

## ENERGIA ELECTRICA - LA CONVERSION DIRECTA DE LA ENERGIA SOLAR EN ELECTRICIDAD.



**Shyam S. Nandwani, Ph.D.**

**Profesor Retirado, Universidad Nacional, Costa Rica (Central America)**

**Tel: (506) 83737204, 22603293**

**E mail: [snandwan@yahoo.com](mailto:snandwan@yahoo.com), [shynandwani@gmail.com](mailto:shynandwani@gmail.com)**

**[www.doctornandwanisolarcook.org](http://www.doctornandwanisolarcook.org)**

**Julio 2013.**

---

Miembro actual y anteriores : International Solar Energy Society (ISES), **Alemania**; Solar Cookers International, Sacramento, **EUA**, World Renewable Energy Network (WREN), **Inglaterra**, the Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics (ICTP), Trieste, **Italia**, Colegio de Fisico, **Costa Rica**.

Red Iberoamericana de Secado Solar de Productos Agroalimenticia (RISSPA/ CYTED) **Argentina**, Red Iberoamericana de Cocción Solar de Alimentos (RICSA/CYTED), **Argentina**, Red Iberoamericana de Transferencia Tecnología de Energías Renovables (RITTAER/ CYTED), **Brasil**, Red Iberoamericana de Aplicaciones Sustentables de Energía Fotovoltaico (RIASEF/ CYTED), **Perú**, Asociación Costarricense de Energía Solar (ACES), **Costa Rica**.

## 1. INTRODUCCION:

En otros folletos hemos hablado el uso de energía solar para diferentes aplicaciones térmicas o calóricos, como cocción de alimentos, calentamiento de agua, purificación de agua y deshidratación del productos etc., donde en realidad necesitamos calor para este trabajo, aunque estamos (mayoría) acostumbrado a electricidad por comodidad. En cambio hay dispositivos como bombillos, TV, Radio etc., donde necesitamos electricidad para su funcionamiento. Ahora energía solar si puede transformar en electricidad, por efecto foto térmico, donde calor producido por energía solar puede calentar agua/aceite a alta temperatura, la cual produce vapor. Este vapor posteriormente sirve para mover turbina para producir energía mecánica la cual usando generador se puede transformar en energía eléctrica, como una planta termo eléctrico. Existen a nivel mundial estos tipos de planta (termo solar eléctrico) de hasta 500 MW. Sin embargo hay otra forma de transformar energía solar en electricidad pero directamente solo usando un dispositivo Celda o Panel Solar (Efecto fotovoltaico),

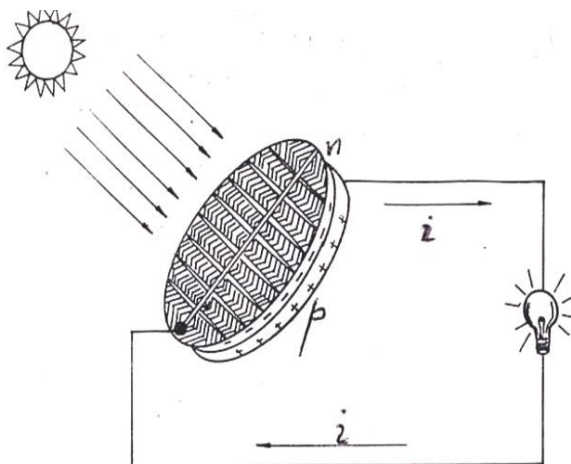
## 2. CONCEPTOS FÍSICOS DEL EFECTO FOTOVOLTAICO

En las palabras simple, la radiación solar se puede transformar directamente en electricidad por medio de aparatos, celdas solares o pilas solares, los cuales son semiconductores puros drogados con cantidades diminutas (1ppm) de otros elementos.

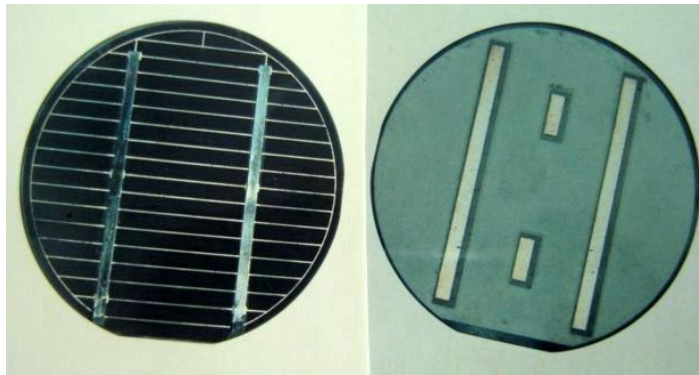
Dispositivos electrónicos que transforman luz (radiación electromagnética) directamente en electricidad son llamados *celdas fotovoltaicas* y el fenómeno que causa esta transformación de energía radiante en energía eléctrica es llamado *efecto fotovoltaico (FV)*.

Podemos dar una "explicación" cualitativa del efecto Foto Voltaico aunque para poder usar eficientemente un panel solar no se requiere entender los fenómenos físicos que generan en él la electricidad, es suficiente conocer las propiedades eléctricas del panel solar.

La gran conductividad eléctrica de un metal es causada por un gran número de electrones que se mueven casi libremente en el metal, pero para extraer uno de estos electrones del metal se requiere una energía mayor que cierto mínimo, que tiene un valor característico para cada metal y es típicamente del orden de algunos eV (electrón Voltio). Si inciden sobre el metal fotones (puede ser Radiación electromagnética proveniente un bombillo o del sol) con una energía mayor que esta energía mínima, algunos fotones son absorbido y su energía transferida a electrones que son liberados del metal hacia el exterior, produciendo así el efecto fotoeléctrico. Un dispositivo diseñado para observar el efecto fotoeléctrico es llamado celda fotoeléctrica o fotocelda (Fig. 1)



**Fig. 1. Principio de un celda solar para la conversión directa de energía solar en electricidad.**



**Fig. 2. Una celda solar para la conversión directa de energía solar en electricidad (parte superior y inferior).**

Desde un punto de vista práctico, un panel fotovoltaico sobre el cual incide luz, genera un voltaje y una corriente eléctrica continua (directa) y puede ser usado en reemplazo de una pila o batería eléctrica para suministrar electricidad para cualquier uso.

En un semiconductor existen relativamente pocos electrones disponibles para la conducción eléctrica. La mayor parte de los electrones están localizados alrededor de átomos, sin posibilidad de desplazarse. Con una energía característica del semiconductor, típicamente del orden de 0.5 - 1 eV, se puede liberar un electrón de su ligadura con un átomo determinado. Este electrón puede moverse casi libremente en el semiconductor y contribuye así a su conductividad eléctrica. Si inciden sobre el semiconductor fotones con una energía mayor que esta energía, los fotones son absorbidos y su energía es usada para liberar electrones localizados. Estos electrones pueden moverse ahora dentro del semiconductor, produciendo una fotoconductividad (es decir un aumento de la conductividad eléctrica si incide radiación apropiada), fenómeno llamado también efecto fotoeléctrico interno. En el semiconductor más usado actualmente, el silicio, esta energía mínima (llamada también ancho de la banda prohibida) es 1.1 eV, correspondiendo a un fotón infrarrojo.

La conductividad eléctrica de un semiconductor puede ser controlada, incorporando al semiconductor impurezas, es decir otros átomos. Unas pocas partes por millón de átomos de, por ejemplo, fósforo, o boro, en un semiconductor de silicio, no solamente cambian fuertemente la magnitud de la conductividad, sino también los mecanismos de la misma. **Impurezas de fósforo** introducen más electrones que las requeridas para las ligaduras con los átomos vecinos de silicio, contribuyendo a la conductividad electrónica y obteniéndose un **semiconductor llamado tipo n**. **Impurezas de boro** tienen, por otro lado, menos electrones que las necesarias para sus ligaduras (enlaces químicos) con sus vecinos de silicio, resultando vacancias electrónicas. Se obtiene así un **semiconductor tipo p**, que tiene un mecanismo de conductividad eléctrica diferente, basado en el movimiento de las vacancias de electrones (llamadas también huecos).

Una celda solar típica está formada por dos capas delgadas de silicio, cada uno de ellas con un alambre (+ y -) incorporado cuyo extremo sale al exterior.

La unión entre dos capas crea una diferencia de potencial. La luz solar o visible induce a los electrones libres a moverse por el alambre de la capa tipo N hacia la capa de tipo P, con lo que se produce una corriente eléctrica (Fig. 2).

Si en un semiconductor, inciden fotones con una energía mayor que la requerida para liberar un electrón de su localización en un enlace, estos fotones son absorbidos y se generan pares de electrones y de huecos

libres (esto es el efecto de fotoconductividad, descrito arriba). Ocurre esto en la región de interfase de un diodo P-N, debido a la fuerza sobre los electrones generada por el campo eléctrico existente en la interfase, estos electrones son empujados a la región n, y los huecos a la región p. Se produce así una tensión eléctrica, y si los dos contactos del diodo están conectados a una resistencia externa, fluye una corriente eléctrica. Este fenómeno es llamado efecto fotovoltaico, y representa una transformación directa de la energía radiante en energía eléctrica

Cada celda de silicio produce cerca de 0.58 voltios y varias celdas pueden conectarse eléctricamente en forma de serie y/o paralelo, para formar un módulo (con mayor voltaje o mayor corriente), que es una unidad básica de los sistemas eléctricos solares.

Varios conductores pueden emplearse, pero se prefiere el de silicio por razón de abundancia, costo (~US\$5-10/Vatio), y principalmente por estabilidad y rendimiento (~10-15%). Es decir la electricidad producida por una celda solar de 1m<sup>2</sup>, la cual está expuesta a radiación solar de 1000 Vatios/m<sup>2</sup>, será de 100-150 Vatios.

La temperatura tiene una influencia importante: al aumentar la temperatura aumenta ligeramente la corriente, pero disminuye más la tensión, con el resultado que la potencia disminuye 0.3 - 0.5 % por cada °C. En el caso temperatura ambiental cambia de 25 °C a 65 °C, esto resulta en una reducción de la potencia en  $40 \times 0.5 = 20 \%$ , es decir en vez de dar 1 W, una celda daría solamente 0.8 W.

### 3. Paneles solares

Para aplicaciones prácticas se conecta eléctricamente a varias celdas fotovoltaicas y se encapsula el conjunto apropiadamente para darle protección mecánica y ambiental. El equipo resultante se llama *módulo fotovoltaico*, o *panel fotovoltaico* (muchas veces simplemente: *panel solar*).

Para fines prácticas, se conecta típicamente 36 – 40 celdas en serie, manteniendo así voltaje en el punto de máximo potencia, de 16 – 18 V, con potencias de 50 – 60 W. Estos paneles son muy apropiados para ser usado en conexión de baterías de 12 V. También se fabrican paneles FV con otros voltajes.

Las celdas FV conectadas eléctricamente en serie están encapsulados en plásticos y tienen en la parte frontal un vidrio templado, resistentes, todo generalmente en un marco de Aluminio, para darle mayor estabilidad y resistencia al intemperie (Fig. 3).



**Fig. 3 Un Panel Solar**

#### **4. Tecnología de fabricación de una celda FV**

A continuación se describe muy someramente los pasos principales en la fabricación de celdas solares. La mayoría y las mejores celdas fotovoltaicas se hacen hoy de silicio muy puro y cristalino. El material inicial es arena de cuarzo,  $\text{SiO}_2$ , muy barato y disponible en muchos lugares. Esto es reducido a silicio y purificado. Este último proceso es muy laborioso y costoso: mientras que 1 kg de silicio metalúrgico (1-2% de impurezas) cuesta 1 \$ (aproximados), 1 kg de silicio necesario para la fabricación de celdas solares (con solamente una impureza en 10 millones de átomos de silicio) cuesta 100 \$. Para una celda de  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ , se requiere 10-15 g de silicio puro. Hipotéticamente Un panel de  $1 \text{ m}^2$ , requiere cerca de 1500 g de Silicio, puede costar \$150.

El silicio puro es fundido en un crisol en un horno, añadiéndose un dopaje apropiado para obtener un semiconductor tipo p o n. Un cristal semilla de silicio en contacto con el silicio fundido es retirado lentamente, obteniéndose un monocristal de un diámetro hasta 15 - 20 cm y una longitud hasta 1 m. Este cristal es cortado en tajadas (tipo salami) de un espesor de 0.3 - 0.5 mm. En este proceso se pierde aproximadamente la mitad del material. Posteriormente se difunde superficialmente hasta una profundidad de  $1 \mu\text{m}$  en las tajadas de silicio, usando un horno a  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ , bajo condiciones controladas, otras impurezas para producir una unión pn.

Si incide radiación sobre la cara cerca a la interfase P-N de este disco, las dos caras se cargan eléctricamente. Para poder recoger estas cargas, se requiere todavía aplicar contactos eléctricos, metalizando la cara posterior y aplicando una grilla metálica en la cara superior.

Para reducir los altos costos inherentes en la fabricación de celdas de silicio monocristalino, también se producen celdas de silicio policristalino con diferentes tecnologías, que prometen ser más simples y baratas. Paneles policristalinos comerciales tienen una eficiencia algo menor que celdas monocristalinos, pero su costo actual, expresado en  $\$/\text{Wp}$ , es igual al de celdas de silicio monocristalino. Lo mismo se puede decir de su vida útil y confiabilidad.

#### **5. Sistema Completo:**

Por la acción de la energía solar sobre la celda solar la corriente producida es almacenada en baterías, para utilizar esta energía después de la hora del sol.

Una instalación, además requiere controlar del voltaje, mediante un regulador, y dirigir la corriente hacia una batería, para almacenarla. Como la corriente eléctrica producida es directa, es necesario, para algunas aplicaciones, un inversor para convertirla en corriente alterna.

La Figura 4 muestra un esquema completo para la utilización del panel solar. .

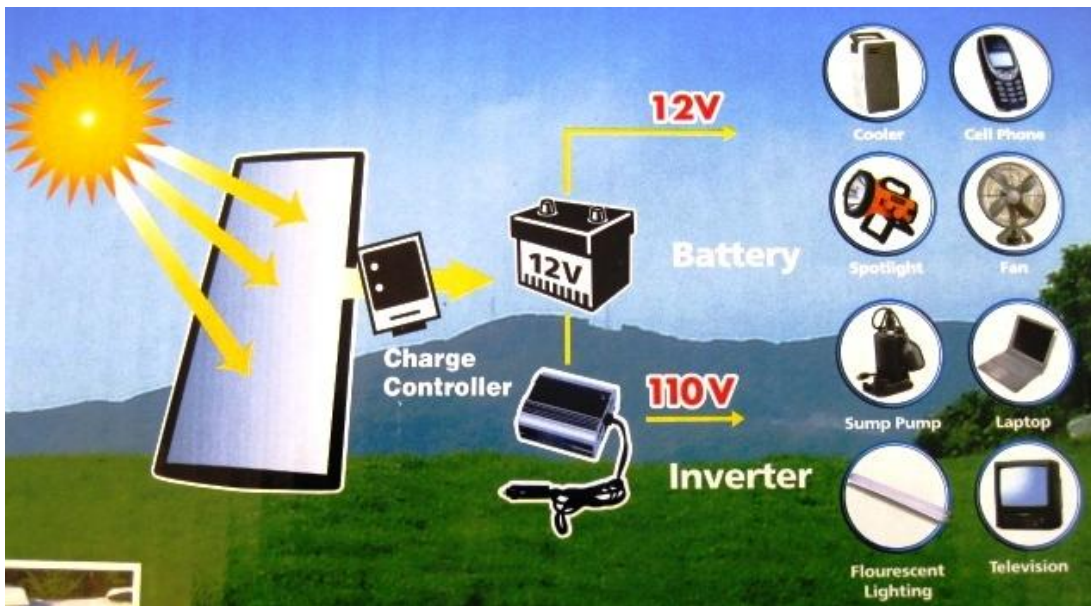
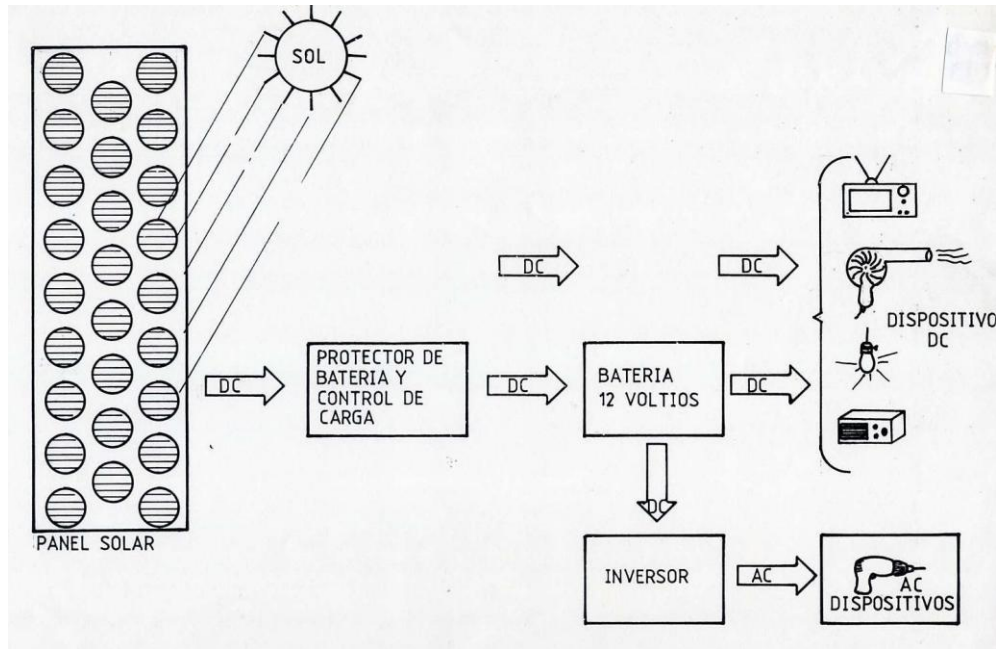


Fig. 4. Esquema para utilizar celdas solares.

La Tabla 1 indica la corriente y la potencia máxima consumida por varios dispositivos comunes usados en la casa.

**Tabla 1. Corriente pasado en varios artefactos (12 Voltios).**

<b>Artefactos</b>	<b>Potencia Vatios</b>	<b>Corriente máxima Amp.</b>
Luz Fluorescente	20	1.2
Televisor (B y N, 12")	20	1.4
Grabadora	35	2.5
Bomba de agua (100 lph)	35	2.6
Teléfono	13	1.0
Refrigeradora	100	5.0

Dependiendo de la capacidad del almacenamiento de la batería y utilizando la Tabla 1 se puede calcular el tiempo aproximado de funcionamiento de varios dispositivos y el área necesaria del panel solar para usos específicos.

## **6. APLICACIONES:**

Las celdas solares fueron usadas al principio para las aplicaciones espaciales y ahora han ganado mercado terrestre, para iluminación, en bombeo para sistemas de abastecimiento de agua potable, sistema de irrigación, telefonía rural etc.

Aunque en los últimos años el costo de las pilas han reducido en un 200- 300%, para lugares normales sus instalaciones resultan todavía caras, pero ciertamente competitivas cuando no existe otra forma de suministro de energía eléctrica. Además, se espera que con el desarrollo comercial de las células su costo se reduzca.

Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) ha instalado cerca del 3000 paneles solares FV en comunidades alejadas del país para que disfruten del servicio eléctrico.

## **7. CASITA SOLAR:**

Combinando varios artefactos donado por el Gobierno de India en 1998, el autor y otros comprados había equipado una CASITA SOLAR (40 m<sup>2</sup>) dentro del parque solar de la Universidad Nacional , cuya mayoría de las necesidades energéticas (Calórico y Eléctrica) es cubierta por energía del Sol (Foto . 5). Además de la investigación, esto sirve para fines Divulgación y para el uso- preparar café, calentar almuerzo, ver noticias, lavar trastos, cargar baterías, hasta estudiar en la noche usando iluminación y tomar agua fría y mantener las comida fría dentro del refrigerador etc. También tenemos Bombeo de Agua y Poste del Iluminación para el Patio. Tenemos sistemas de 12VCC, 24 VCC, y 110 VCA.

Para cualquier problema (sea por clima o con las baterías) o mantenimiento, tenemos una línea de fuentes mas seguro de electricidad, ofrecido por la Compañía de ESPH. .



**Fig. 5. Casita solar equipada con varios artefactos solares (térmicos Y eléctricos).**

Desde 2003, la casita esta utilizada por 4-6 compañeros, durante 5 días por semana y para siguientes usos:

- \* poner almuerzo y refresco etc., en la refrigerador solar (24 VCC), Hacer café dos veces por día (usando percolador de café, 110 VCA),
- \* calentar almuerzo usando cocina solar convencional y/o horno microonda con energía solar (110 VCA)
- \* ver TV (110 VCA para escuchar las noticias al medio día durante almuerzo,
- \* usar abanico solar (12 VCC) durante medio día cuando hay mucho calor,
- \* lavar trastos con agua caliente después de almorzar, usando calentador solar
- \* realizar algunas tareas del estudio en la noche (6-7 pm) usando alumbrado solar (12 VCC ).

#### **7 A. EXTERIOR DE LA CASA:**

Bombeo de agua (motor eléctrico 12 VCC) y Alumbrado están instalados en el Parque de Energía Solar, y fuera de la casita solar (Fig. 6 A y 6 B).





**Fig. 6 A (Alumbrado) y 6 B (Bombeo de Agua) instalados fuera de la Casita Solar.**

### **7 B. INTERIOR DE LA CASA:**

Las Figura 7 muestra algunos artefactos como Foco, Cargador de Baterías, Radio, Micro Onda, TV, Cafetera etc., dentro de la Casita solar. .



**Fig. 7. Algunos artefactos (Foco, Cargador de Baterías, Radio, Micro Onda, TV, Cafetera Etc.), que usan electricidad solar para su funcionamiento.**

Desde 2011 el Autor en su casa está utilizando paneles fotovoltaicos para lámpara del 12VCD, computadora portátil y TV (110VCA), como mostrado en los Foto 8 y también para cargar batería del carro (Fig. 9).



**Fig. 8. Uso del Paneles Fotovoltaico en la casa del autor- para alumbrado (12VCD), TV y cargar computadora (110VCA).**



**Fig. 9. Uso del panel fotovoltaico para cargar batería del carro (12VCD).**

## 8. CONCLUSION:

Para terminar se puede concluir, que la tecnología solar es posible implementarla en los países en vías desarrollo para satisfacer adecuadamente sus necesidades energéticas básicas, ahorrando una cantidad apreciable de fuentes fósiles y divisas.

Hemos informado en breve algunos conceptos básicos para el aprovechamiento de este fuente valioso, para una vivienda tomando sistemas Pasivos (propiedades naturales de la energía solar y los materiales) y sistemas activos (artefactos mecánicos combinado con energía del Sol). Con esta información y su imaginación puede diseñar los sistemas para sus necesidades.

## BIBLIOGRAFIA- ALGUNOS ARTICULOS PUBLICADOS POR EL AUTOR:

1. La Conversión de Energía Solar en Energía Eléctrica para Aplicaciones en Zonas Rurales. Presentado en XIII Conferencia Latinoamericana de Electrificación Rural (CLER), San José, Costa Rica, del 15 al 19 de Abril de 1991. Publicado en la memoria Volumen, III, No. VIII, pp.1-19, 1991.
2. Preliminary Study of Solar Powered Microwave Oven, Ced Currin, Currin, Shyam S. Nandwani and Marvin Alpizar, presented at Second World Conference on Solar Cookers- Use & Technology, held at Costa Rica, from July, 12-15, 1994. Publicado en la memoria- Abril 1995, pp. 149- 158.
3. Use of Solar Radiation for day lighting, water heating, cooking and night illumination in author's energy conscious house, Presented at International Conference LUX PACIFICA 97, held at Nagoya (Japan) during Oct. 13-16, 1997, y publicado en memorial, 1997, pages. F89- F94.
4. Panorama de la electrificación rural fotovoltaica en Costa Rica, Shyam S. Nandwani, Artículo presentado en el Taller RIER-IIIE sobre Controladores Electrónicos para Sistemas Fotovoltaicos de Electrificación Rural, realizado en Cuernavaca, México, del 27 al 31 de Julio de 1998.
5. Use of Solar energy in National Parks and Islands of Costa Rica, talk given at Island Solar summit, Tenerife Island, Spain, 6-8 May, 1999. Publicado en la memoria, pp. 143- 148, 1999.
6. Estudio Experimental del Un Termo Eléctrico con Energía Solar en el clima de Costa Rica, , Shyam S. Nandwani, presented at Seminar “ Energía, medio Ambiente y Desarrollo”, realized at Cusco, Peru, April, 26-27, 2004. Publicado en la memoria, pp. 493-499, Dec.2004, Cusco, Peru.
7. Experiencia preliminary con Testeo de Celdas Solares, Shyam S. Nandwani, Ivo Salazar y Lisandro Salazar, Seminario Taller Internacional del Red Iberoamericana de Aplicaciones Sustentable de Energía Fotovoltaicas (RIASEF), April 13-14, 2005, Cochabamba, Bolivia. (Y la reunión anual del RIASEF, April, 11-15,2005), Publicado en la memoria,
8. Las Aplicaciones de la Energía Solar en la Viviendas Ecologicas, Ciclos de Charlas (Seminario) on Vivienda Ecologica, Organized by Asociación Ecologica (YISKA, Cost Rica) y Centro de Investigación en Vivienda y Construcción (CIVCO/ITCR), at Technological Institute, Cartago, Costa Rica. Marzo del 2006, Publicado en CD Rom.
9. Experiencias practicas en casa solar con fines de ahorro de energía, Shyam S. Nandwani, Presented at Seminario Internacional: Aplicaciones Termicas y Fotovoltaicas de la Energía Solar en Iberoamerica,

realizad at Centro de Energias Renovables, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, **Peru, April 19, 2006**. Publicado en CD Rom. PP9

10. Estudio de una Estufa Solar Portátil y Híbrida- I, Shyam S. Nandwani, HIDRORED (Peru), ISSN No. 0935-0578, Vol. II, Año 2006, 29- 35.

11. Conceptos básicos del Celdas y Paneles Solares, Manfred Horn, Peru, , presentado en el Seminario, APLICACIONES PRODUCTIVOS Y SUSTENTABLES DE LA ENERGÍA SOLAR, Laboratorio de Energía Solar, Universidad Nacional, Costa Rica del 19 al 22 de Septiembre del 2006

fgensoIFV0713.doc