

DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DEL EFECTO FOTOVOLTAICO EN LA REGIÓN

Analysis and description of the photovoltaic effect in the zone

RESUMEN

La demanda energética nacional está alimentada esencialmente por el sistema interconectado nacional y por las plantas diesel o a gasolina en ciudades medianas y regiones aisladas. En algunas de estas zonas las plantas diesel no son la solución más adecuada, puesto que el acceso al combustible es complejo; en estos casos se debe realizar un diagnóstico sobre los recursos energéticos con que cuentan. Una opción viable bajo estas circunstancias es la energía solar fotovoltaica debido a su desarrollo y a su fácil implementación.

PALABRAS CLAVES: Demanda energética, radiación solar, recursos energéticos.

ABSTRACT

National energy demand is supplied mainly by the national interconnected system and plants (diesel or gasoline) in those isolate systems. But there are locations in which the diesel plants are not the best solution, because of the complex access to the fuel to those zones, it should be made a diagnostic on energy resources available in those locations. It is a fact that alternative energy resources provide the best solution.

KEYWORDS: *National energy demand, Solar radiation, energetic resources.*

JUAN DAVID MESA

Estudiante Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Pereira
jdmi@hotmail.com

ANDRES ESCOBAR MEJIA

Ingeniero Electricista, M. Sc.
Profesor Auxiliar
Programa de Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Pereira
andresel@utp.edu.co

RICARDO A. HINCAPIE ISAZA

Ingeniero Electricista, M. Sc.
Profesor Auxiliar Tiempo Completo
Programa de Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Pereira
ricardohincapie@utp.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Históricamente el ser humano ha procurado desarrollar métodos y herramientas que le permitan el aprovechamiento de las diferentes formas de energía existentes en la naturaleza; para tal fin se ha servido de los diversos fenómenos climáticos como son el viento, la radiación solar y las formas térmicas asociadas a los cambios de estado en los elementos.

El sol es la fuente de energía más potente con la cual cuenta la humanidad. Este irradia una energía de $3,87 \times 10^{1026}$ Joule en cada segundo. La energía que llega a la tierra durante un año es de $4,03 \times 10^{1024}$ Joule la cual es equivalente a 6720 veces la necesidad energética del mundo [1].

El efecto fotoeléctrico permite transformar directamente energía solar en cualquiera de sus dos manifestaciones, ya sea directa o difusa en una forma eficiente de energía eléctrica continua, la cual se convierte en una alternativa de amplia difusión en centros urbanos donde apoyan los sistemas eléctricos existentes y en las regiones rurales que por su topografía hacen dificultoso el acceso de las redes eléctricas convencionales.

Con el aprovechamiento de las fuentes energéticas se puede observar que la tendencia de generar electricidad en lugares donde la energía tiene costos muy elevados o no hay redes eléctricas es cada vez mayor. La energía solar es fuente inagotable y se encuentra en todo el mundo sin dependencias externas de ningún tipo [3].

Con relación a la disponibilidad de este recurso, Colombia es un país privilegiado debido a su ubicación geográfica sobre la línea ecuatorial, lo que ocasiona que se pueda contar con esta fuente de energía la mayoría de los días del año.

El departamento de Risaralda cuenta con una buena posición geográfica y altos índices de radiación solar [2], dando así ventajas para instalaciones solares de pequeña o gran escala de generación, trayendo así beneficios ambientales, económicos y eléctricos para la región.

2. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Una instalación de energía solar fotovoltaica debe incluir una serie de elementos indispensables para el correcto funcionamiento y control de la instalación [3,4], los cuales se observan en la Figura 1 y se describen a continuación:

- **Módulo fotovoltaico (generador fotovoltaico):** su función es captar y convertir la radiación solar en corriente eléctrica. Estos módulos se pueden conectar en serie o en paralelo. Cuando se conectan en serie el voltaje total será la suma de los voltajes individuales de cada uno de los módulos. La corriente de salida será igual a la corriente de un módulo. Al conectarlos en paralelo la corriente total será la suma de las corrientes individuales de cada módulo y el voltaje será el mismo que el de uno solo. Por lo tanto, el número de componentes conectados en serie determina el voltaje, y el número de módulos en paralelo determina la corriente que se le puede suministrar a una carga.
- **Baterías (acumuladores):** la naturaleza variable de la radiación solar y, por lo tanto, de la energía eléctrica generada, hace que en los sistemas fotovoltaicos aislados de la red eléctrica sea necesario un almacenamiento de energía que permita disponer de esta en períodos en los que no es posible la generación. En los sistemas fotovoltaicos, dicho papel lo realiza la batería. Las propiedades de la batería que se elija para un sistema fotovoltaico influyen de gran manera en el diseño de algunos elementos de la instalación, por lo que hay que prestar una atención especial a las características más convenientes para la condiciones del sistema a alimentar, tales como los tipos de cargas para las que se destina, la potencia total y los ciclos de consumo previstos, entre otros.
- **Inversor (acondicionador, convertidor):** se encarga de adaptar la corriente continua producida por el generador fotovoltaico a las características eléctricas requeridas por las cargas a alimentar.
- **Regulador de carga:** es el equipo que controla los procesos de carga y descarga de la batería. Controla el proceso de carga evitando que, con la batería a plena capacidad, los módulos fotovoltaicos sigan inyectando carga a la misma. Se lleva a cabo anulando o reduciendo el paso de corriente del campo fotovoltaico. Controla el proceso de descarga evitando que el estado de carga de la batería alcance un valor demasiado bajo cuando se está consumiendo la energía almacenada. Esto se lleva a cabo desconectando la batería de los circuitos de consumo. El regulador también es una fuente de información de los parámetros eléctricos de la instalación fotovoltaica. Puede proporcionar datos de la tensión, intensidad, estado de carga de las baterías, etc.
- **Elementos de protección del circuito:** son elementos como diodos de bloqueo, interruptores para desconexión, tierra, etc., dispuestos entre diferentes partes del sistema, para proteger la descarga y derivación de elementos en caso de falla o situaciones de sobrecarga.

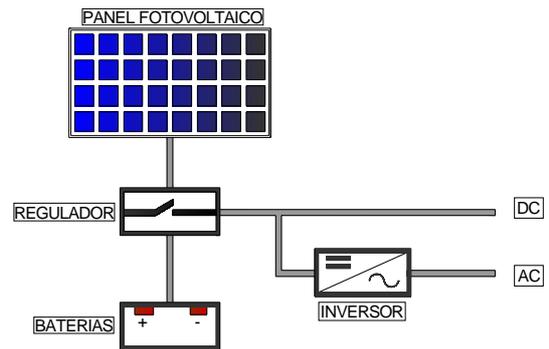


Figura 1. Esquema general de un sistema fotovoltaico

2.1. Instalaciones aisladas de la red eléctrica

Estas instalaciones son las que carecen de conexión con la red eléctrica convencional. Se pueden diferenciar entre sistemas con acumulación y sistemas de conexión directa.

Los sistemas de acumulación son los que están conectados a baterías que permiten el suministro eléctrico en periodos de poco o nulo aprovechamiento de la radiación solar. Estos su vez, pueden diferenciarse por el consumo al que están conectados: así pueden haber instalaciones aisladas con elementos de consumo en corriente alterna (Figura 2) o elementos de consumo de corriente continua (Figura 3).

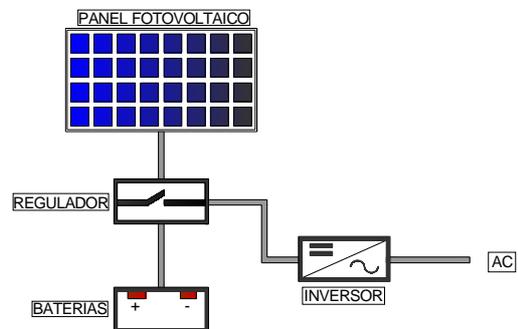


Figura 2. Instalación aislada con acumulación y consumo en AC

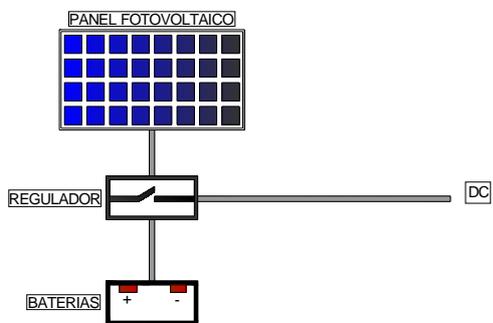


Figura 3. Instalación aislada con acumulación y consumo en CC

Además de estos casos, se pueden tener casos mixtos como son los de corriente continua y corriente alterna en el mismo sistema de alimentación (Figura 4).

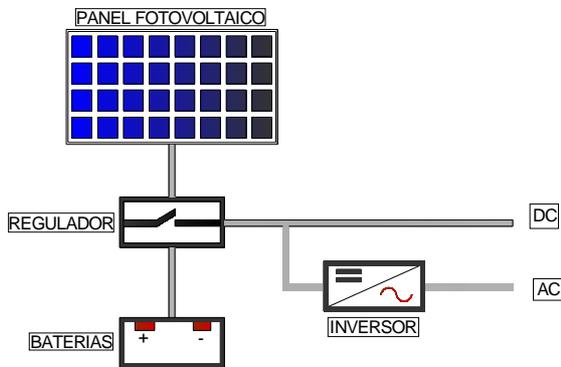


Figura 4. Instalación aislada con acumulación y consumo en CC y AC.

2.2. Instalaciones conectadas a la red eléctrica

Son las instalaciones en las que la energía generada por el campo fotovoltaico se entrega directamente a la red general de distribución (Figura 5). Las instalaciones conectadas a la red no poseen baterías ni reguladores, componiéndose únicamente de los módulos fotovoltaicos y del inversor. Los módulos fotovoltaicos son los mismos que para las instalaciones aisladas de la red, sin embargo, los inversores deben disponer de un sistema de medida de la energía consumida y entregada, ser capaz de interrumpir o reanudar el suministro en función del estado de campo de paneles y adaptar la corriente alterna producida en el inversor a la fase de la energía de la red.

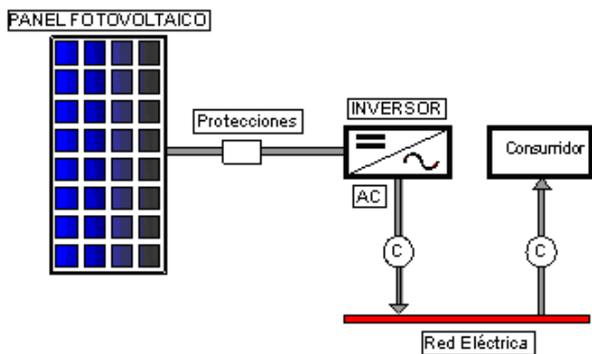


Figura 5. Instalación conectada a la red.

3. DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO

Para realizar el dimensionamiento de un sistema fotovoltaico se debe conocer qué tipo de carga se va a abastecer. Estas pueden ser residenciales, elementos empleados en telecomunicaciones, bombas de agua, etc.

Cuando se está realizando este cálculo se deben tener en cuenta datos de radiación solar, temperaturas máximas y mínimas del año, la irradiación solar diaria o mensual y la latitud. Para estos casos también se debe tener el consumo energético, el tiempo durante el cual se va a suministrar potencia y las especificaciones técnicas de los paneles y las baterías [5,6].

3.1. Cálculo de los paneles fotovoltaicos

El consumo energético está dado por la suma de la potencia nominal de los equipos a ser conectados a la red.

$$C_{\text{Total}} = C_{\text{DC}} + \frac{C_{\text{AC}}}{F_{\text{Pérdidas}}} \quad (1)$$

Donde:

C_{Total} : consumo energético en [W-h)/Día]

C_{DC} : consumo DC en [W-h)/Día]

C_{AC} : consumo AC en [W-h)/Día]

$F_{\text{Pérdidas}}$: factor de pérdidas entre 85% y 90%

La potencia máxima en vatios se puede expresar como la suma de las potencias en AC y en DC. Con este valor también se puede calcular la corriente aplicando un factor de seguridad (generalmente entre 1.0 y 1.5). La corriente requerida en AC está dada por:

$$I_{\text{Req1}} = \frac{(P_{\text{AC}} + P_{\text{DC}}) * F_{\text{SEG}}}{V_N} \quad (2)$$

Donde:

I_{Req1} : corriente requerida por el sistema en [A]

P_{AC} : potencia AC en [W]

P_{DC} : potencia DC en [W]

V_N : voltaje nominal del sistema [V]

F_{SEG} : factor de seguridad

Para el cálculo en DC se tiene que:

$$I_{\text{Req2}} = \frac{C_{\text{TOT}} * F_{\text{SEG}}}{V_N} \quad (3)$$

Donde:

I_{Req2} : corriente requerida por el sistema en [A]

C_{TOT} : consumo energético en [A-h/Día]

V_N : voltaje nominal del sistema [V]

F_{SEG} : factor de seguridad

Para calcular la energía eléctrica generada por el conjunto de paneles fotovoltaicos, se tiene:

$$I_{RPF} = \frac{I_{TOT}}{G_P} \quad (4)$$

Donde:

I_{RPF} : corriente requerida por los paneles fotovoltaicos.
 I_{TOT} : corriente total calculada por el sistema en [A-h/Día]
 G_P : horas sol en [h/Día]

La cantidad de paneles requeridos en serie (ecuación 5) y paralelo (ecuación 6) están dados por:

$$n_P = \frac{I_{RPF}}{I_M} \quad (5)$$

$$n_S = \frac{V_N}{V_{NPF}} \quad (6)$$

Donde:

n_P : número de paneles en paralelo
 I_{RPF} : corriente requerida por los paneles fotovoltaicos
 I_M : corriente nominal del panel a potencia máxima
 n_S : número de paneles en serie
 V_N : voltaje nominal del sistema
 V_{NPF} : voltaje nominal del panel

El número de paneles necesarios para la instalación están dados por la multiplicación de los paneles en serie y los paneles en paralelo.

3.2. Cálculo del banco de baterías

El balance energético es el que se establece entre la batería (la otra fuente de energía de la instalación) y la carga. La energía que se debe suministrar en un día se puede calcular con la expresión:

$$C_{Min B} = \frac{I_{Req DC} * Num \text{ días}}{\eta_B} \quad (7)$$

Donde:

$C_{Min B}$: capacidad mínima del banco de baterías en [A-h]
 $I_{Req DC}$: corriente requerida por el sistema en [A-h/Día]
 Num días: número de días de autonomía
 η_B : profundidad de descarga de la batería en (%)

Para encontrar el número de baterías a emplear se deben conocer cuantas se van a instalar en serie (ecuación 8) y en paralelo (ecuación 9) para después multiplicarlas entre sí. Por lo tanto:

$$B_P = \frac{C_{MIN B}}{C_{BAT}} \quad (8)$$

$$B_S = \frac{V_N}{V_{NOMB}} \quad (9)$$

Donde:

B_P : número de baterías en paralelo
 $C_{MIN B}$: capacidad mínima del banco de baterías en [A-h]
 C_{BAT} : capacidad de la batería en [A-h]
 B_S : número de baterías en serie
 V_N : voltaje nominal del sistema en [V]
 V_{NOMB} : voltaje de la batería en [V]

3.3. Cálculo del regulador

El regulador depende del número de paneles que se deben regular. Por lo tanto:

$$I_{Max R} = I_M * (N_P + M_P * N_P) \quad (10)$$

Donde:

$I_{Max R}$: corriente máxima del regulador en [A]
 I_M : corriente nominal del panel a potencia máxima en [A]
 N_P : número de paneles en paralelo
 M_P : margen de potencia en (%)

No es conveniente ajustar demasiado la potencia del regulador a la potencia nominal de la instalación, pues de esta forma se pueden asumir de forma fiable las posibles variaciones de potencia de salida de los paneles sin que llegue a sobrecargarse. Un margen bastante habitual entre la potencia máxima del generador fotovoltaico y la potencia del regulador está entre el 15% y el 20%.

Para encontrar la cantidad de reguladores requeridos se debe tener en cuenta:

$$Num \text{ Reg} = \frac{I_{MAX R}}{I_R} \quad (11)$$

Donde:

Num Reg: número de reguladores requeridos
 $I_{MAX R}$: corriente máxima del regulador en [A]
 I_R : corriente del regulador, dato de placa en [A]

3.4. Cálculo del inversor

El cálculo del inversor depende de la potencia que se requiere entregar. Esto se puede calcular como:

$$\text{Num Inv} = \frac{P_{AC}}{P_{inv}} \quad (12)$$

Donde:

Num Inv: cantidad de inversores

P_{AC} : potencia AC en [W]

P_{inv} : potencia nominal del inversor [W]

4. DESCRIPCIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR EN RISARALDA

El departamento de Risaralda tiene una extensión de 4.140 Km². El departamento está conformado por una zona central de topografía ligeramente ondulada a una altura inferior a los 2000 m. Esta zona está bordeada por las cordilleras Central y Occidental; la Central supera los 4.500 m en los nevados de Santa Isabel y Quindío, y la Occidental alcanza los 4.000 m en el Cerro Tatamá; las dos cordilleras están separadas por el cañón del río Cauca.

El departamento cuenta con pisos térmicos que van desde las nieves perpetuas (Nevado de Santa Isabel a 5.200 m) en límites con el departamento del Tolima, hasta pisos cálidos a 900 m y a orillas del Río Cauca. Existen áreas de bosques para protección de cuencas y zonas de diversificación. La ciudad de Pereira se encuentra a una altura promedio de 1.411 m sobre el nivel del mar.

MES	PEREIRA [KW/m ²]	DOSQUEBRADAS [KW/m ²]	LA VIRGINIA [KW/m ²]
Enero	5-6	5-6	6-7
Febrero	5-6	5-6	6-7
Marzo	5-6	5-6	5-6
Abril	3-4	3-4	4-5
Mayo	3-4	3-4	4-5
Junio	3-4	3-4	5-6
Julio	5-6	4-5	9-7
Agosto	4-5	4-5	6-7
Septiembre	3-4	3-4	5-6
Octubre	3-4	3-4	5-6
Noviembre	4-5	4-5	5-6

Tabla 1. Índices de radiación solar.

Los mapas de radiación solar en Colombia y Risaralda contienen 26 mapas describiendo la radiación solar que incide por metro cuadrado de superficie horizontal sobre el territorio colombiano [1]. La medida a la intensidad se

indica en el mapa mediante convenciones de colores desde el azul oscuro hasta el rojo oscuro. La unidad de la energía utilizada corresponde al kilovatio hora (equivalente a 3.600 kilo-julios).

Se pueden observar dos efectos: la influencia de las cordilleras y de las zonas planas, encontrándose que la distribución de los rangos de valores de la radiación solar refleja la existencia de las cordilleras.

Las regiones en el departamento con mayor factibilidad de implementación son los municipios de Pereira, Dosquebradas y La Virginia pues poseen un mayor índice de radiación y brillo solar que otras regiones aledañas (Tabla 1).

5. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Se desea alimentar una carga de 1kW con autonomía de 12 horas, la cual se encuentra ubicada en la ciudad de Pereira. Los equipos a utilizar son paneles fotovoltaicos de 130 W, baterías de 12 V, reguladores e inversores. A continuación se ilustran los resultados obtenidos aplicando las ecuaciones planteadas en el numeral tres.

- Potencia nominal de la carga: 1000 W
- Voltaje nominal del sistema: 12 V
- Total Ah/d: 83.3
- Factor de seguridad: 1.1
- Total requerimiento Ah/d: 91.7
- Horas sol standard disponibles: 3
- Total corriente requerida (A): 30.6
- Módulo seleccionado: Referencia KD180GX
- Corriente operación módulo (A): 7.63
- Cantidad requerida de módulos en paralelo: 5
- Voltaje nominal del sistema: 12
- Voltaje nominal del módulo: 12
- Cantidad requerida de módulos en serie: 1
- Total módulos requeridos: 5
- Total Ah requeridos por día: 91.7
- Autonomía recomendada (días): 0.5
- Porcentaje de capacidad utilizable: 0.8
- Capacidad mínima del banco de baterías (Ah): 57.3
- Batería seleccionada: Referencia HGL200-12
- Capacidad de la batería (Ah): 200
- Cantidad requerida de baterías en paralelo: 1
- Voltaje nominal del sistema: 12
- Voltaje nominal de la batería: 12
- Cantidad requerida de baterías en serie: 1
- Total baterías requeridos: 1
- Máxima corriente PV: 45.8
- Máxima corriente consumo: 30.6
- Voltaje nominal sistema: 12
- Controlador seleccionado: Steca 30 AMP
- Cantidad requerida de Controladores: 2
- Máxima Potencia requerida en AC: 1000
- Inversor seleccionado: Steca 275-2400
- Cantidad requerida de inversores: 1

ELEMENTO	CANTIDAD REQUERIDA	VALOR UNITARIO EN \$	VALOR TOTAL EN \$
Módulo Fotovoltaico	5	2.088.000	10.440.000
Batería	2	638.000	1.276.000
Regulador	2	360.992	721.984
Inversor	2	380.000	760.000
Otros	1	3.000.000	3.000.000
TOTAL			16.197.984

Tabla 2. Costo del proyecto (precios de Marzo de 2009).

Estos cálculos se realizaron considerando un índice muy bajo de horas sol en un día (tres horas). El dimensionamiento del sistema varía dependiendo de este valor. Es preciso aclarar que entre mayor brillo solar se obtenga en el lugar de la instalación, menor es el número de paneles requeridos y por lo tanto menor el costo del proyecto.

6. CONCLUSIONES

La alta confiabilidad de la tecnología solar fotovoltaica, su capacidad de pequeña generación eléctrica con el potencial de crecer con la simple instalación de un mayor número de módulos fotovoltaicos, su fácil manejo, y la facilidad para ser aceptada por los usuarios que en su mayoría ya están utilizando baterías, son aspectos que hacen factible la utilización masiva de los sistemas fotovoltaicos en Risaralda.

Los sistemas fotovoltaicos garantizan seguridad, fiabilidad y continuidad en el servicio de la energía eléctrica sin tener interrupciones por fallas.

Los sistemas solares se pueden instalar en cualquier lugar, ya sea sobre techos fijos en la tierra o con seguidores solares para tener un aprovechamiento efectivo con la salida del sol.

Los sistemas fotovoltaicos tienen la peculiaridad que tienen una vida útil promedio de 20 años y en ese tiempo la inversión se ha recuperado fácilmente. Cuando el sistema es de generación con venta a la red, la inversión se libra más rápido con la ayuda de bonos de CO₂ y leyes nacionales.

En instalaciones conectadas directamente a la red es recomendable no emplear bancos de baterías, pues lo ideal es que la energía que se genera en el día se venda instantáneamente.

La energía solar fotovoltaica es una gran solución en zonas donde el acceso al sistema interconectado nacional sea difícil, debido a su fácil implementación e instalación y a los beneficios que generan.

Para realizar una instalación de sistemas fotovoltaicos en Colombia se debe tener en cuenta la normatividad vigente de reglamentos como el RETIE y la NTC 2050.

En Risaralda se tienen buenos índices de radiación solar durante casi todo el año, siendo Pereira, Dosquebradas y La Virginia las zonas con mayor factibilidad de implementación. Se puede observar del ejemplo resuelto que si los índices de radiación fueran menores a los empleados, el costo del proyecto sería mucho mayor debido a la necesidad de utilizar más módulos fotovoltaicos.

A pesar de que los costos de inversión son elevados, este valor puede recuperarse en un mediano plazo debido a la energía que se estaría dejando de pagar a una electrificadora.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Green Peace, "Como disponer de energía solar fotovoltaica conectada a la red eléctrica". Available: <http://www.greenpeace.org/international>
- [2] UPME, "Atlas de Radiación Solar de Colombia", Colombia. Available: <http://www.upme.gov.co/simec>
- [3] Junta de Castilla y León, "Energía Solar Fotovoltaica: Manual del instalador", Consejería de Economía y Empleo, España, 2004.
- [4] Jaramillo, C.A., "Fundamentos de la Energía Solar Fotovoltaica", Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, 1989.
- [5] Castañer, L., Markvart, T., "Photovoltaics, Fundamentals and Applications", University of Southampton, 2003.
- [6] Castañer, L., Markvart, T., "Practical Handbook of photovoltaics fundamentals and applications", University of Southampton, 2006.
- [7] www.kyocera.com
- [8] www.fullriver.com
- [9] www.stecasolar.com
- [10] Díez, P.F., "Procesos termo solares en baja, media y alta temperatura", Universidad Autónoma de México, 2007.
- [11] Home Power, "Solar Electric Basics". Available: www.homepower.com
- [12] Best, G., Guidi, D., Campen, B.V., "Energía solar fotovoltaica para la agricultura y desarrollo rural sostenibles", Madrid, España, 2003.