuevo sistema implementa elementos de óptica y utiliza sistemas de selección de longitud de onda que permiten un uso efectivo del espectro electromagnético solar. Se obtuvo un incremento aproximado del 180% de la potencia promedio con el nuevo sistema, en comparación a los sistemas sin la modificación mencionada. Uno de los resultados más importante del método usado, es que la temperatura de las células fotovoltaicas, aún con la luz concentrada, no creció de manera significativa, en el mejor de los casos estudiados se registró un incremento de menos de 2 °C, lo que muestra que los sistemas desarrollados son muy prometedores para una implementación real práctica en los SFV convencionales, como los utilizados en el área rural de Bolivia.

Palabras Clave: Células Fotovoltaicas, Energía Solar Concentrada, Lentes de Fresnel.

1. INTRODUCCION

Células solares eficientes han estado disponibles solamente desde mediados de los años 50, aun cuando la investigación científica del efecto fotovoltaico comenzó en 1839, cuando el científico francés Henri Becquerel descubrió que corriente eléctrica podía ser producida haciendo incidir luz sobre ciertas soluciones químicas. El efecto fue observado primero en un material sólido (el metal selenio) en 1877. Este material fue utilizado durante muchos años para los fotómetros, que requerían cantidades muy pequeñas de energía. Una comprensión más profunda de los principios físicos fue provista por Albert Einstein en 1905 y Schottky en 1930, estos trabajos fueron necesarios para la construcción de células solares eficientes. En 1954, Chapin, Pearson y Fuller construyeron una célula solar de silicio que convertía el 6% de la luz solar que incidía sobre ella en electricidad. Esta clase de célula fue utilizada a partir de 1958 en usos especializados tales como satélites orbitales.

Para aplicaciones terrestres de la energía solar a través de SFV, donde el costo del panel es determinante y en el que la célula solar es el elemento que más lo encarece, el uso de nuevos métodos y técnicas para el incremento en la eficiencia de estos sistemas es de suma importancia. El costo de instalación de un SFV completo en España es de alrededor de 7€/W_p [1], mientras que en Bolivia esta relación es aún mayor, aproximadamente de 12-16\$/W_p. En ese sentido, el costo de la energía eléctrica fotovoltaica (1kWh 1-1.5 \$US), es de un orden superior con respecto a la electricidad obtenida de otras fuentes (1kWh 0.1-0.15 \$US – red eléctrica), principalmente de origen fósil (gas, carbón, petróleo, hidráulica y renovable).

En la actualidad, se están realizando grandes esfuerzos para el desarrollo de nuevos procesos de fabricación de células fotovoltaicas [1], [2], [3], [4] y están siendo explorados activamente nuevos métodos para el incremento de la eficiencia de estos sistemas [5], [6], [7], [8], como consecuencia del alza de precios de los combustibles fósiles y la polémica internacional relativa al calentamiento global.

El aprovechamiento óptimo del espectro solar en SFV, se ha ido desarrollando de manera activa en los últimos años. Se está trabajando en el desarrollo de nuevos materiales que competirán con los elementos más conocidos como son el silicio y el GaAs, tal es el caso del llamado *black-silicon*, que tiene una respuesta óptica mucho más amplia que los elementos mencionados, pudiendo utilizar el espectro solar en el rango de 300 nm a 1700 nm [2]. Se tiene además tres direcciones importantes de investigación que buscan aumentar la eficiencia de las células fabricadas con silicio, a través de técnicas basadas en un aprovechamiento más efectivo del espectro solar. Éstas son las siguientes [6], [7], [8]: *Down-conversion*, esta técnica permite dividir un fotón de alta energía en dos fotones de menor energía; *Foto-luminiscencia*, que consiste en el corrimiento o desplazamiento de los fotones de la radiación solar a una región de longitud de onda que es mejor aceptada por la célula solar; y *Up-conversion*, que es la combinación de fotones de baja energía para dar lugar a fotones de alta energía.

La importancia del estudio de técnicas y métodos para incrementar la eficiencia de paneles solares está no sólo en su extensa aplicación científica, sino también en las aplicaciones prácticas para aumentar la producción de la energía eléctrica llamada *green energy*, que en un futuro cercano, se posicionará establemente como una alternativa limpia al uso de combustibles fósiles, tomando en cuenta las nuevas normativas y leyes que se están aplicando actualmente en el mundo [9].

2. MOTIVACION Y OBJETIVOS

En Bolivia, más de 3 millones de personas que viven en comunidades y zonas alejadas del eje central, no tienen acceso a la red de energía eléctrica y cocinan sus alimentos con leña u otros elementos alternativos [10]. Esas personas se encuentran en el segmento más pobre del país. Una alternativa para estas personas cuenten con energía eléctrica, es la instalación de sistemas fotovoltaicos que les permita tener iluminación y servicios eléctricos incluso por las noches. Bajo el programa gubernamental “Electricidad para vivir con dignidad”, la ONG ENERGETICA ha implementado 12 240 instalaciones familiares fotovoltaicas en los 9 departamentos de Bolivia desde el 2001. En la Tabla 1, se muestra la relación de distribución de acceso a servicios básicos de electrificación en Bolivia [11].

TABLA 1 – RELACIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE ACCESO A SERVICIOS ELÉCTRICOS EN BOLIVIA

Área Urbana	
Sin acceso a energía eléctrica	Cocina sus alimentos con leña
127 338 hogares	98 029 hogares
Área Rural	
Sin acceso a energía eléctrica	Cocina sus alimentos con leña
577 764 hogares	575 610 hogares

Por otro lado, hasta hace poco, pensar en la posibilidad de conectar generadores fotovoltaicos a la red eléctrica convencional parecía prácticamente casi imposible. Sin embargo, en el contexto mundial, después de la energía eólica, la energía solar es la que tiene un mayor crecimiento en la inyección de electricidad a la red eléctrica. La ONG ENERGETICA conectó este año el primer generador fotovoltaico a la red eléctrica, como una experiencia piloto en Cochabamba. Esta planta piloto está conformada por 36 paneles fotovoltaicos de la marca española ISOFOTON, conformando un arreglo de 2,7 kW_p [12].

Las consideraciones anteriores han motivado la realización de la presente investigación, cuyo objetivo es diseñar y construir un prototipo funcional de un sistema de recolección de energía solar, basado en lentes de Fresnel y sistemas de selección espectral (filtros, espejos dieléctricos), para el incremento de la producción de energía eléctrica a través de paneles solares convencionales.

3. MARCO TEORICO

En este párrafo, se presenta una breve descripción del principio de funcionamiento de los sistemas fotovoltaicos convencionales, basados en silicio.

▪ Principio de funcionamiento de un sistema fotovoltaico

La tecnología fotovoltaica se basa en el efecto fotoeléctrico. Cuando ciertos materiales llamados semiconductores son expuestos a los rayos solares, los electrones de la banda de valencia pueden ser excitados a la banda de conducción. Este fenómeno es posible solamente si la energía de los fotones (rayos solares) es igual o superior al salto energético (*band gap*) que existe entre la banda de valencia y la banda de conducción del semiconductor, Figura 1. Cuando este fenómeno ocurre, la estructura física de los semiconductores crea un campo eléctrico que genera un flujo de electrones de manera que se crea una corriente eléctrica continua. A partir de ese momento, comienza el funcionamiento eléctrico convencional: la corriente continua producida llega hasta los inversores que la transforman en corriente alterna.

En el caso del Silicio cristalino, el *band gap* es de 1,1 eV [13], mientras que en el Silicio amorfo el *band gap* varía de 1,1 a 1,75 eV [14], [15], dependiendo de la composición de la aleación de Silicio. Esta situación denota una respuesta efectiva en la longitud de onda correspondiente a la banda prohibida mencionada e.g. para un *band gap* de 1,16 eV la longitud de onda más efectiva para la conversión foto-eléctrica sería de 1071 nm, correspondiente al infrarrojo cercano (IR). Sin embargo, el resto de longitudes de onda del espectro solar también tienen un aporte, aunque con una eficiencia

menor. En ese sentido, es posible una conversión foto-eléctrica óptima, no solamente trabajando con la longitud de onda efectiva, sino también, utilizando distintas partes del espectro solar y mediante técnicas de conversión de longitud de onda que posibilitan llevarlas a la zona espectral más óptima [7], [8].

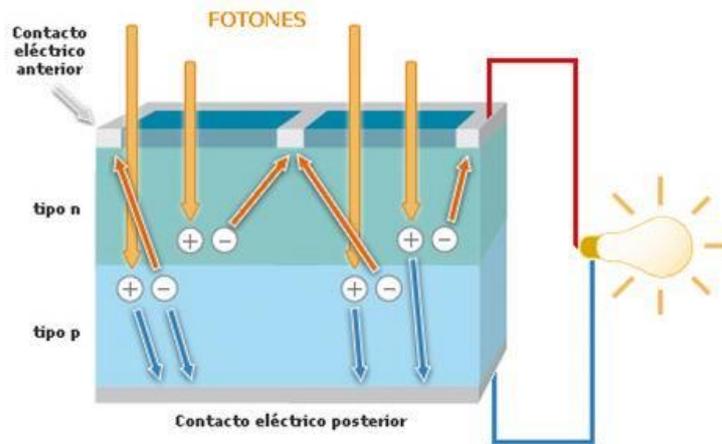


Figura 1 – Esquema de funcionamiento del efecto fotoeléctrico.

En la Figura 2 se muestra el flujo de fotones en función de la longitud de onda del espectro solar [16] que llega a la superficie terrestre, después de pasar a través de la atmósfera. Las líneas verticales negras corresponden al *band gap* y al doble del *band gap* del silicio cristalino. Todos los fotones con longitudes de onda mayores al *band gap* del Silicio son transmitidos a través de la sustancia cristalina (líneas oblicuas) y no son aprovechadas efectivamente en el proceso de conversión foto-eléctrica. Por otro lado, los fotones con menores longitudes de onda, a la longitud de onda que corresponde al doble del *band gap* o con exceso de energía (líneas cruzadas), pueden crear pares de electrones – huecos adicionales por fotón, aunque contribuyen mayoritariamente a efectos térmicos. Los fotones de la banda espectral entre estas dos líneas son los que dan el mayor aporte en la conversión foto-eléctrica.

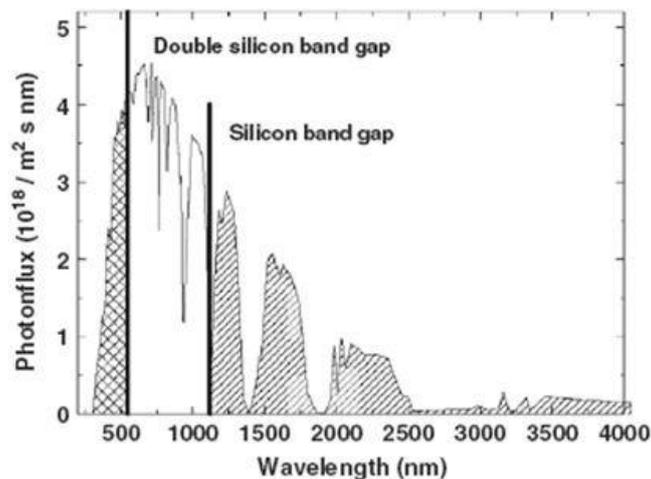


Figura 2 – Espectro solar, las líneas verticales muestran el “band gap” y dos veces el “band gap” del silicio [16].

Existen estudios amplios sobre materiales ópticos para su uso en el proceso de *down-conversion* y *foto-luminiscencia*. Los materiales luminiscentes absorben fotones con energías altas y nuevos fotones son emitidos en longitudes de onda mayores. Un uso adecuado de estos materiales permite el aprovechamiento de fotones que no entran en la región óptima de longitud de onda de la célula solar. Últimamente, se están utilizando películas delgadas con vidrio recubierto con Eu en gel y diseños tipo sándwich, con el objeto de desplazar parte de la radiación correspondiente al espectro UV-cercano hacia la región caracterizada por líneas de emisión cercanas a 600 nm, que entran en la parte eficiente de conversión fotovoltaica del silicio [6].

En la Tabla 2 se muestra la eficiencia de conversión foto-eléctrica de los paneles solares basados en Silicio. Se observa claramente que, por el momento, las eficiencias alcanzadas no son muy altas, lo que explica la activa investigación experimental y teórica actual para incrementarla. Una línea de investigación muy prometedora es el uso de radiación solar concentrada, se han diseñado y construido colectores solares de diferentes tipos, entre los cuales se están utilizando métodos innovadores como la holografía [17, 18]. Se están desarrollando igualmente nuevos materiales fotovoltaicos resistentes a altas temperaturas [1] e implementando técnicas simples para el control del incremento de la temperatura y de su influencia en la eficiencia de los paneles solares [5].

TABLA 2 – EFICIENCIA EN LABORATORIO Y PRODUCCIÓN DE PANELES SOLARES BASADOS EN SICILIO

Material	Eficiencia en laboratorio (%)	Eficiencia en producción (%)
Silicio Monocristalino	24	14 – 17
Silicio Policristalino	18	13 – 15
Silicio Amorfo	13	5 - 7

Es importante mencionar, que uno de los parámetros fundamentales que influyen en la eficiencia y la vida útil de estos elementos es la temperatura. En los sistemas fotovoltaicos, la eficiencia de los mismos decrece con el aumento de la temperatura e.g. en el caso del silicio se tiene un $dV/dT = -2,09 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ y para el GaAs $dV/dT = -1,76 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, lo que significa que la influencia de la temperatura es tal que las células solares de Si pierden 2,09 mV por cada grado de aumento de temperatura, en tanto que las de GaAs pierden 1,76 mV [1]. Generalmente, los paneles solares tienen parámetros óptimos de funcionamiento que garantizan una vida útil muy larga (40 años), sin embargo, en situaciones reales, estos parámetros, fundamentalmente la temperatura, están muy por encima de dichos parámetros óptimos.

▪ **Tipos de células fotovoltaicas**

- **Silicio Monocristalino**

Actualmente, la mayoría de las células del mercado son monocristalinas. El proceso de fabricación es el siguiente: El Silicio se purifica, se funde y se cristaliza en lingotes. Los lingotes son cortados en finas obleas para hacer células individuales. Las células monocristalinas tienen un color uniforme, generalmente azul o negro.

- **Silicio Policristalino**

Las células policristalinas se fabrican de forma similar a las monocristalinas. La principal diferencia es que se utiliza un Silicio de bajo costo. Generalmente, redundando en una reducción en la eficiencia, pero los fabricantes defienden que el precio por kW es menor. La superficie de las células policristalinas tiene un patrón aleatorio de cristalización en lugar del color homogéneo de las células monocristalinas.

- **Silicio Ribbon**

Las células fotovoltaicas tipo *Ribbon* se realizan mediante el estiramiento de Silicio fundido, en lugar de utilizar lingote. El principio de funcionamiento es el mismo que en el caso de las células monocristalinas y policristalinas. El recubrimiento anti-reflectivo utilizado en la mayoría de las células *ribbon* tiene una apariencia prismática multicolor.

- **Silicio amorfo**

El Silicio amorfo ofrece un coeficiente de absorción mayor que el Silicio cristalino en el espectro visible. De esta forma, el espesor de Silicio amorfo puede ser menor de 1 μm . Generalmente, la célula amorfa consiste en una unión p-i-n (o n-i-p): una capa transparente de TCO (Óxido conductor transparente) en la parte frontal y una capa metálica como contacto y reflector trasero. En la Figura 3 se muestra el esquema explicativo de la estructura del Silicio amorfo y la energía del *band gap*. Una de las ventajas de las células de Silicio amorfo es que pueden fabricarse a una temperatura de deposición relativamente baja, generalmente entre 200-500 $^\circ\text{C}$, lo que permite el uso de varios sustratos de bajo costo. Por otro lado, una desventaja es que sufre una degradación debido a la luz al inicio de su operación.

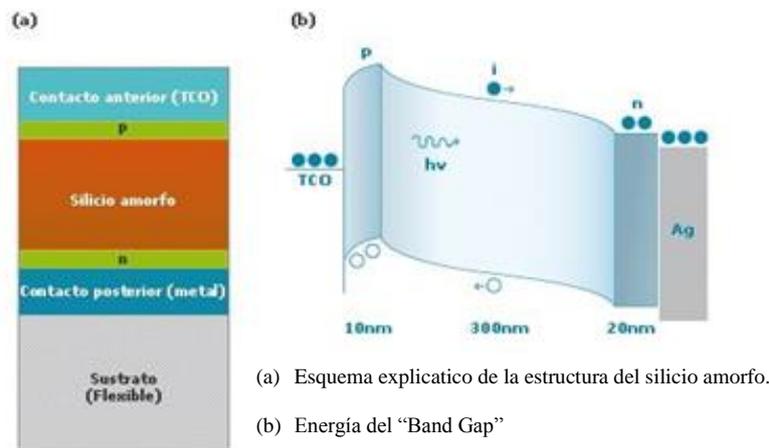


Figura 3 – Esquema de los niveles del sistema fotovoltaico basado en silicio amorfo.

4. CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO (SFV) DE ALTA EFICIENCIA

El sistema fotovoltaico de alta eficiencia comprende elementos de Silicio, elementos de óptica y un sistema de selección espectral, y está basado en la combinación de diferentes elementos ópticos y diferentes principios de funcionamiento. Para un SFV es de vital importancia el nivel de radiación solar local, en este caso se dará una descripción de los niveles de radiación en el departamento de Cochabamba donde se realizaron las pruebas experimentales.

▪ Nivel de radiación solar en Cochabamba

Para la implementación de un sistema fotovoltaico, es fundamental conocer los niveles de radiación solar recibida en el año, ya que esta información permite evaluar cuan óptimo será el sistema y definir la inversión económica que requerirá satisfacer las necesidades locales.

Bolivia, en relación con Europa, recibe más del doble de radiación solar promedio, lo cual hace que los sistemas fotovoltaicos tengan un rendimiento más alto en términos de generación de energía eléctrica. Bolivia se encuentra en la franja de territorio que a nivel mundial recibe mayor radiación solar. Esto hace que la energía solar se considere como una fuente de energía renovable ampliamente disponible en el país.

Cochabamba, de manera particular, recibe un nivel de radiación bastante alto. La media anual de radiación global más baja es entre 4,2 y 4,5 kWh/m²-día, se da en la región noreste que es la zona de baja altitud (entre 1000 a 235 m.s.n.m), caracterizada por su clima tropical y alta humedad, lo que genera una mayor dispersión de la radiación solar [19]. En la zona suroeste la radiación solar aumenta a valores entre 5,7 y 6,3 kWh/m²-día, esta región se localiza la Cordillera Oriental Central y se caracteriza por su clima seco. Se puede estimar que el promedio anual de radiación solar para el Municipio de Cercado, está en 5,44 kWh/m²-día [12]. En la Figura 4 se muestra la distribución promedio de radiación solar global para el departamento de Cochabamba. Considerando un día solar de 8 horas, el promedio anual es de 680 W/m², teniendo niveles de radiación máximo de 787,5 W/m² y mínimo de 556,25 W/m². En Europa existe mucha diferencia entre los niveles de radiación solar según la estación del año y región; en el sur de Europa por ejemplo, la radiación solar máxima está en el rango de 582,2 a 616,4 W/m² y en el norte de Europa oscila entre 239,7 y 410,9 W/m² [20].

▪ Montaje experimental

Los componentes principales para un SFV con optimización de su eficiencia son los siguientes:

- **Óptica:** Comprende elementos de óptica como espejos y lentes Fresnel que sirven para concentrar la radiación solar en un punto donde se coloca la célula fotovoltaica. Filtros ópticos, que pueden ser celuloideos coloreados, películas reflectantes metálicas, espejos dieléctricos, elementos destinados a la selección espectral del sistema.
- **Célula fotovoltaica:** Es el elemento donde se lleva a cabo el efecto fotoeléctrico produciendo corriente continua.

- **Elementos mecánicos:** Destinados a la sujeción de los sistemas ópticos de recolección, selección espectral y celdas fotovoltaicas.

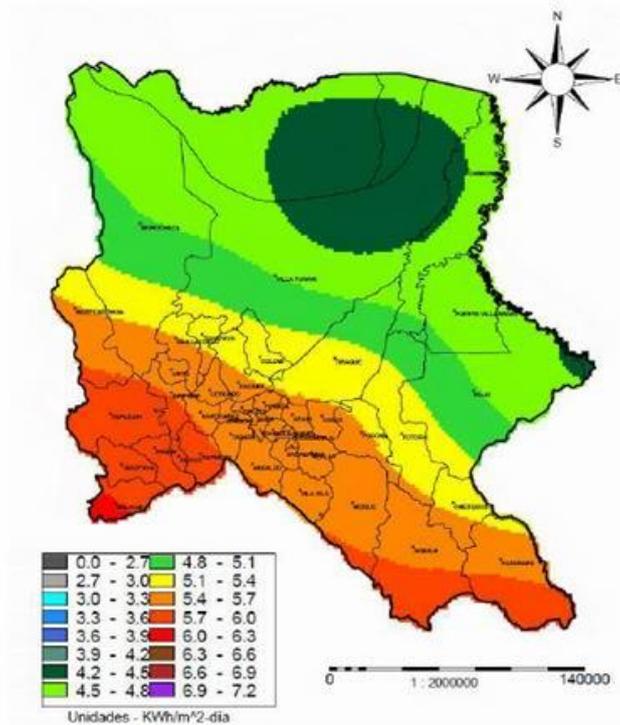


Figura 4 – Promedio anual de radiación solar para el departamento de Cochabamba [12].

El montaje del sistema fue realizado en un almacén de aluminio, donde se posicionó el sistema de selección espectral (filtros neutros, celuloideos coloreados y espejos dieléctricos, alternativamente), la célula fotovoltaica y el lente de Fresnel (éste fue reciclado de un proyecto de transparencias, para aplicaciones reales se tiene planificado el uso de la holografía para su fabricación utilizando polímeros transparentes que son más livianos y pueden resultar de menor costo en una producción a gran escala). Para poder realizar comparaciones se montó una célula adicional fuera de la implementación óptica. La célula fotovoltaica utilizada en estas experiencias fue de Silicio amorfo. El área circular de interacción con la radiación solar fue de 19,63 cm².

Para la medida de la potencia de los dos sistemas a comparar, las medidas de voltaje y corriente fueron obtenidas a través de una carga, un diodo LED de color rojo. En el experimento se observó claramente que el diodo conectado al sistema con óptica implementada brillaba con mayor intensidad, en comparación al segundo sin colector solar. En la Figura 5 se muestra el esquema de recolección, selección espectral y prototipo funcional experimental de un SFV con óptica implementada para la optimización de la eficiencia energética.

Se realizaron una gran cantidad de mediciones experimentales con distintos elementos ópticos, como elementos espectro-separadores, entre ellos:

- **Celuloideos coloreados**, estos elementos permiten el filtraje de sectores del diapasón visible de acuerdo con el color del celuloide y de las capas usadas.
- **Películas reflectantes**, estos elementos poseen diferentes porcentajes de reflexión en el espectro electromagnético, la fabricación de estos elementos está basada en el dopaje metálico de su superficie.
- **Espejos dieléctricos**, gracias a su configuración de múltiples capas de materiales transparentes, pero con distintos índices de refracción estos elementos que pueden soportar altas intensidades de radiación electromagnética en diferentes diapasones del espectro visible. Su principio de funcionamiento es la interferencia.

Uno de los problemas más importantes con este tipo de sistemas, es el aumento drástico de la temperatura del sistema fotovoltaico debido a la acción de luz altamente concentrada. Una revisión bibliográfica extensa muestra que la refrigeración forzada de estos sistemas con óptica implementada, en base a líquidos refrigerantes como ser agua, es muy

incómoda y existen muchos inconvenientes en su manejo, además de aumentar los costos de diseño y construcción, incluso cuando se puede utilizar el calor excedente producido por el sistema de recolección solar.

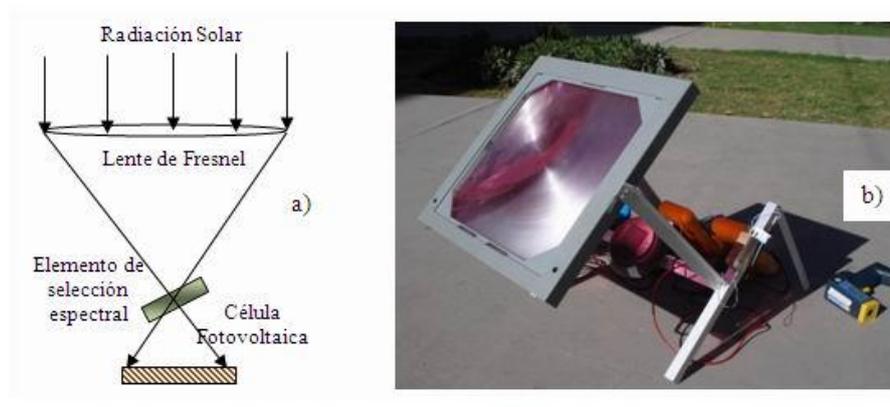


Figura 5 – (a) Esquema de recolección y selección espectral, (b) Fotografía del prototipo funcional.

▪ Resultados

El uso de elementos espectro-separadores tiene la ventaja de que la célula fotovoltaica al recibir energía lumínica concentrada, sufre un incremento de temperatura muy aceptable y, en algunos casos, no es necesaria la refrigeración forzada.

Se obtuvieron resultados muy interesantes con el uso de varias capas de filtros. Los filtros usados (celuloides coloreados) se posicionaron en la parte posterior a la lente de Fresnel. En la Figura 6 se muestra el espectro de transmisión de varias capas de celuloide rojo, éstas eliminan casi por completo la radiación ultra-violeta y visible, comprendido entre 200-600 nm, dejando pasar la radiación infrarroja. Este tipo de filtros es de fácil manejo y muy económico, muy pertinente para el proyecto. En la Figura 7 se muestra la dependencia de la temperatura y la corriente en función del tiempo, en estas figuras los puntos cuadrados corresponden a las dependencias bajo concentración solar, mientras que los puntos circulares son los datos obtenidos sin concentrador.

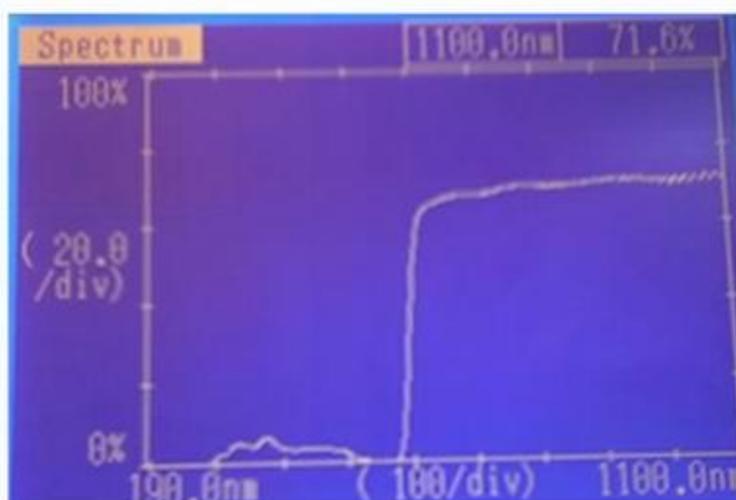


Figura 6 – Espectro de transmisión de celuloide rojo.

El uso de espejos dieléctricos, en cuanto a su fijación y posicionamiento, es un poco más complejo y se requirieron elementos especiales para su sujeción, cerca al foco de la lente de Fresnel. La peculiaridad de estos elementos es que puede soportar intensidades muy altas (unos cuantos GW/cm^2). Se utilizó un espejo dieléctrico que transmite con un alto porcentaje de eficiencia la radiación del diapasón infrarrojo (IR) y refleja gran parte del espectro visible alrededor de 532 nm.

Se utilizaron también películas reflectantes con diferentes índices de reflexión. Estos elementos tienen la particularidad que dejan pasar todo el espectro con un bajo porcentaje de transmisión, Figura 8, incluyendo el IR, responsable del calentamiento de la célula fotovoltaica y que corresponde a la región del espectro superior a los 850 nm. Sin embargo, gracias a la concentración de la luz, la transmisión del espectro visible es mayor que la del IR, dando lugar a una ganancia substancial del SFV con la óptica indicada.

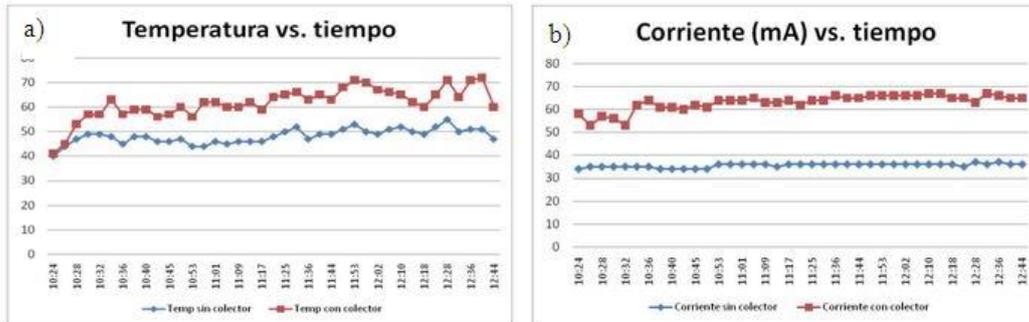


Figura 7 – Para celuloide rojo: (a) Dependencia termal en función del tiempo, (b) Corriente en función del tiempo.

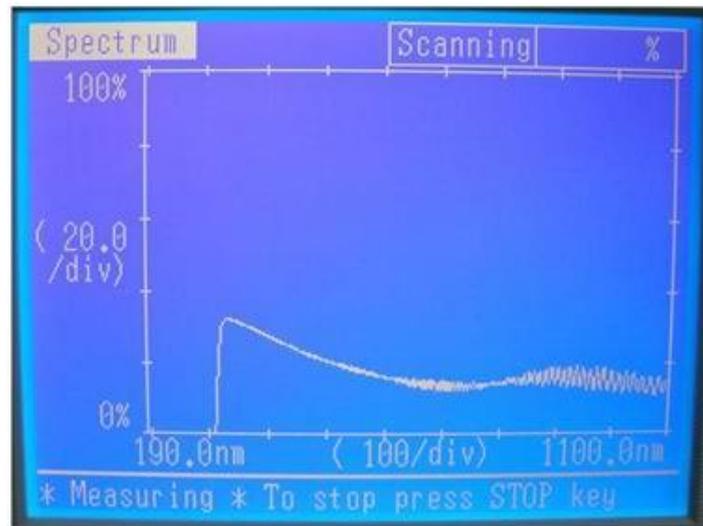


Figura 8 – Espectro de transmisión de película reflectante.

Los mejores resultados obtenidos, en cuanto a relación ganancia-temperatura se muestran en la Figura 9.

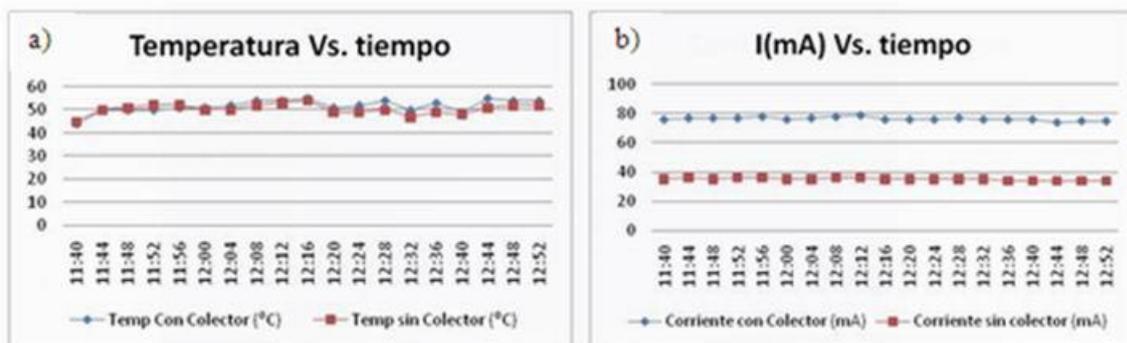


Figura 9 – Para película reflectante: (a) Dependencia termal en función del tiempo, (b) Corriente en función del tiempo.

Estas medidas fueron realizadas con el uso de una película reflectante como elemento espectro-separador, en este caso se muestra que con un sistema de este tipo se obtiene una ganancia en la corriente, de aproximadamente un 120% y prácticamente sin incremento en la temperatura de la célula fotovoltaica. En este caso los puntos circulares corresponden a las dependencias bajo concentración solar, mientras que los puntos cuadrados son los datos obtenidos sin concentrador.

En la Tabla 3 se muestran valores promedios de la eficiencia fotovoltaica con la inclusión de óptica implementada y los valores de ganancia en comparación a un sistema sin recolección solar. Esta ganancia es con relación a un sistema sin la implementación óptica, como se mencionó anteriormente, pero cuya célula fotovoltaica también fue posicionada de manera óptima en relación al sol.

TABLA 3 – RELACIÓN TEMPERATURA Y EFICIENCIA DE SFV CON ÓPTICA IMPLEMENTADA

Elemento espectro-separador	T (°C) sin colector	T (°C) con colector	I (mA) sin colector	I (mA) con colector	Ganancia (%)
Celuloide rojo	48.0	62.0	36.0	63.0	75
Celuloide verde	52.0	68.5	37.0	50.3	36
Celuloide azul	52.6	71.6	36.1	53.6	48
Película reflectante	50.3	51.7	35.0	76.4	118
Espejo dieléctrico	52.7	62.6	35.2	56.7	61

En la Figura. 10 se muestra las medidas obtenidas de la potencia promedio en función de las horas, para un día despejado y tres diferentes disposiciones experimentales:

Estas medidas experimentales fueron realizadas con una diferencia de temperatura promedio entre 2 a 7°C bajo la acción de luz altamente concentrada por el lente de Fresnel, esta diferencia de temperatura con relación a la del medio ambiente no es sustancial para diseñar un sistema de refrigeración forzada.

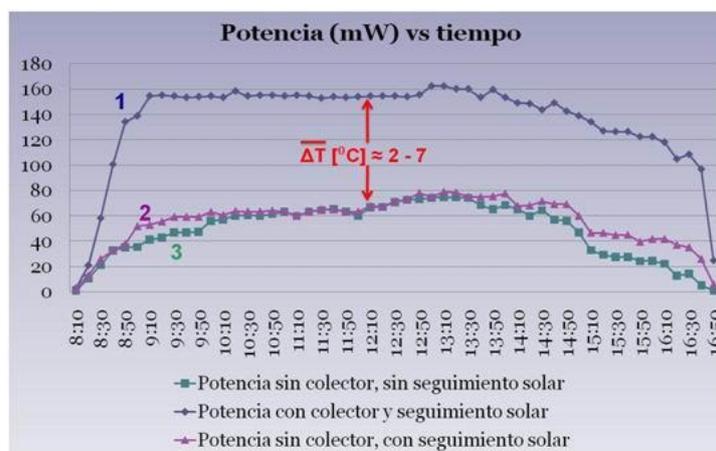


Figura 10 – (1) Potencia promedio en un día solar del sistema con óptica implementada, (2) Sistema sin la implementación óptica posicionable y (3) Sistema sin la implantación óptica estacionaria.

Las tres disposiciones experimentales en las cuales se obtuvieron los datos son las siguientes:

- (1) Célula fotovoltaica con sistema de recolección solar y sistema de selección espectral.
- (2) Célula fotovoltaica de referencia con posicionamiento óptimo en relación al sol.
- (3) Segunda célula fotovoltaica de referencia, estacionaria, con un ángulo de inclinación de 20° con respecto a la horizontal y una orientación norte-sur.

A partir de estas disposiciones experimentales se puede concluir, que la potencia promedio de ganancia del sistema con la óptica implementada es de aproximadamente del 180%, en comparación a la célula fotovoltaica referente estacionaria.

5. CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó un prototipo funcional de un SFV con óptica implementada, con una potencia promedio de ganancia de un 180% sin un incremento sustancial de temperatura. Este tipo de sistemas son muy prometedores para su futura implementación en áreas donde no se tiene acceso a la red eléctrica, especialmente en el área rural. Los elementos usados son de relativamente fácil acceso y costos bajos.

Se planea la construcción de un arreglo de un SFV, con seguimiento solar y de una potencia nominal de 20Wp, destinado a hogares rurales y urbanos periféricos, que tendrá un costo inferior a los SFV convencionales y tendrá un incremento de potencia a través de la implementación óptica. En cuanto a los lentes de Fresnel se tiene planificado el uso de la holografía para la fabricación de colectores más económicos y livianos para una implementación práctica real en SFV de bajo costo.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la cooperación de la ONG – ENERGÉTICA, en la persona del Ing. Miguel Fernández, director de la ONG, y el Dr. Omar Arzabe, responsable de I&I, por su apoyo al desarrollo de este trabajo y la dotación de elementos fotovoltaicos que fueron empleados en las experiencias experimentales.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] C. Algora et al., *Células solares de semiconductores III-V para la generación de electricidad a costes competitivos*, REF, Enero-Marzo 1996, pp. 32 - 38.
- [2] J.E. Carey and J. Sickler. *Black silicon sees further into the IR*, Laser Focus World, August - 2009, pp. 39 - 44.
- [3] M. Kondo et al. "Key issues for fabrication of high quality amorphous and microcrystalline silicon solar cells", *Thin Solid Films*, vol. 501, 2006, pp. 243 - 246.
- [4] M.J. Keevers and M.A. Green, "Extended infrared response of silicon solar cells and the impurity photovoltaic effect," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 41-42, 1996, pp. 195 - 204.
- [5] M. Abdolzadeh and M. Ameri, "Improving the effectiveness of a photovoltaic water pumping system by spraying water over the front of photovoltaic cells," *Renewable Energy*, vol. 34, 2009, pp. 91 - 96.
- [6] T. Fukuda et al. "Wavelength conversion film with glass coated Eu chelate for enhanced silicon-photovoltaic cell performance," *Optical Materials*, 2009, in press.
- [7] C. Strumpel et al. "Modifying the solar spectrum to enhance silicon solar efficiency – An overview of available materials," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 91, 2007, pp. 238 - 249.
- [8] E. Klampafitis et al. "Enhancing the performance of solar cells via luminescent down-shifting of the incident spectrum: A review," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 93, 2009, pp. 1182 - 1194.
- [9] CYTED, *Guías de normas y protocolos técnicos para la electrificación rural con energías renovables*, 2009.
- [10] G. Rodriguez, G. Rojas, *Energía y pobreza*, Petro – Press, Mayo - 2007, pp. 3.
- [11] G. Rodriguez y G. Rojas, *Indigencia energética en Bolivia*, Petro – Press, Mayo - 2007, pp. 7.
- [12] Industria Energía & Ambiente - boletín informativo de ENERGÉTICA, *Generador fotovoltaico conectado a la red, experiencia piloto en Cochabamba-Bolivia*, IEA, vol. 18, 2009.
- [13] L. Sigaut y P. Knoblauch, *Determinación de la banda prohibida de energía del silicio*, Universidad de Buenos Aires, 2009, pp. 1 - 5.
- [14] HELIOS resource. Internet: <http://www.hr-pv.com/?id=5&n=27&subaction=detail&lang>
- [15] ABENGOA SOLAR, Energía Solar para un mundo sostenible. Internet: http://www.abengoasolar.com/sites/solar/es/tecnologias/fotovoltaica/que_es
- [16] S. Wenham et al. *Applied Photovoltaics*, UNSW Photovoltaics, 2007.
- [17] M. J. O'Neil et al., *Ultra-light stretched Fresnel lens solar concentrator for space power applications*, SPIE, 5179, 2003, pp. 116 - 126.
- [18] R. Xuechang et al. *Fabrication of holographic Fresnel lens used as solar concentrator*, SPIE, 6832, 2007, pp. 1N-1 – 1N-7.
- [19] Industria Energía & Ambiente - boletín informativo de ENERGÉTICA, *Estimación de la radiación solar global para Cochabamba utilizando modelos de sistemas de información geográfica e imágenes satelitales*, IEA, vol. 17, 2009.
- [20] Sun Networks. Internet: http://www.sun-networks.org/html/-_radiacion_solar.html