

## DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SEGUIDOR SOLAR PARA LA OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO

**Design and Implementation of a Solar Tracking Prototype for optimize a PV system.**

### RESUMEN

Para lograr la optimización de la energía obtenida de una instalación fotovoltaica existen dos metodologías. La primera consiste en mejorar los componentes internos de un panel fotovoltaico de manera que su rendimiento aumente. La segunda consiste en aumentar la cantidad de radiación solar recibida por el panel.

El trabajo aquí realizado se enfoca en la segunda metodología. Para esto se busca que el área del panel fotovoltaico permanezca en posición perpendicular a la radiación lumínica de la fuente de luz, lo cual se logra mediante un algoritmo programado en un microcontrolador Motorola.

**PALABRAS CLAVES:** Algoritmo optimización, panel fotovoltaico, seguidor solar.

### ABSTRACT

*There are two known methodologies used in order to achieve the optimization of the solar energy in a photovoltaic plant. The first one consist of improve the internal materials of the solar modules. With this the efficiency is improved. The second one consist of increases the amount of solar radiation that lies over the solar module.*

*In this paper the second methodology is used. This means that the effective area of the solar module lies in perpendicular position with respect to the photovoltaic source. This is made with an algorithm that runs in a Motorola microcontroller.*

**KEYWORDS:** Optimization algorithm, solar tracking, photovoltaic module.

### 1. INTRODUCCIÓN.

En la actualidad, se evidencia como el desarrollo industrial y económico de gran parte de las empresas conlleva a una clara expansión de los sistemas eléctricos de potencia. En países en donde se requiere la utilización de recursos no renovables o la combustión de materiales tales como el carbón, gas natural, derivados del petróleo entre otros para la generación de energía [1], se encuentran diferentes inconvenientes, entre los que se cuentan principalmente el impacto ambiental y la limitada duración de estos recursos como fuente de energía. La repercusión de la generación de energía eléctrica de manera convencional sobre el medio ambiente se evidencia en el deterioro de la calidad del aire, además se genera un efecto de calentamiento del planeta, conocido como efecto invernadero [2]. El otro gran inconveniente resulta ser el inminente agotamiento de las principales fuentes de generación de energía convencionales, ya que el carácter de no renovables del gas, carbón, petróleo entre otros, así como el aumento constante de la demanda de estos materiales hace que sea una obligación buscar alternativas para reemplazarlos [3].

Afrontar las necesidades energéticas de manera sostenible contribuirá en gran medida a la solución de los retos de principio de siglo, como la pobreza, el cambio climático, la seguridad alimentaria, etc. [4]. La convergencia actual de diversas crisis (económica, junto con la continua volatilidad de los precios del petróleo y los alimentos) configura un escenario adecuado para plantear una nueva formulación de las políticas, así como para destinar mayores inversiones hacia un proceso de desarrollo más seguro y sostenible.

Uno de los factores en los que se viene trabajando y el cual contribuirá a aumentar la popularidad de las energías alternativas es el aumento de su uso eficiente [2]. La energía solar presenta un gran inconveniente en cuanto a la dificultad de su introducción al mercado eléctrico debido al elevado costo MWh, sin embargo se estima que se presentará una reducción del 18% cada que la producción se duplique. Las diferentes tecnologías de fabricación, así como la producción a gran escala han contribuido de manera significativa a la reducción de los precios de los módulos fotovoltaicos [5], tal reducción se puede observar en la Figura 1.

### ANDRES ESCOBAR MEJIA

Ingeniero Electricista, M. Sc.  
Profesor Asistente  
Universidad Tecnológica de Pereira  
Estudiante Ph.D  
University of Arkansas EE. UU  
andreses1@utp.edu.co

### MAURICIO LONDOÑO

Ing. Electricista, M. Sc.  
Profesor Asistente  
Universidad Tecnológica de Pereira  
mau.hol@utp.edu.co

### HOLGUÍN

### JUAN CARLOS OSORIO R.

Estudiante Ing. Electricista  
Universidad Tecnológica de Pereira  
juanitoores@hotmail.com

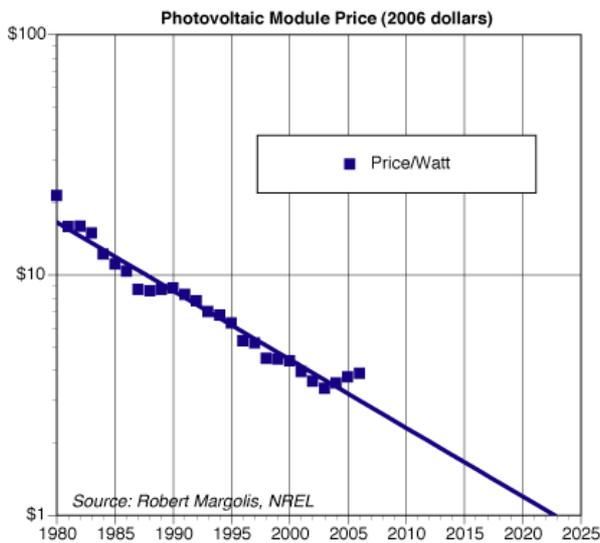


Figura 1. Precio módulos fotovoltaicos versus tiempo [6].

El objetivo de este proyecto es presentar el desarrollo e implementación de un prototipo que permite realizar el seguimiento de la trayectoria solar. El dispositivo utilizado permite aumentar la radiación captada por el módulo solar mediante el movimiento continuo del panel. Tal movimiento busca mantener el área de este en posición perpendicular a los rayos del sol. El prototipo presentado permite mejorar el rendimiento de una instalación fotovoltaica [7].

## 2. ENERGÍA SOLAR Y SUS DIFERENTES USOS.

Existen fuentes de energía que por su carácter de renovables, o por la enorme cantidad de reserva de la que se dispone pueden ser consideradas ilimitadas, es el caso del sol. Este se comporta como un cuerpo negro que por medio de un proceso de fusión nuclear, en donde se unen los núcleos de átomos ligeros como el hidrógeno y el helio, liberan grandes cantidades de energía radiante que llegan hasta la superficie del sol pasando de unos 20 millones de grados centígrados a unos 6000 grados centígrados, [8]. Toda esta energía viaja por el espacio exterior a la superficie terrestre pasando por la atmósfera; en este punto del camino se filtran los rayos ultravioleta gracias a la acción de la capa de ozono [9] y [10].

El sol es la principal fuente de energía para los procesos biológicos del planeta, de esta manera el ser humano ha dependido de éste sin darle la importancia que representa en las actividades humanas. En este sentido, la calefacción fue uno de los primeros usos de la energía solar, sin embargo, la utilización de combustibles para este mismo fin reemplazó y limitó hace unos 2500 años la posibilidad de expandir la energía solar como fuente importante en las actividades que requieren energía calorífica, debido a que la quema de combustibles presentaron una mayor eficiencia y facilidad en la manipulación [9].

La cantidad de energía solar recibida anualmente por la tierra  $1,5 \times 10^{18}$  KWh, representa 10.000 veces el consumo de energía en ese mismo periodo, esto se interpreta como que además de que el sol es el actor principal de los procesos biológicos en la tierra, este puede ser considerado una fuente inagotable de energía la cual puede ser aprovechada mediante un adecuado sistema de captación y conversión a otro tipo de energía, por ejemplo energía eléctrica, térmica, entre otras [11].

### 2.1 VENTAJAS DE LA ENERGÍA SOLAR.

La energía solar es una de las alternativas energéticas más importantes en la actualidad, esta ofrece una serie de ventajas tales como:

- Utiliza recursos naturales inagotables: la luz del sol.
- Es una energía limpia que no genera emisiones de gases contaminantes ni otro tipo de residuos.
- Es una solución ideal para disponer de electricidad en zonas aisladas.
- Es la única energía renovable que puede instalarse a gran escala dentro de las zonas urbanas.
- En el caso de instalaciones conectadas a la red, hay subvenciones públicas y primas a la producción.
- Los paneles y la estructura de soporte pueden desmontarse al final de la vida útil, pudiendo reutilizarse.

### 2.2 DESVENTAJAS DE LA ENERGÍA SOLAR.

Entre los inconvenientes no comparables con los de las fuentes de energías convencionales y más bien propias de las instalaciones y parques solares, se encuentran:

- El impacto visual de los parques solares, que suelen ocupar grandes superficies de captación.
- Sólo se produce energía mientras hay luz y depende del grado de insolación.
- El costo de las instalaciones es elevado, sobre todo si se compara con otro tipo de instalaciones que generen la misma potencia.
- El periodo de amortización de la inversión es largo, de unos diez años.
- El rendimiento es bastante bajo, debido a la baja eficiencia de las células solares, en muchos casos inferior al 40%.

- El tiempo que deben esperar, según manifiesta la Asociación de la Industria Fotovoltaica (ASIF), las pequeñas y medianas instalaciones fotovoltaicas para que las compañías eléctricas las homologuen y compren su producción [12].

### 3. SEGUIDOR SOLAR COMO DISPOSITIVO DE OPTIMIZACION.

En los sistemas fotovoltaicos existe la posibilidad de implementar un dispositivo adicional con el fin de aumentar la captación de radiación solar y por ende la energía suministrada por la instalación, tal dispositivo es un seguidor solar.

Un seguidor solar es un dispositivo conformado básicamente por una parte fija y una móvil, cuya finalidad es el aumento de la captación de radiación solar, para lo cual cuenta con una superficie de captación que debe permanecer perpendicular a los rayos del sol durante el día y dentro de su rango de movimiento [7].

Los seguidores solares pueden ser clasificados según el tipo de movimiento que realicen y según el algoritmo de seguimiento.

#### 3.1. SEGUIDOR SOLAR SEGÚN EL TIPO DE MOVIMIENTO.

##### Seguidor de un solo eje

La rotación de la superficie de captación se hace sobre un solo eje, este puede ser horizontal, vertical u oblicuo. Este tipo de seguimiento representa un mínimo grado de complejidad y su costo es menor en comparación con otros tipos de seguidores. La limitación de este tipo de seguidor consiste en que no puede realizar un seguimiento completo del sol ya que solo puede seguir ya sea la azimut o la inclinación solar, pero no ambas [13].

##### Seguidor de dos ejes:

Este tipo de seguidor cuenta con dos grados de libertad y está en capacidad de realizar un seguimiento total del sol, tanto en inclinación como en azimut, aunque el rendimiento de la instalación puede ser superior en comparación con los de un solo eje, es importante mencionar que el de dos ejes resulta ser más costoso.

#### 3.2. SEGUIDOR SOLAR SEGÚN EL TIPO DE ALGORITMO DE SEGUIMIENTO.

##### Según la luminosidad:

El algoritmo de este tipo de seguidor basa su funcionamiento en la señal entregada por uno o varios sensores, dependiendo de dicha señal se envía un

comando de control a uno o varios motores para que se posicionen en el punto más adecuado de luminosidad. Este tipo de seguimiento resulta ser de fácil implementación.

##### Con programación astronómica:

Este tipo de seguidor presenta una total independencia de las condiciones climáticas ya que su algoritmo no requiere de sensores que indiquen cual es el punto más luminoso. El seguimiento en este caso depende únicamente de una serie de ecuaciones que predicen la ubicación del sol en cualquier momento. Aunque este tipo de seguidor resulta ser de gran precisión cabe mencionar que la implementación del algoritmo representa un alto grado de complejidad [7].

### 4. ALGORITMO DE SEGUIMIENTO.

El seguidor descrito en este artículo en cuanto al tipo de movimiento pertenece a la clasificación de seguidor de un solo eje. Según el tipo de algoritmo, corresponde al seguidor de una fuente luminosa.

El dispositivo seguidor consta de cuatro etapas básicas:

- Recepción y acondicionamiento de la señal de entrada.
- Procesamiento de la señal.
- Etapa de control.
- Etapa de potencia.

En la Figura 2 se muestra el esquema básico correspondiente al prototipo de seguidor solar desarrollado.

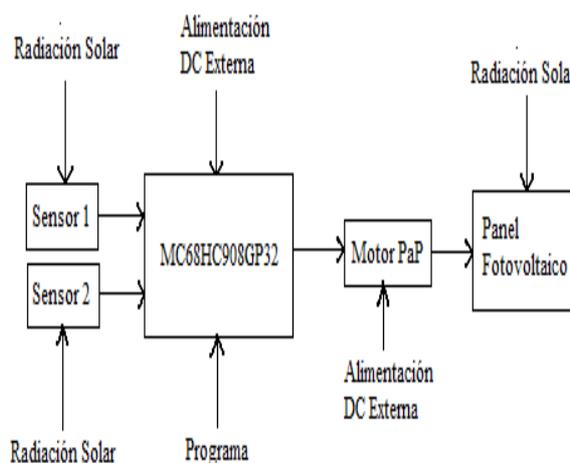


Figura 2. Esquema del prototipo de seguidor solar.

En la etapa de recepción y acondicionamiento de la señal, se hace uso de dos sensores y el modulo de conversión A/D del microcontrolador MC68HC908GP32 de

Motorola, el tiempo de muestreo es de 10 ms. Los sensores son dos celdas fotovoltaicas dispuestas de tal forma que los voltajes sean iguales cuando los rayos luminosos incidán de manera perpendicular sobre la superficie colectora.

La etapa de procesamiento de la señal consiste básicamente en realizar una comparación entre los valores obtenidos de los dos sensores (fotoceldas), es importante mencionar que el microcontrolador utilizado posee un módulo de conversión A/D para ocho señales, pero estas no pueden ser manejadas de manera simultánea, por esta razón dentro del código se hace necesario multiplexar las señales. Definiendo la señal del sensor uno como S1 y del sensor dos como S2, se pueden presentar tres posibles casos: que  $S1 > S2$  o que  $S1 < S2$  y finalmente que  $S1 = S2$ .

Dependiendo del caso y de la forma que se haya programado el algoritmo, se definirá un sentido de giro para el motor cuando S1 y S2 son diferentes, tal sentido de giro está determinado por dos vectores, uno para cada dirección. Debido a la característica del motor PaP de reducir el torque con el aumento de velocidad, se incluye dentro del código un factor de retardo para contrarrestar este efecto. En el caso en que S1 y S2 sean iguales, el motor deberá permanecer inmóvil, pero energizado para generar un torque que sostenga el panel. Este proceso corresponde a la etapa de control.

La etapa de potencia está conformada por un motor Paso a Paso (MPaP) de 12 voltios, cuya función es mover la superficie de captación según se defina en la etapa de control.

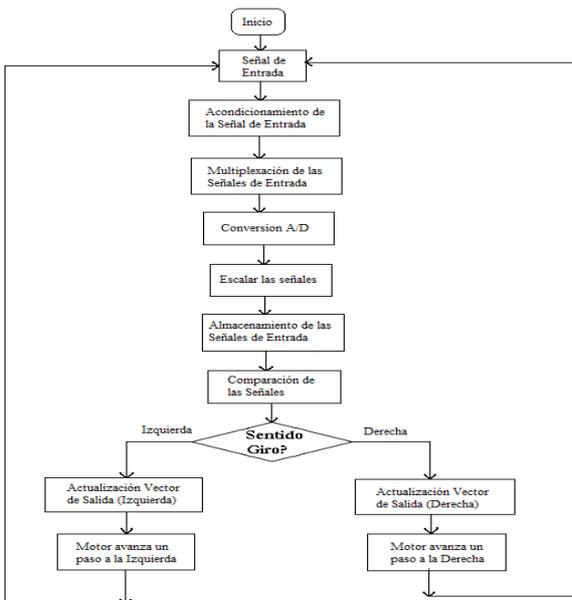


Figura 3. Descripción del funcionamiento de un seguidor solar de un solo eje.

En la Figura 3 se muestra un diagrama de bloques que describe el funcionamiento del seguidor solar.

La programación del algoritmo del seguidor se realiza mediante el lenguaje de programación C, el código es pasado posteriormente al microcontrolador utilizando *CODE WARRIOR*. En la Figura 4 se muestra una fracción del código correspondiente a la comparación de las señales, código de retardo para el motor y actualización del vector de salida.

```

if (Voltage_Display0>Voltage_Display1)
{
    // Incrementar contador
    if (--paso_cnt_Motor == 0)
    {
        paso_cnt_Motor = paso_motor;
        PTD = vector_adelante[bobina];
        bobina++;
        if (bobina == 4)
            bobina=0;
    }
}
if (Voltage_Display0<Voltage_Display1)
{
    // Incrementar contador
    if (--paso_cnt_Motor == 0)
    {
        paso_cnt_Motor = paso_motor;
        PTD = vector_atras[bobina];
        bobina++;
        if (bobina == 4)
            bobina=0;
    }
}

```

Figura 4. Fragmento del algoritmo del seguidor solar.

### 5. PRUEBAS REALIZADAS Y RESULTADOS OBTENIDOS

Las pruebas para verificar el correcto funcionamiento del dispositivo seguidor solar y el algoritmo se realizaron utilizando una fuente lumínica artificial, sobre un prototipo a escala de una instalación fotovoltaica cuyo esquema se puede observar en la Figura 5.

Utilizando el prototipo sin la función de seguidor en primera instancia y posteriormente con el dispositivo seguidor activado se tomaron varios valores para diferentes posiciones angulares, los valores obtenidos se muestran en la Tabla 1.

Para la validación de los resultados se hizo uso de un luxómetro, cuya finalidad fue verificar que las condiciones de medición en cada caso fueran comparables en cuanto a iluminancia.

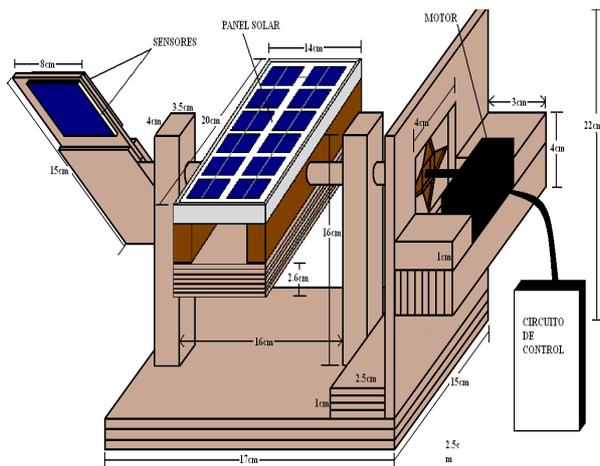


Figura 5. Esquema del prototipo seguidor solar.

Ademas de los datos descritos en la Tabla 1, se tomaron otros datos de potencia de salida del panel fotovoltaico, en esta ocasión haciendo uso de una tarjeta de adquisicion de datos *National instruments* de 12 bits y 10 mil muestras por segundo, los resultados obtenidos con esta tarjeta se graficaron directamente mediante el uso de la interfaz gráfica de *labview*. Los resultados de las pruebas sin y con dispositivo seguidor se muestran en las Figuras 6 y 7 respectivamente.

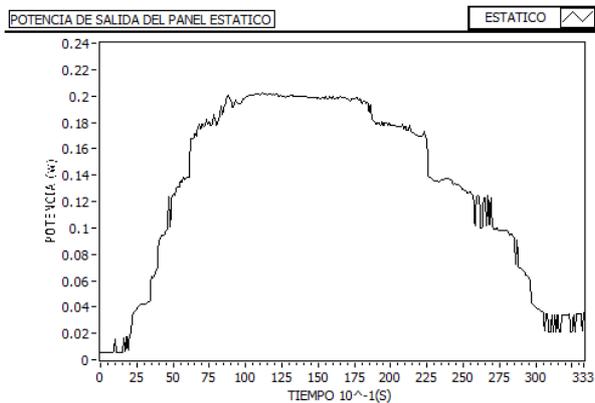


Figura 6. Comportamiento de la potencia de salida en una instalación fotovoltaica estática.

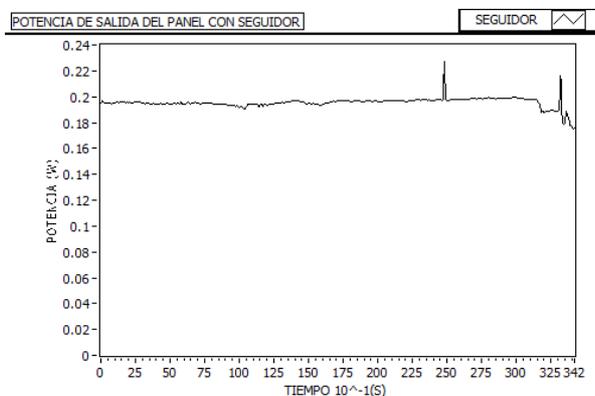


Figura 7. Comportamiento de la potencia de salida en una instalación fotovoltaica con seguidor.

Posición (°)	P. panel estático (W)	P. panel con seguidor (W)
0	0,00032	0.21216
5	0,000435	0.21239
10	0,004692	0.21096
15	0,014904	0.20955
20	0,028438	0.20958
25	0,046704	0.20958
30	0,08725	0.211
35	0,09348	0.20995
40	0,149499	0.21186
45	0,144235	0.2099
50	0,133179	0.21229
55	0,152324	0.2102
60	0,178423	0.20975
65	0,184368	0.20994
70	0,203136	0.21120
75	0,199998	0.21125
80	0,21033	0.21182
85	0,212544	0.21195
90	0,21033	0.2111
95	0,209592	0.21097
100	0,207636	0.2122
105	0,207273	0.210
110	0,196345	0.2116
115	0,201348	0.211
120	0,173394	0.210
125	0,155316	0.21104
130	0,13543	0.20933
135	0,1269	0.20925
140	0,101007	0.21091
145	0,08975	0.2117
150	0,06897	0.21235
155	0,039059	0.20952
160	0,02886	0.211
165	0,015194	0.21069
170	0,005024	0.2091
175	0,00085	0.21023
180	0,000664	0.209

Tabla 1. Valores de potencia de salida con y sin seguidor para diferentes valores angulares.

Comparando los resultados de las Figuras 6 y 7 se tiene que el aumento del rendimiento de la instalación con seguidor en comparación con la instalación estática es del 33.5%.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El prototipo construido cumple con las características requeridas de seguimiento en un solo eje, realizando el seguimiento azimutal del sol.

El sistema presenta una alta resolución de entrada que le permite muestrear de forma satisfactoria la señal de voltaje proveniente de los sensores y de esta manera reaccionar adecuadamente ante mínimos cambios de luminosidad.

El tiempo de respuesta del dispositivo (movimiento del motor PaP) puede ser modificado desde el algoritmo de seguimiento, de esta manera aumentar o disminuir el torque del motor.

El prototipo construido puede ser utilizado en otras aplicaciones que requieran una actividad de seguimiento solar, como colectores solares, hornos solares, entre otros.

El microcontrolador MC68HC908GP32 de Motorola, presentó un desempeño adecuado para este proyecto, ya que posee características especiales como el convertidor A/D que facilita el manejo de señales análogas.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. G. Bragoni, J. Baron, M. Cortellezzi, “La situación Energética Local: Balance y perspectiva de una problemática compleja”, Universidad Nacional de Cuyo, Abril de 2004.
- [2] J. F Curtin, J. Magolis, “El Uso Eficiente de la Energía”, Departamento de Estado de Estados Unidos, Oficina de Programa de Información Internacional, vol 14, numero 4, Apr. 2009.
- [3] J. R. Cedeño, “La Situación Energetica Mundial y sus Implicaciones para Puerto Rico”, CIAP, Instituto de Ingenieros Electricistas. Marzo de 2009.
- [4] Nota Conceptual ONUDI: “Hacia una Agenda Energética Integrada mas allá de 2020”, Conferencia Internacional de Energía, Viena (Hofburg), Austria, Junio de 2009.
- [5] Informe de Ecologistas en Acción, “Propuesta Para El Desarrollo de la Energía Solar Fotovoltaica”, Mayo de 2005.
- [6] Dispatches from the Frozen North, “The Mayic Year”, [Online], Disponible en: <http://www.froznorth.org/C197109377/E20080427143258/index.html>, Apr. 2008.
- [7] “Seguidores Solares, una Optimización de la Energía Solar”, [Online] Disponible en: [http://www.elporvenir.com.mx/notas.asp?nota\\_id=253973](http://www.elporvenir.com.mx/notas.asp?nota_id=253973).
- [8] TONDA, Juan, “*El oro solar y otras fuentes de energía*”, 1993.
- [9] WALES, Jimmy y SANGER, Larry, *Radiación Solar*, [Online] Disponible en: [http://es.wikipedia.org/wiki/Direcci%C3%B3n\\_de\\_incidencia\\_de\\_la\\_irradiaci%C3%B3n\\_solar](http://es.wikipedia.org/wiki/Direcci%C3%B3n_de_incidencia_de_la_irradiaci%C3%B3n_solar), 2008.
- [10] Fondo Europeo de Desarrollo Regional, “Informe Técnico-Divulgativo Sobre Energía, Térmica y Fotovoltaica”, Noviembre de 2008.
- [11] R. M. Lamaison, “Energía Solar Fotovoltaica (ESF), Radiación Solar”, Marzo de 2009.
- [12] UNION EUROPEA, IMPIVA, AIMME, “Informe Técnico-Divulgativo Sobre Energía Solar, Térmica y Fotovoltaica”, Noviembre de 2008.
- [13] “Los Paneles Solares Fotovoltaicos”, [Online], Disponible en: <http://www.sitiosolar.com/paneles%20fotovoltaicas.htm>, 2009.