



# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS**

## **EVALUACIÓN TÉCNICA DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍAS ALTERNAS**

**CRISTÓBAL HERNÁNDEZ BAUTISTA**

**T E S I S**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO**

**2013**

La presente tesis titulada: **Evaluación Técnica de un Sistema Híbrido de Producción de Energías Alternas** realizada por el alumno: Cristóbal Hernández Bautista, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



---

DR. ÓSCAR LUIS PALACIOS VÉLEZ

ASESOR



---

DR. ABEL QUEVEDO NOLASCO

ASESOR



---

M.C. OMAR RESÉNDIZ CANTERA

Montecillo, Texcoco, Edo. de México, Junio de 2013

# EVALUACIÓN TÉCNICA DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍAS ALTERNAS

## RESUMEN

El uso de las energías alternativas (eólica y fotovoltaica) presenta beneficios ambientales debido a que es menos contaminante que la energía producida con combustibles que emiten una importante cantidad de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Estas energías pueden ser usadas particularmente en áreas remotas que se encuentran fuera del alcance de la red eléctrica. En México, en el 2010 habían aproximadamente 3, 836,066 personas en estas condiciones (INEGI, 2011), por lo que el objetivo del presente estudio evaluar el funcionamiento de un sistema autónomo de producción de energía fotovoltaica, un aerogenerador y un calentador solar instalados en la “Unidad de Traspatio” del Campus Montecillo del Colegio de Postgraduados. Se encontró que el sistema fotovoltaico y el calentador solar funcionaron dentro del rango de 8.5-15.5% y 29.0-74.0% de eficiencia respectivamente, pero no así el generador eólico que solo funcionó de forma discontinua. La energía obtenida fue usada para abastecer a dos luminarias LED y a un equipo de cómputo instalado en la Unidad que simularon el consumo de una vivienda rural y el agua caliente se utilizó para las actividades industriales de la Unidad de Traspatio. Se concluyó que el sistema fotovoltaico y el calentador solar son aptos para ser utilizados en zonas remotas con condiciones similares al sitio estudiado. Sin embargo el aerogenerador requiere ser reinstalado a una elevación mayor.

***Palabras claves:*** *Energía Renovable, Módulo Fotovoltaico, Aerogenerador, Calentador Solar y Eficiencia.*

# TECHNICAL EVALUATION OF A HYBRID SYSTEM OF ALTERNATIVE ENERGY PRODUCTION

## ABSTRACT

The use of alternative energy (wind and photovoltaic) has environmental benefits because it is less polluting than the energy produced with fossil fuels that emit significant amounts of CO<sub>2</sub> to the atmosphere. These energies can be used particularly in remote rural areas, outside the reach of electrical networks. In Mexico, in 2010 there were about 3,836,066 people in these conditions (INEGI, 2010), so the purpose of present study was to evaluate the functioning of a system of autonomous photovoltaic energy production, a wind turbine and a solar heater installed in the “Backyard Unit” of the Montecillo Campus of the Postgrade College. We found that the photovoltaic system and solar heater operated within the range of 8.5-15.5% and 29.0-74.0% efficiency respectively, but the wind generator worked only intermittently. The obtained energy was used to supply power to two LED-luminaires and one computer equipment installed in the Unit that simulated the consumption of rural house and the obtained hot water was used for industrial activities of the Backyard Unit. It was concluded that the photovoltaic system and the solar heaters are suitable for use remote areas with similar conditions of the studied site. However the wind turbine requires to be reinstalled at a higher elevation.

**Keywords:** *Renewable Energy, Photovoltaic Module, Wind Turbine, Solar Water Heater and Efficiency.*

## **AGRADECIMIENTOS**

### **AL CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA (CONACyT).**

Por el financiamiento otorgado para realizar  
mis estudios de Maestría en Ciencias.

### **AL CONSEJO MEXIQUENSE DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA (COMECyT)**

Por el apoyo recibido para la terminación del  
presente trabajo a través de la beca otorgada.

### **A LA SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES (SEMARNAT) Y CONACyT.**

Por el financiamiento del proyecto con clave  
No. 23585: “ELABORACIÓN DE UN  
PLAN PRIORITARIO DE ACCIONES PARA  
DESACELERAR, DETENER Y EVENTUALMENTE  
REVERTIR EL DETERIORO AMBIENTAL EN EL  
MUNICIPIO DE TEXCOCO”

### **AL CAMPUS MONTECILLO DEL COLEGIO DE POSTGRADUADOS.**

Por el financiamiento en la adquisición de  
partes del sistemas para la realización de  
la presente investigación.

### **AL DR. OSCAR L. PALACIOS VÉLEZ.**

Por todo el tiempo que dedicó para dirigir  
esta tesis. Gracias por su paciencia, orientación  
y buenas sugerencias.

### **AL DR. ABEL QUEVEDO NOLASCO**

Por su tiempo, sus valiosas observaciones, sugerencias,  
contribuciones y disposición en la elaboración del trabajo  
de investigación.

### **AL M.C. OMAR RESÉNDIZ CANTERA**

Por las observaciones y contribuciones  
que hicieron posible el presente trabajo.

## DEDICATORIAS

A *Dios* por darme la oportunidad de vivir y regalarme una familia maravillosa.

A mis padres *Heraclio Sánchez S.* y *Macaria Bautista B.* que me han apoyado en todo momento y me han animado a seguir adelante.

A mis hermanas *Margarita, Berna, Domi y Silvia* por que siempre han creído en mi.

A *Isaura Rentería Gómez* por su amor y apoyo.

A mis amigos y compañeros de la *ANEI, A.C.* por los momentos de trabajo y alegría compartidos.

# CONTENIDO

Pág.

<b>1 . INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>19</b>
2.1.    GENERAL .....	19
2.2.    ESPECÍFICOS.....	19
<b>3. JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>20</b>
<b>4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>24</b>
4.1.    ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA .....	26
4.1.1.    Célula fotovoltaica .....	27
4.1.2.    Módulos fotovoltaicos .....	27
4.1.3.    Sistemas fotovoltaicos autónomas e interconectados .....	29
4.1.4.    Repercusión de la energía en la sociedad .....	32
4.1.5.    Repercusión medioambiental en plantas fotovoltaicas .....	33
4.2.    ENERGÍA SOLAR TÉRMICA.....	33
4.2.1.    Componentes de un calentador solar .....	34
4.3.    ENERGÍA EÓLICA.....	38
4.3.1.    Componentes principales de un aerogenerador .....	38
4.3.2.    Clasificación de los aerogeneradores .....	46
4.3.3.    Aplicaciones de los aerogeneradores de baja potencia.....	49
4.4.    REQUERIMIENTO ENERGÉTICO PARA UNA VIVIENDA RURAL.....	53
<b>5. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>55</b>
5.1.    DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO Y MATERIALES UTILIZADOS.....	55
5.2.    CARACTERÍSTICAS DE LOS RECURSOS ENERGÉTICOS DISPONIBLES .....	60
5.3.    PROCESO DE CÁLCULO PARA DETERMINAR EL NÚMERO DE PANELES NECESARIOS Y LA CAPACIDAD DEL ACUMULADOR PARA UN SISTEMA ALEJADO DE LA RED .....	68
5.4.    CÁLCULO ENERGÉTICO PARA UN CALENTADOR SOLAR DE AGUA .....	73
5.4.1.    Radiación.....	73

5.4.2.	Demanda energética .....	74
5.4.3.	Número de colectores.....	74
5.4.4.	Volumen y aislamiento del depósito de almacenamiento.....	75
5.5.	CÁLCULO DE LA POTENCIA DE SALIDA DE UN AEROGENERADOR.....	76
<b>6.</b>	<b>PROPUESTA DE USO DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN EL CAMPUS MONTECILLO DEL COLEGIO DE POSTGRADUADOS .....</b>	<b>78</b>
6.1.	EJEMPLO DE USO DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA.....	83
<b>7.</b>	<b>ANÁLISIS DE COSTOS .....</b>	<b>86</b>
<b>8.</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>92</b>
8.1.	EVALUACIÓN DE LA ENERGÍA FOTOVOLTAICA GENERADA .....	93
8.2.	CÁLCULO DE EFICIENCIA DE CONVERSIÓN ENERGÉTICA .....	100
8.3.	EVALUACIÓN DEL CALENTADOR SOLAR.....	104
8.4.	EVALUACIÓN DE LA ENERGÍA EÓLICA GENERADA .....	107
8.5.	CONSUMO ENERGÉTICO PARA UNA VIVIENDA RURAL .....	109
<b>9.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>111</b>
<b>10.</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>113</b>
<b>11.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>114</b>
<b>12.</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>120</b>
<b>ANEXO A</b>	<b>.....</b>	<b>120</b>
<b>ANEXO B</b> .....	<b>.....</b>	<b>135</b>
<b>ANEXO C</b>	<b>.....</b>	<b>140</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
<b>Cuadro 1.1.</b> Permisos de generación de energía para plantas eoloelectricas, al 31 de diciembre de 2011.....	14
<b>Cuadro 1.2.</b> Potencial estimado de generación eoloelectrica en México.....	15
<b>Cuadro 1.3.</b> Posibles aplicaciones de las tecnologías de energía renovable por sector. ....	18
<b>Cuadro 4.1.</b> Estimación de la carga energética para una vivienda rural. ....	54
<b>Cuadro 5.1.</b> Medición de las velocidades de viento a diferentes alturas. ....	67
<b>Cuadro 5.2.</b> Factor de corrección de la radiación por inclinación. ....	72
<b>Cuadro 8.1.</b> Promedio mensual de generación de energía eléctrica fotovoltaica de un módulo fotovoltaico. ....	95
<b>Cuadro 8.2.</b> Promedio mensual de generación de energía eléctrica para el sistema fotovoltaico. ....	97
<b>Cuadro 8.3.</b> Comparación entre la energía producida y la radiación recibida.....	99
<b>Cuadro 8.4.</b> Factores de pérdida para una instalación fotovoltaica. ....	101
<b>Cuadro 8.5.</b> Promedio mensual de generación de energía eléctrica fotovoltaica para el sistema fotovoltaico y potencia a la salida del inversor.....	104
<b>Cuadro 8.6.</b> Eficiencia energética del calentador solar.....	106
<b>Cuadro 8.7.</b> Generación de energía eléctrica a diferentes alturas. ....	109
<b>Cuadro 8.8.</b> Consumo energético de algunos aparatos electrodomésticos. ....	110

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.1.</b> Producción mundial de energía eléctrica 2011. ....	3
<b>Figura 1.2.</b> Fuentes primarias y combustibles para generación de electricidad en países seleccionados, 2008 (participación porcentual). ....	4
<b>Figura 1.3.</b> Tasa media de crecimiento anual de las energías renovables (2004-2009). ....	5
<b>Figura 1.4.</b> Porcentaje de participación de países líderes en capacidad instalada acumulada de sistemas fotovoltaicos, 67,350 MW en 2011. ....	6
<b>Figura 1.5.</b> Evolución de la capacidad eólica mundial, 1996-2009. ....	7
<b>Figura 1.6.</b> Primeros 10 países en capacidad eólica acumulada en Diciembre de 2011. ....	8
<b>Figura 1.7.</b> Capacidad efectiva de generación de electricidad en México. ....	9
<b>Figura 1.8.</b> Generación bruta de energía eléctrica en México en el 2012. ....	10
<b>Figura 1.9.</b> Evolución de la energía fotovoltaica instalada en México 2005-2010. ....	11
<b>Figura 1.10.</b> Irradiación solar global diaria promedio anual en el territorio nacional (kWh/m <sup>2</sup> ). ....	12
<b>Figura 1.11.</b> Evolución de la energía eólica instalada en México 2005-2010. ....	13
<b>Figura 1.12.</b> Densidad de potencia del viento a 80 metros de altura en la República Mexicana. ....	16
<b>Figura 3.1.</b> Producción de petróleo en México. ....	20
<b>Figura 3.2.</b> Viviendas que no disponen de energía eléctrica. ....	21
<b>Figura 3.3.</b> Porcentaje de la población en viviendas con carencia por servicio de electricidad según entidad federativa, 1990-2010. ....	22
<b>Figura 3.4.</b> Evolución del consumo nacional de energía y las emisiones de CO <sub>2</sub> del sector energético (Petajoules y Teragramos). ....	23
<b>Figura 4.1.</b> Balance de radiación solar. ....	25
<b>Figura 4.2.</b> Balance de radiación terrestre. ....	25
<b>Figura 4.3.</b> Analogía de absorción de fotones y efecto fotoeléctrico. ....	26
<b>Figura 4.4.</b> Clasificación de las células fotovoltaicas. ....	27
<b>Figura 4.5.</b> Componentes de un módulo fotovoltaico. ....	28
<b>Figura 4.6.</b> Formas de agrupación de los módulos fotovoltaicos. ....	28

<b>Figura 4.7.</b> Tipos de aplicación de los sistemas fotovoltaicos. ....	29
<b>Figura 4.8.</b> Esquema de un sistema fotovoltaico aislado. ....	30
<b>Figura 4.9.</b> Esquema de un sistema fotovoltaico interconectado a la red eléctrica nacional. ....	31
<b>Figura 4.10.</b> Partes de un calentador solar.....	37
<b>Figura 4.11.</b> Componentes de un aerogenerador de eje horizontal. ....	39
<b>Figura 4.12.</b> Tipos de torre: (a) tubular, (b) celosía, (c) tensada y (d) híbrida .....	45
<b>Figura 4.13.</b> Aerogenerador Savonius (izquierda) y aerogenerador Darrieus (derecha).....	46
<b>Figura 4.14.</b> Aerogenerador a) bipala, b) tripala y c) multipala. ....	48
<b>Figura 4.15.</b> Configuración de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico.....	51
<b>Figura 4.16.</b> Diagrama General de un sistema híbrido Eólico-Fotovoltaico.....	53
<b>Figura 5.1.</b> Sistema fotovoltaico instalado en el Campus Montecillo.....	55
<b>Figura 5.2.</b> Aerogenerador Air Breeze instalado en el Campus Montecillo. ....	56
<b>Figura 5.3.</b> Calentador solar instalado en el Campus Montecillo. ....	57
<b>Figura 5.4.</b> Esquema de instalación del sistema fotovoltaico.....	58
<b>Figura 5.5.</b> Diagrama de instalación del sistema de adquisición de datos. ....	59
<b>Figura 5.6.</b> Comparación de la radiación promedio mensual entre dos fuentes de datos. ....	60
<b>Figura 5.7.</b> Comparación de temperatura promedio mensual entre dos fuentes de datos. ....	61
<b>Figura 5.8.</b> Promedio de horas de brillo solar para cada uno de los meses del año 2011. ....	65
<b>Figura 5.9.</b> Radiación global promedio mensual de los meses de 2011.....	65
<b>Figura 5.10.</b> Velocidad del viento a diferentes alturas en el Colpos. ....	67
<b>Figura 5.11.</b> Proceso del diseño de la dimensión de un sistema fotovoltaico. ....	73
<b>Figura 6.1.</b> Consumo energético mensual en el campus Montecillo del Colegio de Postgraduados. ....	79
<b>Figura 6.2.</b> Costos de energía para la tarifa HM.....	80
<b>Figura 6.3.</b> Consumo de energía de punta en el Campus Montecillo del Colpos. ....	81
<b>Figura 6.4.</b> Visita a la instalación fotovoltaica en la UAM, con atención de la M.C. Martha Mireya Ruíz Amelio (14 de Septiembre de 2012). ....	83
<b>Figura 6.5.</b> Configuración de la instalación de los inversores y módulos fotovoltaicos. ....	84
<b>Figura 6.6.</b> Sistema de adquisición de datos.....	85
<b>Figura 7.1.</b> Proyección del costo instalado de sistemas fotovoltaicos en países líderes. ....	87

<b>Figura 7.2.</b> Costo de generación de energía eólica.....	87
<b>Figura 7.3.</b> Costos internacionales típicos de instalación de energías renovables (USD 2010/kW). .....	89
<b>Figura 7.4.</b> Costos nivelados de energía internacionales generada típicos a partir de fuentes renovables (USD 2010/kWh). .....	89
<b>Figura 7.5.</b> Costos comparativos de producción de energía eléctrica. ....	91
<b>Figura 8.1.</b> Promedio de energía producida durante el mes de Enero de 2011. ....	94
<b>Figura 8.2.</b> Promedio horario de energía producida durante un mes de medición (Abril de 2011). .....	94
<b>Figura 8.3.</b> Producción de energía fotovoltaica de un módulo fotovoltaico para el mes de Abril de 2011.....	95
<b>Figura 8.4.</b> Producción de energía eléctrica de un módulo fotovoltaico para el mes de Febrero de 2011. ....	96
<b>Figura 8.5.</b> Promedio mensual de generación de electricidad de un módulo fotovoltaico.....	97
<b>Figura 8.6.</b> Comparación entre la generación de eléctrica obtenida y la radiación total recibida.....	98
<b>Figura 8.7.</b> Eficiencia de conversión energética de un módulo fotovoltaico en operación.....	99
<b>Figura 8.8.</b> Evolución de la temperatura del agua en el tubo al vacío durante el día.....	105
<b>Figura 8.9.</b> Comportamiento de la eficiencia del calentador solar vs radiación solar.....	107
<b>Figura 8.10.</b> Datos iniciales de simulación con el Software RETScreen. ....	108

# 1. INTRODUCCIÓN

Las energías renovables utilizan el Sol como fuente de energía, tanto de forma directa (energía solar térmica y fotovoltaica) como indirecta (a las energías: eólica, hidráulica y la biomasa). Todas tienen impactos en mayor o menor medida en la emisión de gases de efecto invernadero, aunque comparativamente mucho menores que las no renovables.

El uso de las energías alternativas presenta beneficios ambientales al ser poco contaminantes debido a que reducen las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, además de que se presentan de manera gratuita en el planeta. Sin embargo, por ahora estos beneficios son tomados en cuenta para la investigación y aplicación, ya que la mayoría de los países del mundo basan su economía en la explotación de combustibles fósiles.

Como se mostrará a continuación, en muchos países se están haciendo grandes esfuerzos por utilizar estas energías renovables y México no es la excepción. De esta manera el Colegio de Postgraduados no debe permanecer al margen de esta tendencia, por lo que en este documento se presenta la evaluación técnica que se realizó a un sistema de generación de energía renovable que integra el aprovechamiento de la energía solar y el viento, en sus diferentes formas como lo son: energía fotovoltaica, energía térmica y fuerza del viento. La energía solar fotovoltaica es un tipo de electricidad renovable (energía eléctrica, voltaica) obtenida directamente de los rayos del sol (foto) gracias al efecto fotoeléctrico de un determinado dispositivo; normalmente una lámina metálica semiconductor llamada célula fotovoltaica<sup>1</sup>, o una deposición de metales sobre un sustrato llamada capa fina.

La energía eólica aprovecha el viento en forma de energía cinética que es un efecto de la radiación del sol en el planeta, mediante el uso de equipo eólico conocido como aerogenerador el cual transforma esta energía cinética del viento en energía mecánica de rotación y posteriormente se transforma en energía eléctrica (García y Hernández, 2009).

---

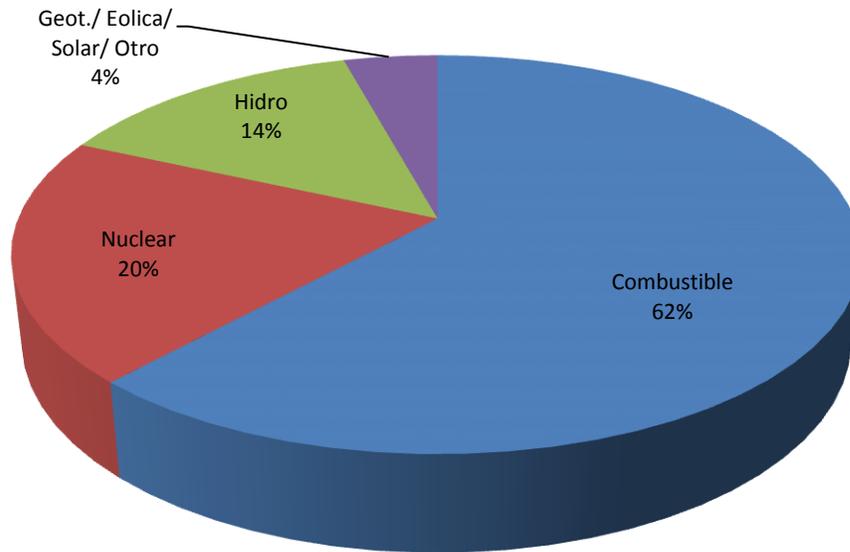
<sup>1</sup> Al final del documento en el Anexo A, se presenta un Glosario de Términos y Definiciones más utilizados en el presente trabajo.

Por estos tiempos, un hecho importante que realza el interés de la energía en el desarrollo rural, y es el auge internacional de tecnologías de energías renovables, con base en biomasa, biogás, energía solar (fotovoltaica y térmica) y eólica, que se suman a las pequeñas plantas hidroeléctricas. Estas son alternativas ciertas para zonas rurales aisladas, dada la inviabilidad económica de llevar servicios de energía por medio de redes de interconexión y por la potencial natural de energías renovables que existe en la mayoría de estas zonas.

En el presente proyecto se realizó la evaluación técnica de un sistema híbrido de energías renovables con el objetivo de conocer y aprovechar los recursos energéticos con los que cuenta la zona de estudio, para promover su aplicación en zonas rurales.

## **SITUACIÓN ACTUAL DEL SECTOR ENERGÉTICO EN EL MUNDO**

En 2011 la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en Inglés), reportó que la producción mundial de electricidad totalizó en 10,255 TWh que es la suma del conjunto de países que conforman a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD por sus siglas en Inglés). La generación de energía eléctrica se basó principalmente en la utilización de combustibles fósiles seguidos de la energía nuclear como se demuestra en la siguiente Figura 1.1.



**Figura 1.1.** Producción mundial de energía eléctrica<sup>2</sup> 2011.

Fuente: Elaboración propia con datos de IEA/OECD, 2011.

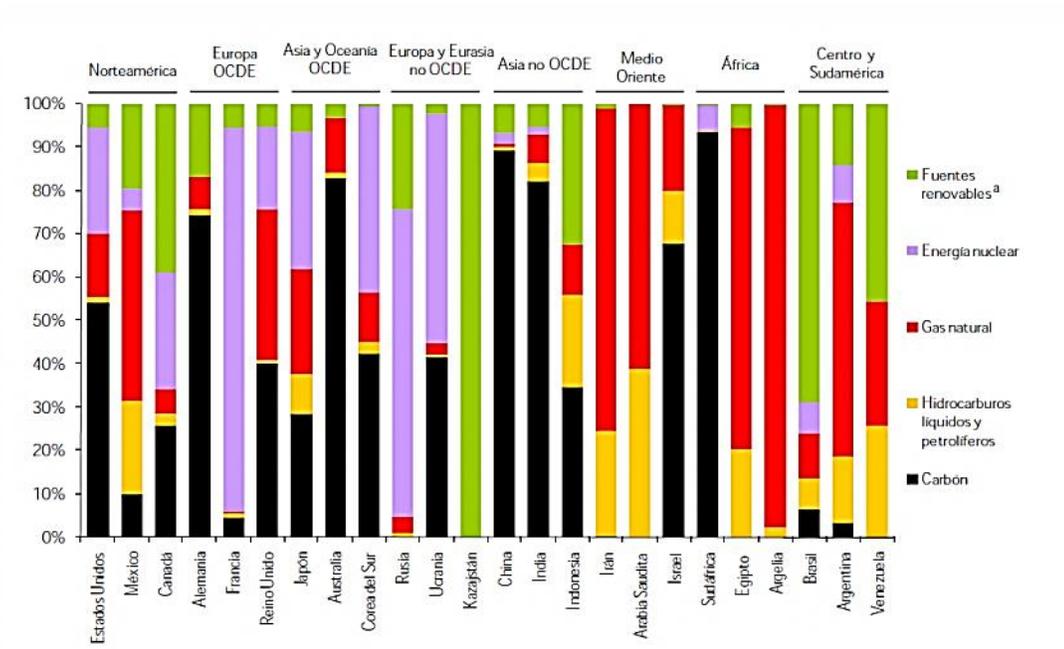
En la actualidad, el aprovechamiento de las fuentes renovables para generar electricidad muestra niveles de desarrollo asimétrico entre economías avanzadas y economías en desarrollo o emergentes. A excepción de Canadá y Turquía, donde se tienen planes para el desarrollo de grandes proyectos hidroeléctricos, en las economías de los países que integran a la OCDE la mayor parte de los recursos hidroeléctricos económicamente explotables ya han sido desarrollados, por lo que la mayor parte del crecimiento en las energías renovables en esos países corresponden a fuentes diferentes a la hidráulica, como lo es el viento y la biomasa. En varios de estos países, principalmente en Europa, se han implementado políticas de estímulo para impulsar su aprovechamiento, por medio de incentivos financieros (feed-in tariffs)<sup>3</sup>, incentivos fiscales, fijación de cotas de mercado, entre otros instrumentos.

<sup>2</sup> OECD Total incluye Australia, Austria, Bélgica, Canadá, Chile, República Checa, Estonia, Dinamarca, Finlandia, Francia, Alemania, Grecia, Hungría, Islandia, Irlanda, Italia, Japón, Corea, Luxemburgo, México, Holanda, Nueva Zelanda, Noruega, Polonia, Portugal, España, Suecia, República Eslovaca, Eslovenia, Suiza, Turquía, Reino Unido y Estados Unidos. Israel, nuevo miembro de la OECD, aún no está incluido.

<sup>3</sup> Una feed-in tariff es un incentivo financiero diseñado para estimular el desarrollo de las fuentes renovables para generar electricidad. Bajo este esquema, el gobierno, a través de la legislación, obliga a las empresas del servicio público o suministradoras a comprar la electricidad producida por generadores privados a un precio superior al de mercado o lo suficientemente alto para estimular la inversión en ese tipo de fuentes. Esto hace posible que a pesar de los altos costos de inversión asociados a las fuentes renovables, los generadores que las utilizan alcancen un retorno positivo de la inversión.

En el caso de las economías emergentes y en desarrollo, se considera que la energía hidroeléctrica será la que aporte el mayor impulso durante los próximos años. Específicamente se proyecta un fuerte desarrollo hidroeléctrico en gran escala en China, India, Brasil y varias naciones del sureste asiático como Malasia y Vietnam. Además de la hidroeléctrica, la energía eólica tendrá una dinámica expansión en China.

En general, el patrón de utilización de fuentes primarias para generar electricidad depende de la disponibilidad y precio, del riesgo asociado al suministro, así como del perfil tecnológico y del portafolio de generación existente en cada región y país (Figura 1.2).

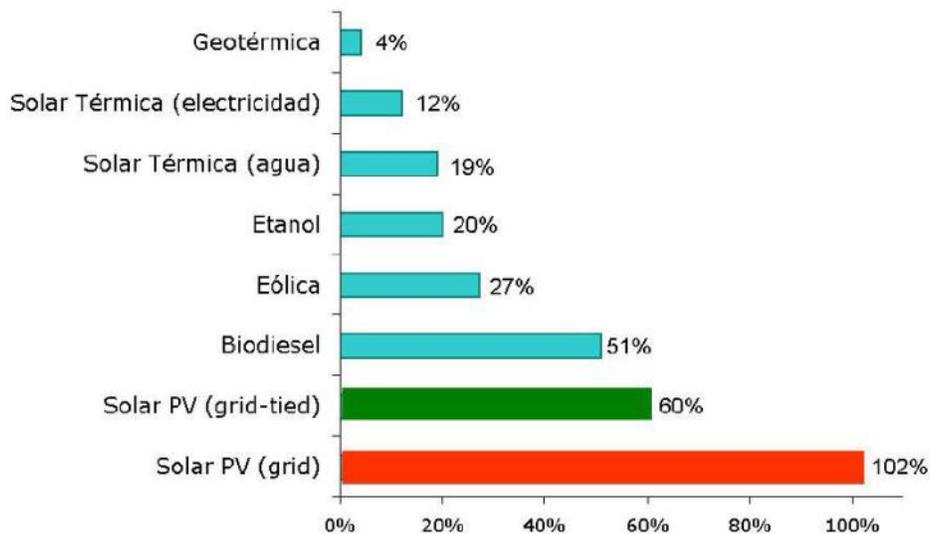


**Figura 1.2.** Fuentes primarias y combustibles para generación de electricidad en países seleccionados, 2008 (participación porcentual).

Fuente: SENER, 2012c.

## Energía solar fotovoltaica

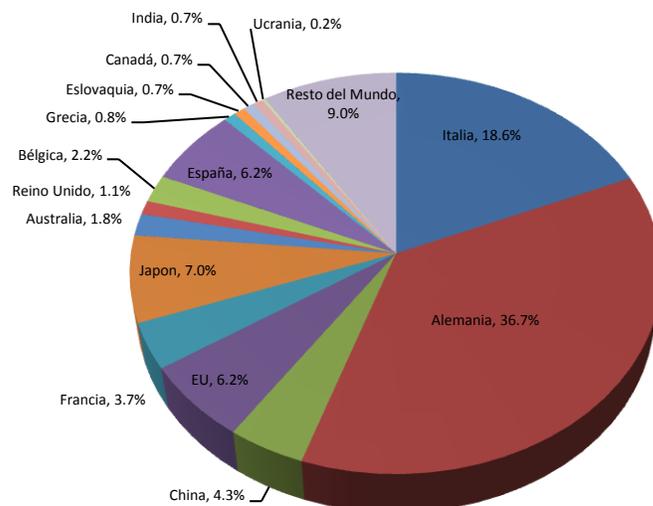
De acuerdo con el análisis de la Asociación Fotovoltaica Europea (EPIA), durante el año 2008 se instalaron unos 5,600 MW en todo el mundo, lo que supuso un crecimiento del 130% en relación a la potencia instalada en 2007 (año en que ya hubo un crecimiento del 50%). Esto se produjo gracias a un tremendo e inesperado incremento de la capacidad global de fabricación y a los exitosos mecanismos de fomento de algunos países, aunque hay otros factores coyunturales que también deben tenerse en cuenta (Figura 1.3). Entre ellos destacan los elevados precios que alcanzó el petróleo, y la facilidad para conseguir financiación (Collado, 2009).



**Figura 1.3.** Tasa media de crecimiento anual de las energías renovables (2004-2009).

Fuente: PVS in Bloom.

En el ranking global de países con mayor crecimiento de energía fotovoltaica, encontramos en los primeros puestos a Alemania (24,700 MW), sorprendentemente Italia (12,500 MW) que abarcaron más de la mitad de la potencia total instalada, acentuando con ello la tónica dominante del mercado solar durante los últimos años, muy concentrado en pocos países (Figura 1.4), (Collado, 2009).



**Figura 1.4.** Porcentaje de participación de países líderes en capacidad instalada acumulada de sistemas fotovoltaicos, 67,350 MW en 2011.

Fuente: Elaboración propia con datos de EPIA, 2011.

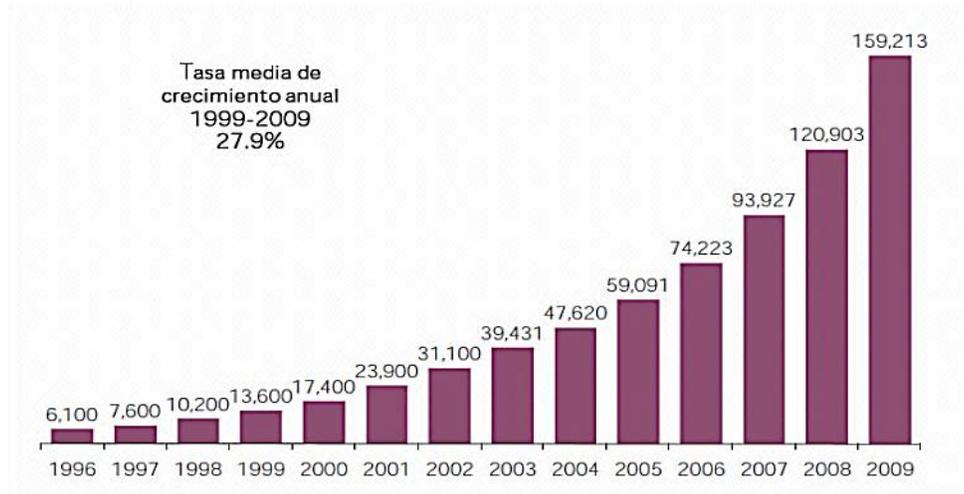
### **Energía solar térmica**

A finales del 2004 se tenía instalados a nivel global 164 millones de m<sup>2</sup> de área de captación, correspondiente a una capacidad instalada de cerca de 115 GWh. China es el mercado líder en el mundo, con el 38% de la capacidad instalada, mientras que los Estados Unidos ocupan el segundo lugar (17%) y Japón el tercero (4.7%). La Unión Europea en su conjunto representa el 10.4% del mercado internacional, donde Alemania, Grecia y Austria son los principales mercados. La producción anual de todo el campo de captadores solares instalados en el 2004 en los 35 países fue de poco más de 68,000 GWh (244,800 TJ), correspondiendo a 10.8 billones de litros de equivalente de petróleo y una disminución de 29.6 millones de toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub>, (OECD/IEA, 2006).

### **Energía eólica**

Durante los años recientes, la capacidad mundial eolieléctrica instalada ha crecido de manera vertiginosa, particularmente en Alemania y España y más recientemente en China. En Europa, el rápido crecimiento de la capacidad instalada ha sido en gran parte propiciado por la implementación de las feed-in tariffs. Durante el periodo 1999-2009, la capacidad eólica

mundial se ha expandido con una tasa de crecimiento promedio anual de 27.9%, al pasar de 13,600 MW a 159,213 MW (Figura 1.5).



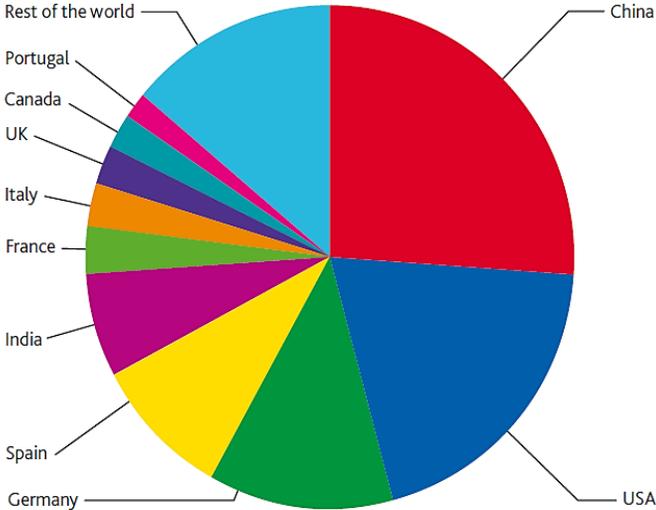
**Figura 1.5.** Evolución de la capacidad eólica mundial, 1996-2009.

Fuente: SENER, 2012c.

Al cierre de 2009 se tenían instalados 159,213 MW de capacidad eólica alrededor del mundo, de los cuales destaca en primer lugar EUA con 35,159 MW (22.1%), China con 26,010 MW (16.3%), Alemania con 25,777 MW (16.2%), luego España con 19,149 MW (12.0%), India 10,925 MW (6.9%), Italia con 4,850 MW (3.0%), entre otros. México ocupa la posición 27 con 402 MW (0.3%) (SENER, 2012c).

Las estadísticas anuales del mercado publicadas el 7 de Febrero de 2012 por el Consejo Mundial de Energía Eólica (Global Wind Energy Council, por sus siglas en inglés), muestran que la industria eólica instaló poco más de 41,000 MW limpios y confiables de nueva energía eólica en el año 2011, con lo que la capacidad total instalada a nivel mundial supera los 238.000 MW a finales del año pasado. Esto representa un incremento del 21%, con un aumento en el tamaño del mercado anual global de poco más del 6%. Hoy en día, alrededor de 75 países de todo el mundo tienen instalaciones comerciales de energía eólica, con 22 de ellos sobrepasando el nivel de 1 GW (GWEC, 2012).

En la siguiente Figura 1.6 se muestran los 10 países más sobresalientes en cuestión de energía eólica acumulada.

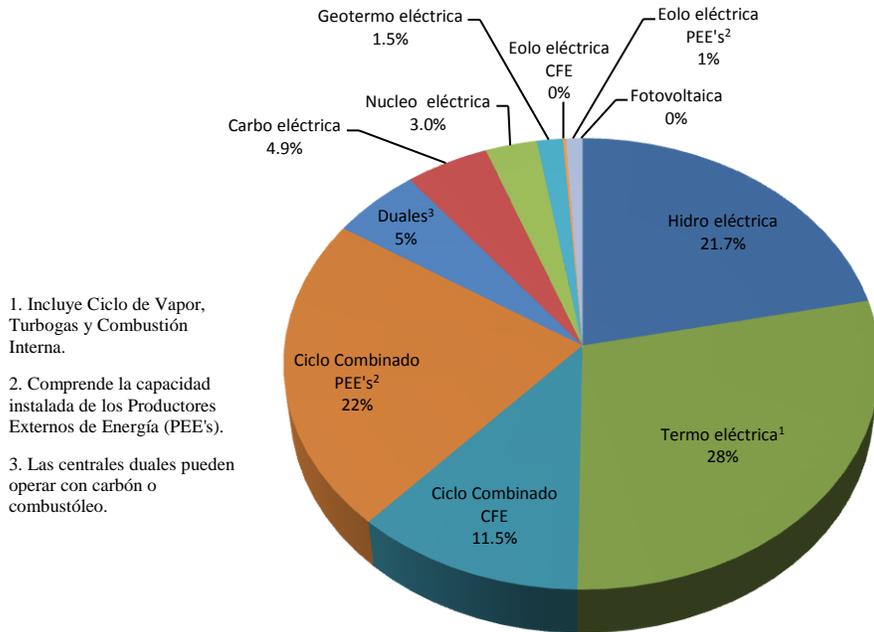


**Figura 1.6.** Primeros 10 países en capacidad eólica acumulada en Diciembre de 2011.

Fuente: GWEC, 2012.

**SITUACIÓN ACTUAL DEL SECTOR ENERGÉTICO EN MÉXICO**

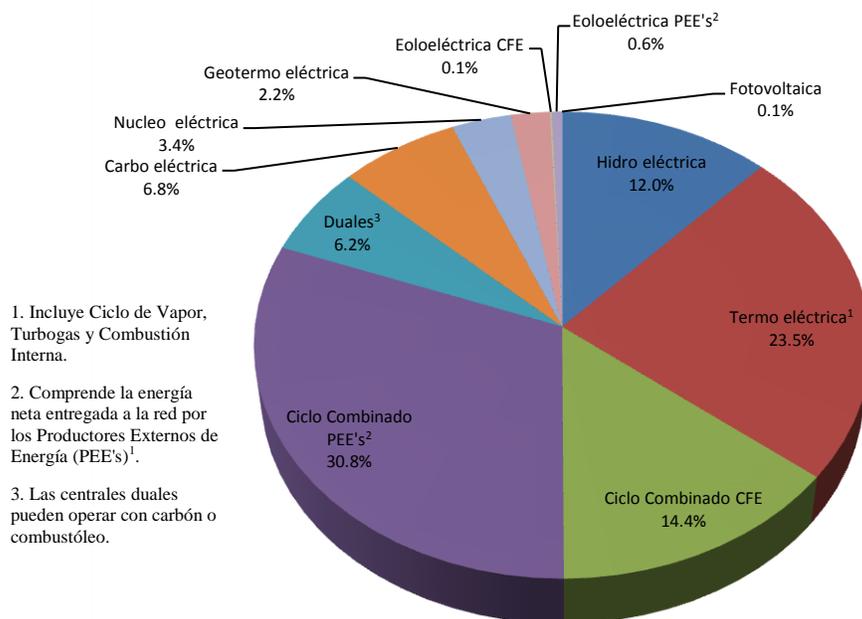
México en el 2012, de acuerdo con los datos preliminares de la Secretaría de Energía, tenía una capacidad efectiva de generación eléctrica igual a 53,114 Megawatts, siendo las Termoeléctricas la principal forma de obtención de electricidad seguido de la Hidroeléctrica (Figura 1.7).



**Figura 1.7.** Capacidad efectiva de generación de electricidad en México.

Fuente: Portal SENER, consultado Enero de 2013.

La figura anterior muestra la capacidad de generación instalada en la republica Mexicana que difiere de la generación bruta de electricidad registrada por la SENER. En el 2012 se obtuvo la cantidad 260,498 Gigawatts-hora de energía eléctrica con las anteriores tecnologías (Figura 1.8 ).



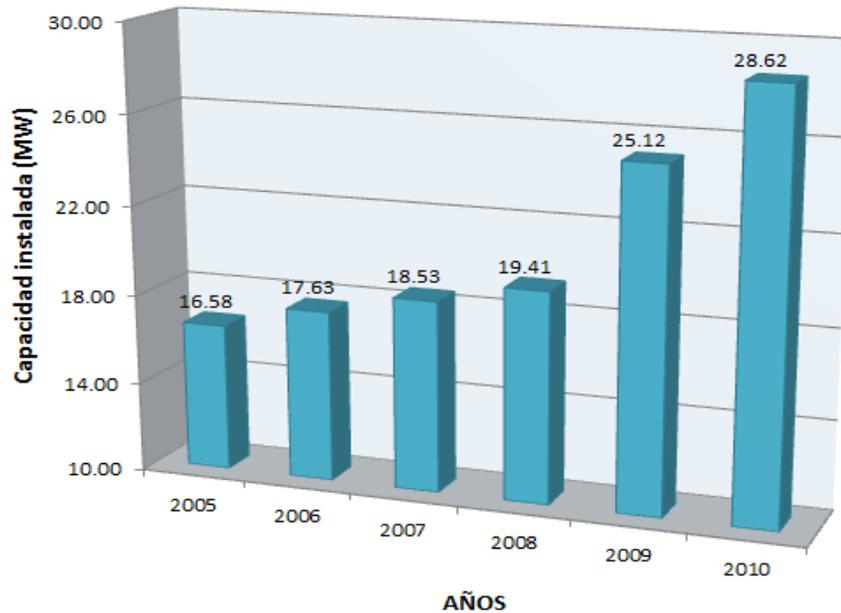
**Figura 1.8.** Generación bruta de energía eléctrica en México en el 2012.

Fuente: Portal SENER, consultado Enero de 2013<sup>4</sup>.

## Energía solar fotovoltaica y termosolar

A diferencia de la energía eólica los sistemas fotovoltaicos han tenido un ritmo de crecimiento más lento en el mismo lapso de años (Figura 1.9). A finales del 2010 se contabilizó un total de 28.6 MW de energía fotovoltaica instalada (SENER, 2011).

<sup>4</sup> De la capacidad efectiva instalada de generación incluyendo la zona centro, 24.05% corresponde a Productores Externos de Energía (PEE), la cual incluye 27 centrales en operación comercial. Tomado de [www.cfe.gob.mx](http://www.cfe.gob.mx). Diciembre de 2012.



**Figura 1.9.** Evolución de la energía fotovoltaica instalada en México 2005-2010.

Fuente: elaboración propia con datos del Balance Nacional de Energía (BNE), 2010.

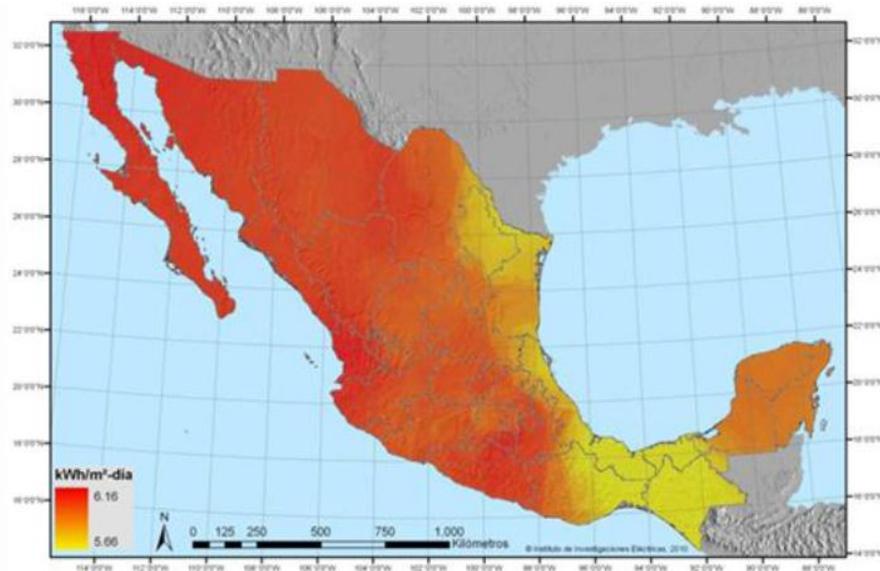
A partir de la publicación de los instrumentos regulatorios que facilitan la interconexión de sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) registró una capacidad adicional instalada de estos sistemas en pequeña y mediana escala por 3.48 MW, en el periodo 2010-2011. Considerando el crecimiento de la capacidad de generación eléctrica por este tipo de sistemas interconectados a la red, principalmente en el sector residencial y de servicios, su crecimiento fue del 763% (1.34 MW) en el año 2010 y 128% (1.95 MW) en 2011. Por otro lado, la capacidad de generación eléctrica por sistemas fotovoltaicos aislados de la red, fue de 0.2 MW (5.71%); se estima que el factor de planta<sup>5</sup> promedio fue de 0.207, (SENER, 2012b).

### **Termosolar de alta concentración**

México se localiza geográficamente entre los 14° y 33° de latitud septentrional; esta característica resulta ideal para el aprovechamiento de la energía solar, pues la irradiación

<sup>5</sup> El factor de planta expresa qué fracción de energía produce una planta en comparación con la que produciría si estuviera funcionando a potencia nominal todo el año. “El mercado de la energía eólica en México” por Laura Bárbara Gómez, 2009.

global media diaria en el territorio nacional, es de alrededor de  $5.5 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$ , siendo uno de los países con mayor potencial en aprovechamiento de la energía solar en el mundo. La irradiación promedio diaria cambia a lo largo de la república y depende también del mes en cuestión, descendiendo ligeramente por debajo de  $3 \text{ kWh/m}^2$  y que puede alcanzar valores superiores a  $8.5 \text{ kWh/m}^2$  (ver Figura 1.10).



**Figura 1.10.** Irradiación solar global diaria promedio anual en el territorio nacional ( $\text{kWh/m}^2$ ).

Fuente: SENER, 2012c.

Actualmente, en México no se cuenta con centrales en operación que utilicen este tipo de tecnologías de aprovechamiento de la energía solar. Sin embargo, de acuerdo con la CFE en el estado de Sonora se encuentra en desarrollo el proyecto 171 CC Agua Prieta II, mismo que consiste de un sistema híbrido de ciclo combinado ( $477 \text{ MWe}$ )<sup>6</sup> y de un campo termosolar de canales parabólicos con una potencia de  $14 \text{ MWe}$ . Se espera que esta central entre en operación en el 2013.

La tecnología que sí se utiliza para el aprovechamiento del calor es con respecto a los colectores o calentadores solares para agua. En el 2011 México contabilizó un total de  $1,978,200 \text{ m}^2$  de superficie de calentadores solares (SENER, 2012a) cuyo uso final ha sido para

<sup>6</sup> Megawatt eléctrico. Término que se refiere a la potencia eléctrica.

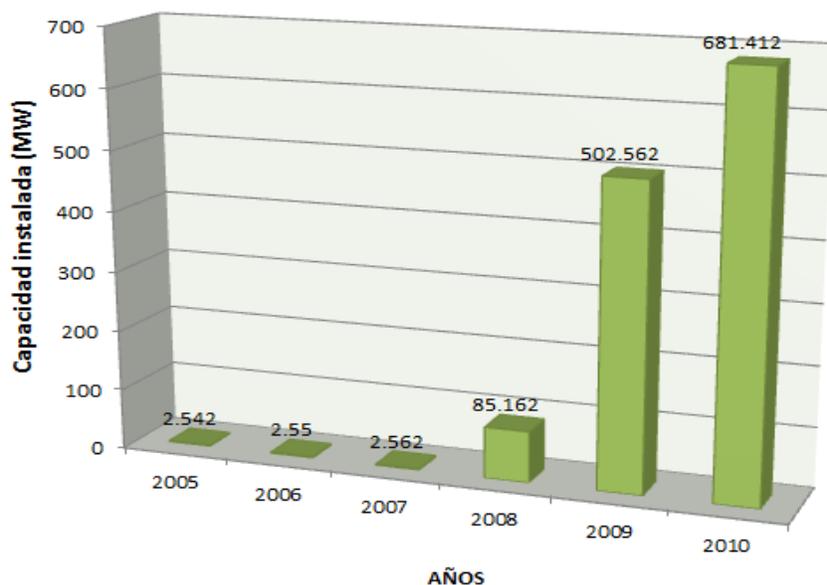
el calentamiento de agua para albercas, hoteles, clubes deportivos, casas habitación, hospitales e industrias. Estos sistemas presentan la ventaja de tener un alto grado de aprovechamiento de la energía radiante puesto que la eficiencia de trabajo oscila entre 50 y 80% (Montoya *et al.* 2011).

Se estima que 1 m<sup>2</sup> de captador solar evita la emisión a la atmósfera de un equivalente de 250 kg de CO<sub>2</sub> al año, así como de gases de invernadero y que el aporte solar promedio equivale a cerca de los 850 kWh/año m<sup>2</sup> de captador solar (SENER, 2007).

## Energía eólica

### Situación Actual

En lo que respecta a la energía eólica en el país, durante los años 2005 a 2007 el promedio del total de la capacidad instalada era de tan solo 2.55 MW, pero en los años 2008 al 2010 la capacidad instalada se incrementó drásticamente como lo muestra la siguiente Figura 1.11.



**Figura 1.11.** Evolución de la energía eólica instalada en México 2005-2010.

Fuente: elaboración propia con datos del Balance Nacional de Energía (BNE), 2010.

De acuerdo con la Secretaría de Energía con relación a la capacidad de generación eoloeléctrica para el servicio público, la CFE tuvo en operación, a finales de 2011, las centrales de La Venta en Oaxaca (84.7 MW), Guerrero Negro en Baja California Sur (0.6MW) y el generador de la COP 16 (1.5 MW), lo que suma una capacidad total de generación de 86.8 MW.

Por su parte, al 31 de diciembre de 2011, la Comisión Reguladora de Energía (CRE) había otorgado 27 permisos para la generación eoloeléctrica en las modalidades de autoabastecimiento, exportación, pequeña producción y productor independiente de energía. De estos permisos, sólo siete corresponden a plantas que entraron en operación en 2011, ubicadas en los estados de Baja California y Oaxaca, con una capacidad autorizada total de 588.3 MW (véase Cuadro 1.1) y una generación autorizada anual 2,063.59 GWh/año. En 2012 entraron en operación 3 plantas en la modalidad de productor independiente de energía, ubicadas en el estado de Oaxaca. A su vez, 17 plantas con 2,281.0 MW de capacidad autorizada, ubicadas en los estados de Baja California, Nuevo León, Oaxaca, San Luis Potosí, Tamaulipas y Veracruz, se encuentran en construcción<sup>7</sup>.

**Cuadro 1.1.** Permisos de generación de energía para plantas eoloeléctricas, al 31 de diciembre de 2011.

Estado Actual	No. De Plantas	Capacidad Autorizada (MW)	Energía Autorizada (GWh/año) <sup>8</sup>	Localización
En construcción y por iniciar obras	17	2,281	8,062.23	Baja California, Nuevo León, Oaxaca, San Luis Potosí, Tamaulipas y Veracruz
En operación en 2011	7	588.3	2,063.59	Oaxaca
Entrada en operación en 2012	3	306	979.2	Oaxaca y Baja California
<b>Total</b>	<b>27</b>	<b>3,175.3</b>	<b>11,105</b>	

Fuente: Prospectiva de Energía Renovables 2012-2026. SENER, 2012c.

Según informes de la Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMDEE) en el 2012 México ha superado ya los 1,000 MW de capacidad instalada. Esta cifra representa prácticamente un 2

<sup>7</sup> CRE. (2012). "Permisos para la Generación Privada." Obtenido el 30 de junio de 2012, de la página <http://cre.gob.mx/articulo.aspx?id=171>.

<sup>8</sup> CRE. Energía autorizada por la CRE para cada permisionario, con base en los cálculos de diseño del proyecto.

% de la capacidad total de generación del país lo cual es muy significativo. Al cierre de 2011 había una generación de 519 MW, pero con la terminación de nuevas instalaciones en meses recientes la capacidad instalada llegó ya al millar, que bastaría para proveer de electricidad a una urbe de unos dos millones de habitantes.

### Potencial de Aprovechamiento

En México, el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) lleva a cabo estudios para estimar el potencial eoloenergético nacional. Estos estudios se basan en el supuesto de que sólo el 10% del área total con potencial es aprovechable para la instalación de parques eólicos. Esto debido a factores orográficos, ambientales, sociales y de factibilidad técnica y económica. Como resultado, el potencial energético del recurso eólico estimado en el país es del orden de 71 mil MW, considerando factores de planta superiores a 20%.

Para factores de planta mayores que 30%, se estima un potencial de 11,000 MW y con más de 35% de factor de planta se estima en 5,235 MW (véase Cuadro 1.2)<sup>9</sup>. Este último potencial representa los proyectos de inversión más atractivos; sin embargo, en las condiciones que rigen actualmente el mercado nacional de electricidad, los proyectos con factores de planta inferiores al 30% resultan económicamente factibles en ciertos nichos de oportunidad.

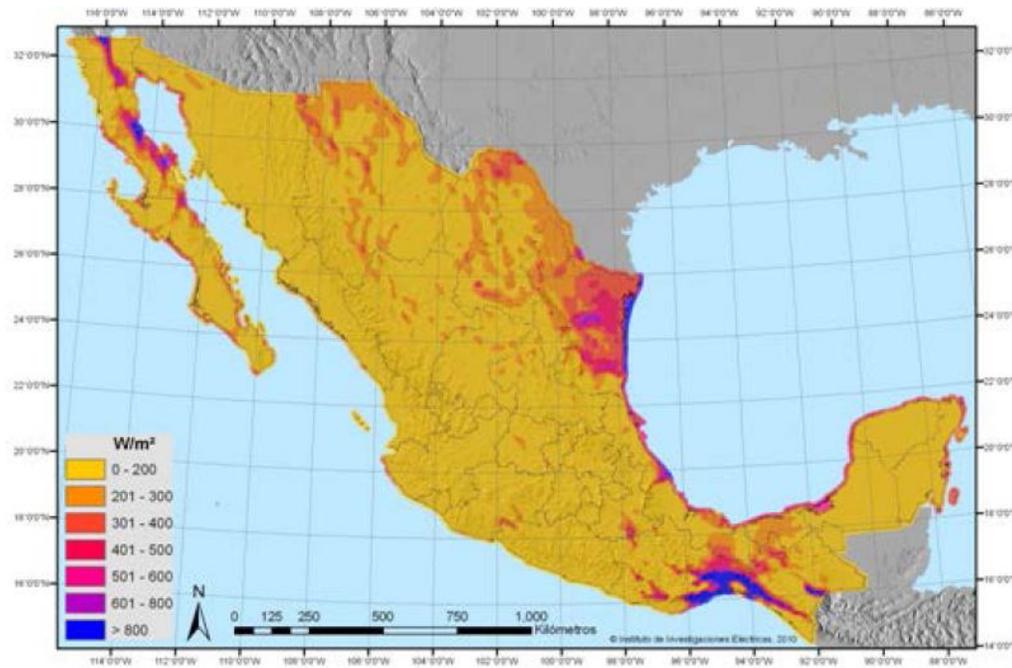
**Cuadro 1.2.** Potencial estimado de generación eoloeléctrica en México

Factor de Planta	Porcentaje de Terreno	Capacidad Instalable (MW)
20-25	56.7	40,268
25-30	27.5	19,535
30-35	8.4	5,961
35-40	3.5	2,500
>40	3.9	2,735

Fuente: Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026. SENER, 2012b.

<sup>9</sup> IIE. (2010). "Explorador de Recursos Renovables." Obtenido el 10 de enero de 2011, de la página <http://sag01.iie.org.mx/eolicosolar/Default.aspx>.

De acuerdo con estos estudios, las regiones con mejor potencial, se ubican en la zona del Istmo de Tehuantepec, la costa del Golfo de México (particularmente la zona norte), y en la parte norte de la Península de Baja California (véase Figura 1.12 )<sup>10</sup>.



**Figura 1.12.** Densidad de potencia del viento a 80 metros de altura en la República Mexicana.

Fuente: SENER, 2012c.

Por otra parte, según la Secretaría de Energía se han realizado estudios específicos en algunas regiones con potenciales significativos, entre las que destacan, el Istmo de Tehuantepec, las penínsulas de Yucatán y Baja California, y la parte norte del Golfo de México; tan sólo para Oaxaca, los estudios del National Renewable Energy Laboratory de Estados Unidos y diversas instituciones mexicanas, han estimado un potencial superior a los 40,000 MW.

De acuerdo con el estudio elaborado por la consultora PWC para la Asociación Mexicana de Energía Eólica, en donde participaron los principales actores del sector por parte de instituciones públicas, privadas y la academia, se partió de la base de un potencial eólico nacional de 50,000 MW para factores de planta de al menos 20%, a partir de la información y

<sup>10</sup> IIE. (2010). "Explorador de Recursos Renovables." Obtenido el 10 de enero de 2011, de la página <http://sag01.iie.org.mx/eolicosolar/Default.aspx>.

tecnologías vigentes. Además, se consensuó que existe un potencial competitivo de 12,000 MW eólicos que pudieran ser desarrollados en el país hacia el 2020 dados los escenarios de precios de gas natural vigentes. A partir de este potencial competitivo, se cuantificó que se podría tener un impacto estimado en el PIB de 167 miles de millones de pesos, así como impactos por otros 31 mil millones de pesos asociados con la renta de terrenos y desarrollo de infraestructura de transmisión. Dicha capacidad permitiría también reducir hasta en un 17% las importaciones diarias de gas natural hacia el 2020 sin afectar los márgenes de reserva del SEN, capturar entre el 8 y el 15% de las emisiones evitadas de CO<sub>2</sub> estimadas para el mismo periodo y generar hasta 48,000 empleos directos e indirectos en los sectores involucrados de la industria nacional. (SENER, 2012c).

Las tecnologías de generación de energía aquí descritas se encuentran en diferentes fases de desarrollo en México y en diferentes estados de uso. El siguiente cuadro propuesto por el Dr. Huacuz Gerente de Energías no Convencionales del Instituto de Investigaciones Eléctricas, expone las posibles aplicaciones de cada una de las energías renovables en México.

**Cuadro 1.3.** Posibles aplicaciones de las tecnologías de energía renovable por sector.

	Tecnología	SECTOR				
		Eléctrico	Municipal	Industrial	Agua	Agrícola/Rural
<b>OPORTUNIDADES</b>	<b>Solar Térmico</b>	Potencia masiva, receptor central y canal parabólico		Cogeneración de calor y electricidad	Concentradores para limpieza y desinfección de agua	
	<b>Solar Fotovoltaico</b>	Generación distribuida para cortar picos y soporte de red	Alumbrado publico, parques y áreas protegidas	Protección catódica, señalización, control remoto, alarmas, telecomunicaciones	Estaciones climatológicas, operación remota de compuertas, telecomunicaciones	Servicios básicos domiciliarios y comunales. Actividades productivas a pequeña escala
	<b>Viento</b>	Producción de potencia masiva. Soporte para el despacho de hidroeléctricas	Autogeneración en pequeña escala	Autogeneración a escala masiva	Bombeo de agua	Bombeo de agua, operaciones mecánicas
	<b>Biomasa</b>	Plantaciones energéticas para producción de potencia masiva	Autogeneración con biogás de rellenos sanitarios y plantas de tratamiento de agua	Generación de potencia masiva con plantaciones de energía	Autogeneración con biogás de plantas de tratamiento de agua	Producción local de electricidad con residuos agrícolas o del bosque
	<b>Pequeñas Hidroeléctricas</b>	Generación distribuida	Autogeneración en pequeña escala	Autogeneración en pequeña escala	Autogeneración para retro-bombeo	Mini-redes y usos productivos
	<b>Celdas de Combustible</b>	Generación distribuida	Generación distribuida en edificios municipales	Autogeneración para operaciones de alta calidad/confiabilidad		Aplicaciones de alta calidad/fiabilidad (clínicas rurales)

**CLASIFICACIÓN DE TECNOLOGÍAS**

Sin Desarrollo ni Aplicación	Desarrollada y sin Aplicar	Sub Desarrollada y Aplicada	Completamente Desarrollada y Aplicada
------------------------------	----------------------------	-----------------------------	---------------------------------------

Fuente: Huacuz, 2011.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. General**

- Conocer las características principales y beneficios que puede aportar la energía fotovoltaica, térmica y eólica, como fuente de energía alternativa, con el fin de experimentar en aplicaciones dentro del COLPOS, y en zonas rurales sin suministro eléctrico.

### **2.2. Específicos**

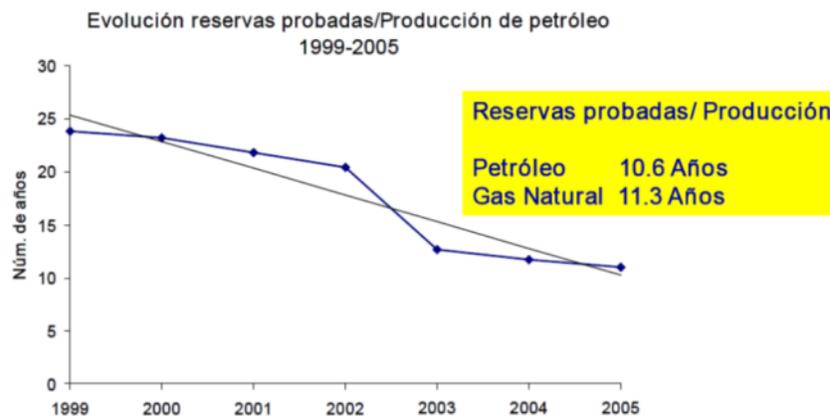
- Evaluar la potencia eléctrica generada por un sistema híbrido de paneles solares y aerogenerador instalado en el Colegio de Postgraduados Campus Montecillo.
- Estimar los requerimientos energéticos de hogares rurales.
- Calcular la cantidad de paneles solares necesario para satisfacer los requerimientos energéticos para un hogar rural.
- Evaluar la eficiencia de aprovechamiento térmico de un calentador solar para vivienda.

### 3. JUSTIFICACIÓN

La energía que disponemos actualmente proviene básicamente de fuentes fósiles (petróleo, gas y carbón), geotérmica y nucleares, la utilización de estos recursos no es inocua y genera distintos tipos de impactos ambientales y de riesgos para la salud, entre ellos, contaminación atmosférica, lluvia ácida, escapes, accidentes y residuos radiactivos.

Los combustibles fósiles en su combustión o quema emiten dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), gas que en sí mismo no es contaminante, pero su concentración en exceso en la atmósfera incrementa, junto con otros componentes, el efecto invernadero. Por su parte, los combustibles nucleares emiten radiaciones que son letales para el ser humano y persistentes durante muchos años.

Para el caso de México las reservas del combustible fósil van disminuyendo cada año como lo muestra la siguiente Figura 3.1.



**Figura 3.1.** Producción de petróleo en México.

Fuente: Informe de ANES, 2007.

J. Rodríguez menciona que el 22% de la población mundial, quienes viven en países del primer mundo, consumen el 82% de la energía total, mientras que el 78% de la población deben conformarse con el 18% restante.

El gran reto es proporcionar una energía limpia, segura y mejor repartida a los 9,000 millones de personas que poblaremos la Tierra en el año 2025, una condición imprescindible para alcanzar un modelo de desarrollo más justo y sostenible.

Para el caso de México aún hay muchas poblaciones donde la red de electrificación no ha llegado.

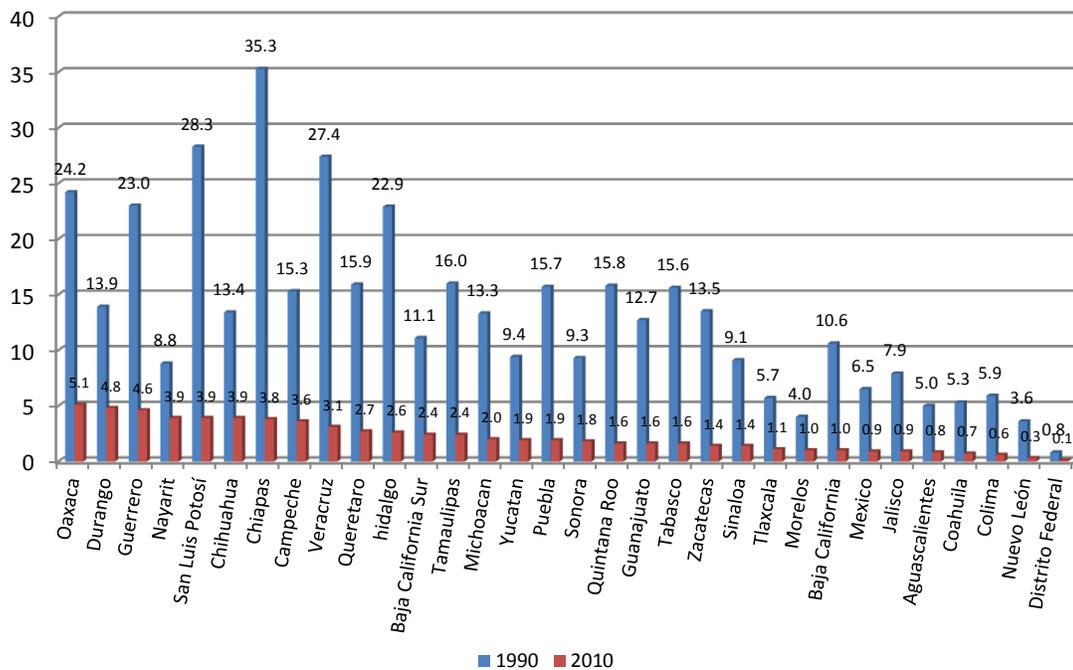


**Figura 3.2.** Viviendas que no disponen de energía eléctrica.

Fuente: Nuevo Atlas Nacional de México, 2003

En 1990 en Chiapas el 35.3% de su población no tenía acceso a los servicios de energía eléctrica mientras que el Distrito Federal tan solo el 0.8% carecían del servicio; existía una brecha de 34.5%. En el 2010 esta brecha bajó a tan solo 3.7% debido a que el porcentaje de personas en viviendas sin acceso a la energía eléctrica bajó a 3.8% en el estado de Chiapas y a 0.1% en el Distrito Federal.

Aún con el incremento de viviendas con acceso a energía eléctrica en México, para el 2010 todavía había aproximadamente 3, 836,066 personas sin este servicio (INEGI, 2011).

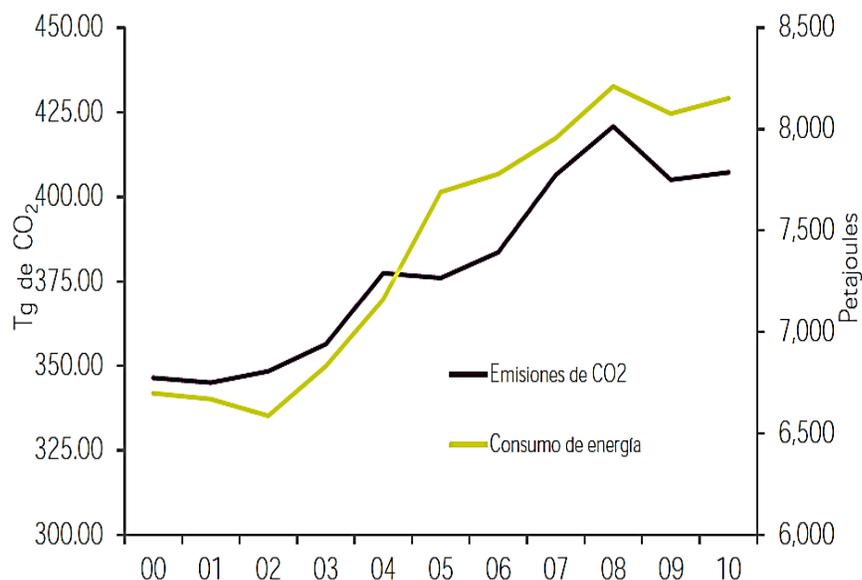


**Figura 3.3.** Porcentaje de la población en viviendas con carencia por servicio de electricidad según entidad federativa, 1990-2010.

Fuente: CONEVAL<sup>11</sup>, 2010.

En la Figura 3.4 se observa la relación que existe entre el comportamiento del consumo de energía en nuestro país y las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas. De 2000 a 2010 la tasa de crecimiento promedio anual del consumo de energía fue de 2%, mientras que las emisiones crecieron a un ritmo de 1.6%. En 2010, 89.8% de la oferta interna bruta, equivalente al consumo nacional de energía, provino de combustibles fósiles, mientras que el 10.2% restante fue aportada por combustibles limpios (SENER, 2011).

<sup>11</sup> Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL). Carencia en el acceso a los servicios básicos en la vivienda, 2010.



**Figura 3.4.** Evolución del consumo nacional de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub> del sector energético (Petajoules<sup>12</sup> y Teragramos).

Fuente: Secretaría de Energía, 2011.

En 2010 las emisiones totales fueron de 407.3 teragramos (Tg) de CO<sub>2</sub>, cifra 0.5% mayor que la registrada en 2009, 49.7 toneladas de CO<sub>2</sub> por cada 1,000 Petajoules consumidos; es decir, promediaron 3.8 toneladas de CO<sub>2</sub> por habitante, 0.9% mayores que las de 2009.

El sector del transporte contribuyó con la mayor parte de las emisiones de CO<sub>2</sub>, ya que generó 38.5% del total y el consumo de combustibles para generación de electricidad aportó 28.2% de las emisiones totales, con un crecimiento de 0.2% sobre el año anterior que fue resultado principalmente del incremento de 9.5% en la generación a partir de carbón térmico, cuyo factor de emisión es 25.8 tons de carbono por Terajoule (t CO<sub>2</sub>/TJ), (SENER, 2011).

<sup>12</sup> Un petajoule es una unidad de medida de calor y energía que se utiliza para cuantificar grandes cantidades de energía. Equivale a poco más de 277 millones de kilowatts hora (kWh), (Revista EstePaís, 2012).

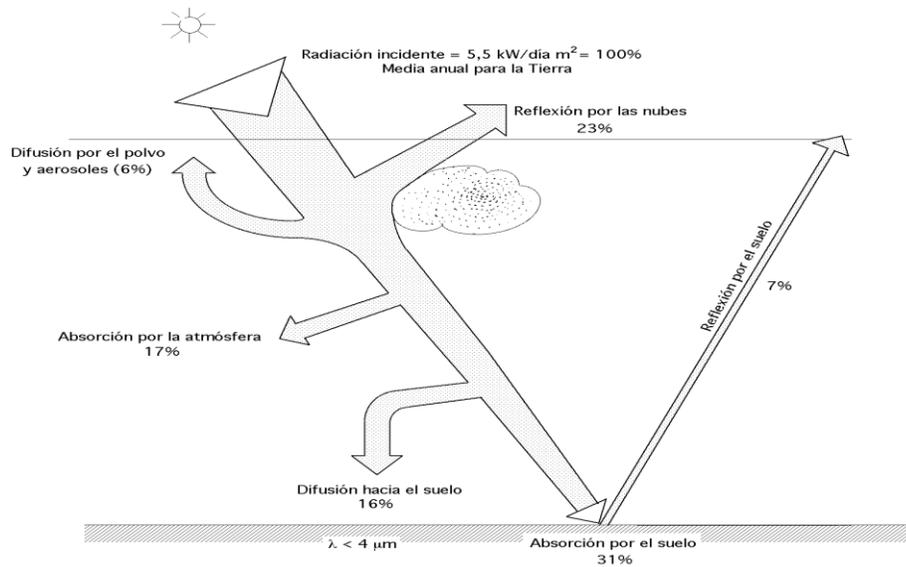
## 4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Desde el punto de vista energético la Tierra recibe en el exterior de su atmósfera un total de  $1.367 \text{ kW/m}^2 \pm 7 \text{ W/m}^2$ , que se conoce como constante solar y cuyo valor se toma cuando la Tierra está a su distancia media del sol ( $149.5 \times 10^6 \text{ km}$ ), (NORMEX, 2006).

Los  $1.73 \times 10^{14} \text{ kW}$  de energía solar que inciden sobre la Tierra, se reparten en la siguiente forma (Fernández, 2003.):

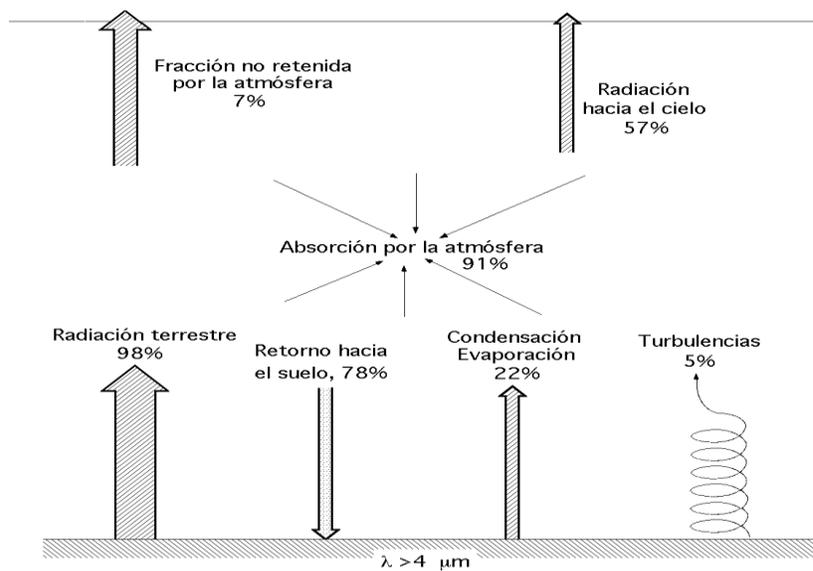
- Energía solar reflejada por la atmósfera hacia el espacio exterior, 30.16%,  $0.52 \times 10^{14} \text{ kW}$ .
- Energía solar que se utiliza en calentar la atmósfera, 46.40%,  $0.80 \times 10^{14} \text{ kW}$ .
- Energía solar que se utiliza en la evaporación de los océanos, 23.20%,  $0.40 \times 10^{14} \text{ kW}$ .
- Energía solar que se utiliza en generar perturbaciones atmosféricas, como el viento, (energía mecánica), 0.21%,  $0.0037 \times 10^{14} \text{ kW}$ .
- Energía solar utilizada en la fotosíntesis, 0.02%,  $0.0004 \times 10^{14} \text{ kW}$ .

De todo lo anterior, sólo el 47% de la energía solar incidente alcanza la superficie terrestre, de forma que el 31% lo hace directamente y el otro 16% después de ser difundida por el polvo, vapor de agua y moléculas de aire. El 53% de la energía restante no alcanza la superficie de la Tierra, ya que un 2% es absorbida por la estratosfera, principalmente por el ozono, el 15% por la troposfera, (agua, ozono y nubes), en total  $2 + 15 = 17\%$  y por otra parte, un 23% es reflejada por las nubes, un 7% es reflejada por el suelo y el 6% restante corresponde a aquella energía difundida por la atmósfera que se dirige hacia el cielo (Ver Figura 4.1 y Figura 4.2).



**Figura 4.1.** Balance de radiación solar.

Fuente: Mera, 2006.



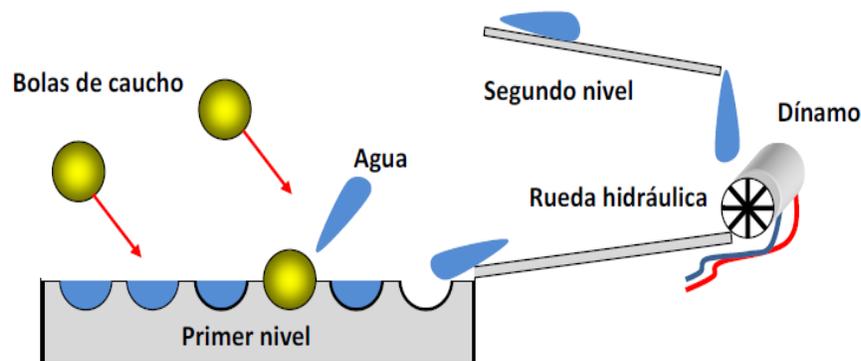
**Figura 4.2.** Balance de radiación terrestre.

Fuente: Mera, 2006.

## 4.1. Energía Solar Fotovoltaica

La conversión de la energía solar en energía eléctrica se debe al fenómeno físico de la interacción de la radiación luminosa con los electrones en los materiales semiconductores, fenómeno conocido como efecto fotovoltaico, este fenómeno tiene lugar en la célula fotovoltaica (Madrid, 2009).

Las celdas fotovoltaicas son dispositivos de estado sólido que convierten la luz solar en electricidad. Carecen de partes móviles o fluidos a presión y temperatura. Son altamente confiables y razonablemente eficientes (Agredano *et al.*, 1998). Haciendo la analogía del efecto fotoeléctrico con un sistema hidráulico, se supone a los fotones como bolas de caucho que golpean a un tablero con pequeñas gotas de agua (electrón) lo cual genera que éstas eleven su nivel de energía, al descender de nivel pasan a través de un dínamo (celda fotovoltaica) que convierte la carga de agua en electricidad y regresando a la gota de agua a su posición inicial antes de ser golpeada (ver Figura 4.3).



**Figura 4.3.** Analogía de absorción de fotones y efecto fotoeléctrico.

Fuente: Becerra, 2011.

La cantidad de electricidad que puede producir una celda fotovoltaica es pequeña (alrededor de 3.4 W de corriente directa CD). Sin embargo, es posible interconectar varias celdas para lograr las corrientes y voltajes requeridos para una aplicación dada. Desde el punto de vista del Sector Eléctrico, una de las aplicaciones más atractivas de las celdas fotovoltaicas en estos momentos es el alumbrado de zonas difíciles de atender con la red eléctrica (Becerra, 2011).

### 4.1.1. Célula fotovoltaica

La célula fotovoltaica es un dispositivo formado por una delgada lámina de un material semiconductor, frecuentemente de silicio. Silicio Mono-cristalino: de rendimiento energético entre 15-17 %; Silicio Poli-cristalino: de rendimiento energético entre 12-14%; Silicio Amorfo: con rendimiento energético menor del 10%. Generalmente una célula fotovoltaica tiene un grosor que varía entre los 0.25 y los 0.35 mm y una forma generalmente cuadrada, con una superficie aproximadamente igual a 100 cm<sup>2</sup>.

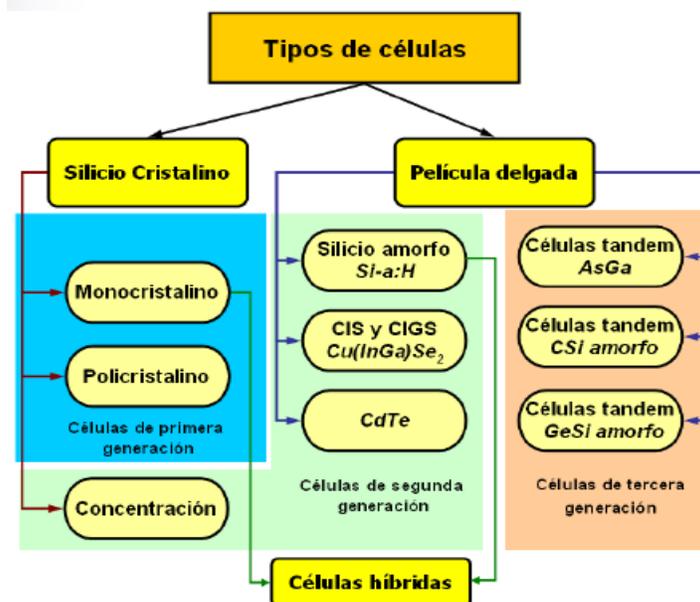
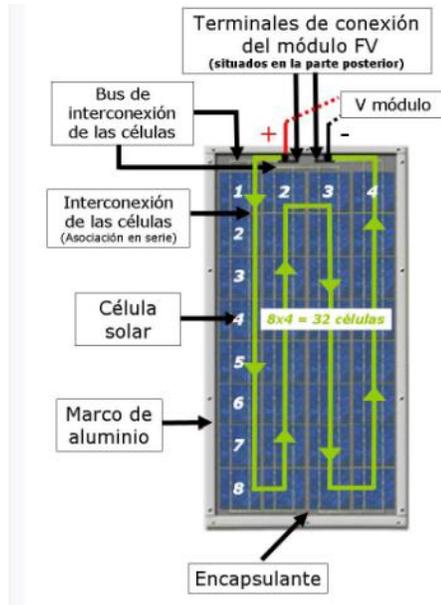


Figura 4.4. Clasificación de las células fotovoltaicas.

Fuente: Becerra, 2011.

### 4.1.2. Módulos fotovoltaicos

El módulo fotovoltaico es una estructura robusta y manejable sobre la que se colocan las células fotovoltaicas. Los módulos pueden tener diferentes tamaños (los más utilizados tienen superficies que van de los 0.5 m a los 1.3 m<sup>2</sup>) y constan normalmente de 36 células conectadas eléctricamente en serie.



**Figura 4.5.** Componentes de un módulo fotovoltaico.

Fuente: Becerra, 2011.

Los módulos tienen la característica de que son fácilmente interconectados y son convenientes para producción en masa. A continuación se muestran las agrupaciones que se pueden tener con estos módulos.



**Figura 4.6.** Formas de agrupación de los módulos fotovoltaicos.

Fuente: Becerra, 2011.

### 4.1.3. Sistemas fotovoltaicos autónomas e interconectados

Los sistemas fotovoltaicos pueden clasificarse, de acuerdo a la aplicación que tienen, en dos tipos: Aplicaciones Autónomas o Aisladas y Aplicaciones Conectadas a Red (ver Figura 4.7 ).

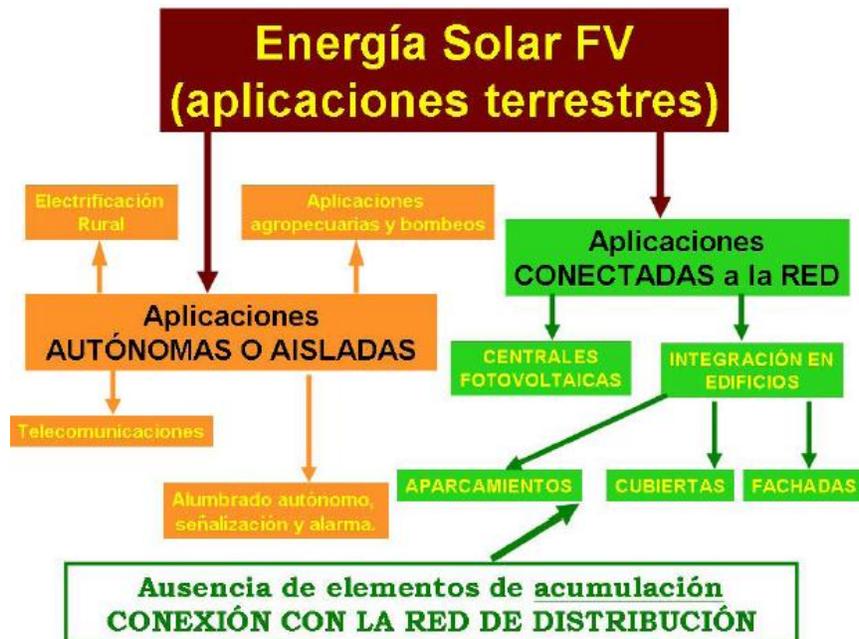


Figura 4.7. Tipos de aplicación de los sistemas fotovoltaicos.

Fuente: PVS in Bloom, 2010.

#### *Sistemas fotovoltaicos autónomos*

Los sistemas fotovoltaicos autónomos (SFA) están constituidos, en lo fundamental, por los paneles fotovoltaicos, que constituyen el generador de energía eléctrica, las baterías para almacenar la energía y utilizarla en los momentos de ausencia de la radiación solar, y la carga eléctrica que se va a consumir mediante equipos eléctricos domésticos y/o industriales.

Los SFA son usados frecuentemente en locaciones aisladas para producir electricidad en áreas inaccesibles para la red de potencia eléctrica y de esta forma mejorar las condiciones de salud, educación, comunicación y recreación de la población, al tiempo que favorece la agricultura y el abastecimiento de agua. Los más simples SFA usan la electricidad en forma de corriente continua y la energía es producida donde y cuando es necesaria, sin necesidad de complejos

sistemas de control y transmisión de energía. Sistemas de alrededor de 500 W pesan menos de 70 kg, lo que permite una fácil transportación e instalación (ver Figura 4.8).



**Figura 4.8.** Esquema de un sistema fotovoltaico aislado.

Fuente: <http://e-ducativa.catedu.es>

El almacenamiento de la energía eléctrica convierte a los SFA en una fuente fiable de energía, ya sea de día o de noche, independientemente de las condiciones climáticas. Luminarias, sensores, TV, equipos de audio, herramientas, etc., se pueden usar con los SFA añadiéndoles baterías para el almacenamiento de energía. De esta forma se genera energía por el día y se almacena el excedente en las baterías para su uso en la noche. El número de baterías debe estar en correspondencia con el consumo energético de la carga y el número de horas de autonomía (ausencia de radiación solar) al cual se aspira. El uso de los SFA conlleva la necesaria optimización del consumo energético de las cargas. Por ejemplo, se deberán utilizar luminarias eficientes cuya relación entre lúmenes/watt sea la óptima. Los usuarios deben tener, por lo tanto, una cultura mínima del consumo energético, teniendo en cuenta las posibilidades del sistema.

El empleo de las baterías tiene dos inconvenientes fundamentales: el aumento de los costos del sistema y el hecho de que sólo puede extraerse 80% de la energía almacenada. Además de los SFA que funcionan con corriente directa (DC), existen los que trabajan con alterna (AC),

donde es necesario un convertidor de DC/AC, que en la actualidad transfieren la energía eléctrica directa en alterna con una eficiencia de conversión superior a 95%.

### *Sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica*

Los sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica (SFCR) constituyen una de las aplicaciones de la energía solar fotovoltaica que más atención están recibiendo en los últimos años, dado su elevado potencial de utilización en zonas urbanizadas próximas a la red eléctrica.

Estos sistemas están compuestos por paneles fotovoltaicos que se encuentran conectados a la red eléctrica convencional a través de un inversor, por lo que se produce un intercambio energético entre la red eléctrica y el sistema fotovoltaico. Así, el sistema inyecta energía en la red cuando su producción supera el consumo local, y extrae energía de ella en caso contrario (Figura 4.9)



**Figura 4.9.** Esquema de un sistema fotovoltaico interconectado a la red eléctrica nacional.

Fuente: <http://soltec-energia.blogspot.mx/>

Los SFCR presentan una gran ventaja porque no necesitan baterías ni reguladores de carga, por lo que se convierten en sistemas más baratos. En cambio, los inversores sí requieren de

mayores exigencias, ya que deberán estar conectados en fase con la tensión de la red. Uno de los factores favorables de los sistemas interconectados es la posibilidad de mejorar la calidad del servicio de la energía suministrada por la red, procurando que la máxima producción del sistema fotovoltaico coincida con horas en que los problemas de suministro de las compañías eléctricas sean más graves.

La energía distribuida representa ventajas en comparación con la transmisión convencional que se realiza mediante las plantas termoeléctricas. La energía generada por estas plantas es transportada a altos voltajes a través de grandes distancias, hasta una carga distribuidora donde el voltaje es disminuido para su uso, provocando así considerables pérdidas de energía. En cambio, las plantas fotovoltaicas son construidas cercanas a la demanda eléctrica y son muchos más fáciles de construir, de instalar y de expandirse en la medida en que la demanda se incrementa. A lo anterior se le añade la ventaja de que no consumen combustibles fósiles, no contaminan el aire ni el agua, y son silentes.

Los sistemas conectados a la red se van a descartar en el análisis de este proyecto, centrando el estudio en los sistemas autónomos o aislados, para dotar de energía a una vivienda rural que no cuenta con el suministro eléctrico nacional.

#### **4.1.4. Repercusión de la energía en la sociedad**

Para abastecer las necesidades de la población, es necesario disponer de energía para cubrir sus expectativas y tener una previsión a medio y largo plazo de futuras necesidades. Hoy en día, las fuentes a partir de las cuales se obtiene la energía se han convertido en un aspecto muy a tener en cuenta, tanto por su sostenibilidad, como por su impacto medioambiental.

Según diferentes estudios indican, un aumento en los precios del petróleo y del gas natural en los próximos años, no obstante esto no repercutirá de forma negativa al consumo de energía, ya que se estima un incremento del 57% entre 2004 y 2030, (Según informes elaborados por la Energy Information Administration, del Gobierno de Estados Unidos) (Casas, *et al.*, 2010).

#### **4.1.5. Repercusión medioambiental en plantas fotovoltaicas**

De acuerdo con Casas, 2010 la energía solar fotovoltaica, como fuente renovable representa una fórmula energética radicalmente más respetuosa con el medio ambiente que cualquier otra energía convencional.

El impacto principal se produce en la fase de extracción de la materia prima de los paneles solares, el silicio, que a pesar de ser el material más abundante de la tierra se precisan grandes cantidades de energía para su transformación.

Todos los componentes necesarios para la producción de energía solar son fácilmente reciclables al final de su vida. Pero sin duda el efecto visual, es el principal impacto que tiene durante la fase de explotación, aunque es posible atenuar mediante la integración en el paisaje o los edificios.

#### **4.2. Energía Solar Térmica**

Uno de los principales usos finales de la energía es el calentamiento de fluidos, principalmente aire y agua. El agua caliente tiene múltiples utilidades en el sector residencial, servicios e industrial.

El calentamiento solar de agua es un proceso que puede ser más económico que los procedimientos que utilizan combustibles fósiles, además de que sus impactos al medio ambiente son prácticamente nulos.

De acuerdo con su funcionamiento los colectores o calentadores solares se clasifican en dos tipos:

**Activos.** Los calentadores solares activos son aquellos que utilizan una bomba o algún tipo de energía externa para mover el agua dentro de su ciclo.

**Pasivos.** Los generadores solares pasivos no requieren de energía externa para funcionar. Utilizan el principio de convección para mover el agua dentro del sistema.

#### **4.2.1. Componentes de un calentador solar**

Existen cuatro componentes básicos en un calentador solar (Figura 4.10):

##### **➤ Colector**

También llamado captador solar o panel termosolar, componente que se encarga de transferir la energía solar al agua. Consiste en un arreglo de tuberías o conductos por donde fluye el agua. El arreglo puede estar pintado de negro mate o cubierto con pinturas selectivas como el cromo negro para evitar reflejar la luz y así lograr una mayor absorción de calor.

El colector suele estar contenido en una caja con paredes externas resistentes a la intemperie y con paredes internas dotadas de aislamiento térmico. La parte superior lleva uno o varios vidrios o materiales transparentes capaces de dejar pasar la luz y proteger de la intemperie, utilizados para generar efecto invernadero dentro el colector.

Existen diferentes variantes de colector:

##### ***Tubos y Placas***

En el llamado colector plano, se disponen dos tubos horizontales y se conectan con varios tubos verticales. Cada uno de estos tiene acoplada una placa normalmente de lámina delgada. Las láminas sirven para captar el calor y transmitirlo por conducción a la tubería. El arreglo de tubos se coloca horizontalmente sobre el suelo, con una inclinación específica dependiendo de la localidad terrestre. El agua entra por uno de los extremos del tubo horizontal más bajo, sube por todos los tubos verticales y sale por el extremo contrario del tubo horizontal más alto.

##### ***Serpentín***

Una manguera o tubo se dispone en una formación de vaivén o espiral, donde la superficie expuesta al sol recibirá la energía directamente sobre el conducto.

### ***Tubos de vacío***

El colector utiliza tubos de vidrio al vacío, dentro de estos se encuentran los conductos del colector. El vacío previene los fenómenos de conducción y convección, aumentando la eficiencia pero también el costo.

Existen también otros tipos de colectores que alcanzan mayores temperaturas:

- Concentradores parabólicos, consistentes en un arreglo de espejos en forma de cilindro parabólico que reflejan la energía solar hacia un solo conducto lineal por donde pasa una sustancia capaz de calentarse a temperaturas alrededor de los 300 °C.
- La variante llamada plato parabólico concentra la energía en un punto en lugar de una línea como en el caso del concentrador parabólico. Las temperaturas alcanzables con este colector pueden superar los 650 °C.

### **➤ Contenedor o depósito**

Es el recipiente de almacenamiento del fluido, que está conectado con la entrada y la salida del colector. Durante el día, el agua se recircula una y otra vez entre el colector y el contenedor. Después de un tiempo y dependiendo de las dimensiones de los componentes, el agua se calentará para su uso posterior. La energía capturada en el colector se guarda en el tanque en forma de agua caliente en la parte superior del tanque, misma que se reemplaza hacia los colectores del mismo tanque, el agua fría de la parte inferior del tanque de almacenamiento. En el momento de requerir agua caliente se extrae del tanque de la parte superior que se rellena con agua fría de la de la fuente. Si hay un exceso de agua caliente en tanque de almacenamiento se dispone de un sistema de desfogue para evitar ruptura en el sistema. El tanque está aislado térmicamente para evitar pérdidas y mantener caliente el agua por más tiempo. En un sistema doméstico, el contenedor suele incorporar un calentador eléctrico de apoyo, que se activará en caso de no alcanzar la temperatura deseada.

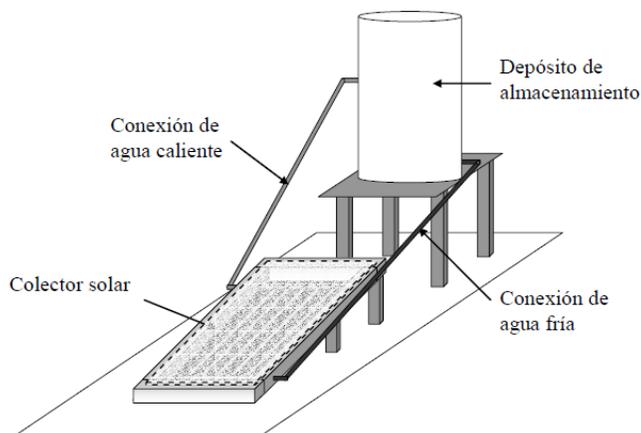
En los calentadores solares de albercas o piscinas, el contenedor suele ser la alberca misma, y la caja aislante del colector puede no ser necesaria debido a la escasa diferencia entre la temperatura de trabajo (temperatura del agua) y la temperatura ambiente.

➤ **Sistema**

El sistema son todas las tuberías, bombas, sistemas de control, llaves de paso, y accesorios con las que cuenta el calentador solar. Conecta por medio de tuberías el colector con el contenedor, así como también el calentador con las tuberías de una casa.

➤ **Substancia de trabajo**

Si la circulación es directa, se emplea agua potable; la misma que se utilizará en regaderas, lavabos, lavadoras, albercas, etc. En este caso, el agua se hace pasar por el colector para ser guardada en el contenedor. Si se utiliza circulación indirecta existen dos circuitos: uno con agua potable para el consumo, y otro con un fluido portador de energía calorífica, que usualmente es agua o una mezcla de agua y glicol. Los dos circuitos se ceden energía mediante un intercambiador de calor. En este sistema, el agua potable no pasa por el colector, sino únicamente por el contenedor, que aloja un intercambiador de calor donde se transfiere la energía captada por el fluido caloportador. Este sistema es más conveniente si el calentador se encuentra en una localidad de clima frío, ya que el fluido portador de calor que circula por el colector tiene propiedades anticongelantes, previniendo la ruptura de las tuberías por congelamiento.



**Figura 4.10.** Partes de un calentador solar.

Fuente: Guevara, 2003.

Un aspecto importante a tener en cuenta en el diseño de calentadores solares es el régimen de uso del agua caliente, ya que éste puede variar debido a diversos factores. Por ejemplo, si una familia en la cual todos sus integrantes trabajan, el uso del agua caliente se inicia al empezar el día o al terminar el mismo; sin embargo, en un baño comunitario, el uso del agua caliente se realiza durante todo el día, es decir conforme se produce el agua caliente, ésta se consume. Estas dos formas de uso del agua caliente se denominan sistema puntual y sistema continuo respectivamente. El sistema continuo es más eficiente y menos costoso que el sistema puntual; esto se debe, básicamente, a dos condiciones: en el sistema continuo se utiliza un depósito de almacenamiento de menor capacidad, y la temperatura del agua almacenada es menor, por lo que las pérdidas de calor se reducen notablemente.

En el éxito de los sistemas de calentamiento solar de agua influyen dos factores. El primer factor es el nivel de radiación solar en el lugar de instalación del calentador de agua y el segundo factor es el diseño del colector solar. La combinación de ambos factores determina el costo del sistema. Estos costos se reducen notablemente en zonas de alta incidencia solar.

### **4.3. Energía eólica**

Debido a la acción de las diferencias de presión atmosférica, continuamente variables, que existen sobre nuestro planeta, el aire no puede estar nunca en reposo y se desplaza prácticamente sin cesar. La corriente correspondiente constituye el viento.

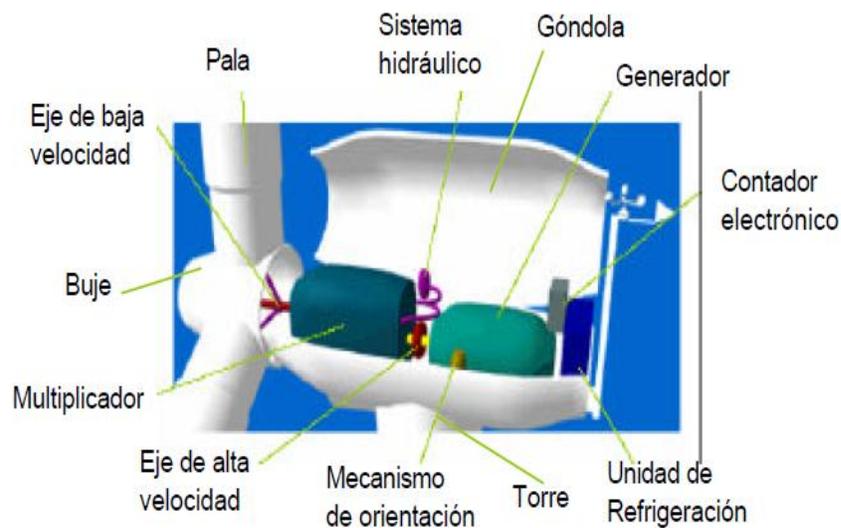
La energía eólica es la que aprovecha la energía del viento para producir energía eléctrica o energía mecánica. La utilización de esta energía es una de las más antiguas, se ha usado para navegar, moler trigo y bombear agua.

El elemento que se ocupa de la transformación energética es el aerogenerador o molino de viento: se habla de aerogeneradores cuando se requiere producir energía eléctrica, y de molinos de viento cuando se produce energía mecánica.

Los aerogeneradores pueden tener infinitas aplicaciones, siempre que se instalen en zonas ventosas y a alturas relativamente altas (no menos de 10 m sobre el nivel del suelo). Uno de estos puede proporcionar mucha más energía que la mayoría de células fotovoltaicas, sin embargo, el viento es un fenómeno aún más irregular que la radiación solar, y por lo tanto existen más dificultades en el tratamiento de la energía generada (Mera, 2006).

#### **4.3.1. Componentes principales de un aerogenerador**

Técnicamente las turbinas de bajo potencial eólico tienen una estructura similar a las grandes, solo que su diseño es más simple. Para el caso de estudio se utilizó una de eje horizontal, a continuación se hace una descripción de los componentes principales que constituyen ese tipo de aerogenerador (Figura 4.11).



**Figura 4.11.** Componentes de un aerogenerador de eje horizontal.

Fuente: Cuesta, 2008.

### **Rotor**

La función del rotor es transformar la energía cinética del viento en energía mecánica. Cuanto mayor sea el área barrida por el rotor mayor será la producción de energía. Por ejemplo un aerogenerador de 10 kW de potencia tiene un diámetro, aproximadamente, de siete metros, mientras que una turbina eólica de 750 kW posee un diámetro de 24 metros.

### **Góndola**

La góndola es el compartimiento en cuyo interior se encuentra el generador eléctrico, la caja multiplicadora y los sistemas de control, regulación, orientación y frenado. Generalmente está formado por una estructura metálica, construida con placa y perfiles de acero, que se sitúa en el extremo superior de la torre.

### **Generador**

La función del generador es transformar la energía mecánica procedente del rotor en energía eléctrica.

Existen diferentes tipos de generadores:

- a) Generador de Corriente Continua (Dínamos)

## b) Generador de Corriente Alterna

- Síncronos o Alternadores
  - De polos formados por electroimanes alimentados por corriente continua
  - De polos formados por imanes fijos o permanentes
- Asíncronos o de Inducción
  - De jaula de ardilla
  - De rotor devanado

El generador más utilizado en las pequeñas turbinas eólicas es el alternador de imanes permanentes que parece ser el modelo ideal para las micro y miniturbinas eólicas. En los aerogeneradores de tamaño doméstico hay más diversidad. Por ejemplo, la Bergey Windpower se decidió por los alternadores de imanes permanentes, pero la Wind Turbine Industries usa un alternador convencional de arrollamientos, mientras que la Vergnet emplea un generador de inducción, comercial.

### **Multiplicador**

El acoplamiento entre el rotor eólico y el generador, en la mayoría de los casos, se realiza a través de una caja multiplicadora y su función es multiplicar la velocidad de giro que llega del rotor para adaptarla a las necesidades del generador. Su empleo es necesario a medida que crece el diámetro del rotor, pues se deben limitar las revoluciones por minuto (rpm) del rotor para evitar que las puntas de las palas trabajen a velocidades que comprometen la resistencia de los materiales empleados o induzcan vibraciones perjudiciales. Pero en el caso de las turbinas con una potencia inferior a 10 kW, generalmente, no se usa el multiplicador ya que el rotor está conectado directamente al generador.

### **Sistema de control**

Toda turbina eólica necesita un sistema de control que permita por un lado detener la máquina y limitar su velocidad por razones de seguridad y por el otro optimizar el funcionamiento. Además, en el caso de generación eléctrica a frecuencia constante es necesario mantener la

velocidad de giro del rotor dentro de ciertos límites para obtener un alto rendimiento. El sistema de control es diferente en función del tamaño del aerogenerador.

**a)** Sistemas con ángulo de paso fijo y variación del área de captación “Furling”. Su principio fundamental es reducir el área de captación o área del rotor en posición perpendicular a la corriente de aire incidente cuando la velocidad de éste supera cierto valor crítico. El sistema de detección de la energía en exceso y el de actuación lo forman el mismo rotor y su vinculación a la torre a través de la góndola. El rotor oscila lateralmente fuera del viento (alrededor de un eje vertical) para disminuir la potencia. En la práctica, esta técnica sólo se usa en aerogeneradores muy pequeños ( $< 5$  kW), pues somete al rotor a fuerzas que varían cíclicamente y que a la larga pueden dañar toda la estructura, y en lugares que se encuentren alejados de la población debido a la gran emisión de ruido acústico que producen.

**b)** Sistema de ángulo de paso fijo por pérdida aerodinámica “stall regulation”. Este es un sistema de control pasivo que reacciona con la velocidad del viento. En este tipo de sistema de control, las palas están unidas al buje en un ángulo fijo. El perfil de la pala ha sido aerodinámicamente diseñado para asegurar que a medida que aumente la velocidad real del viento en la zona, el ángulo de ataque de la pala del rotor también aumente hasta llegar al punto donde empieza a perder sustentación. La pala está ligeramente torsionada a lo largo de su eje longitudinal. Esto es así en parte para asegurar que la pala pierde la sustentación de forma gradual, en lugar de hacerlo bruscamente, cuando la velocidad del viento alcanza su valor crítico. La principal ventaja de este sistema es que se evitan las partes móviles del rotor y un complejo sistema de control. Sin embargo, la regulación por pérdida aerodinámica representa un problema de diseño muy complejo y comporta retos en el diseño de la dinámica estructural de toda la turbina, para evitar las vibraciones provocadas por la pérdida de sustentación. Alrededor de las dos terceras partes de los aerogeneradores que actualmente se están instalando en todo el mundo son máquinas de regulación por pérdida aerodinámica.

c) Sistema con ángulo de paso variable o “pitch regulation”. Este método de control consiste en que las palas varían su ángulo de incidencia con respecto al viento. En este tipo de sistema, un ordenador comprueba varias veces por segundo la potencia generada. Cuando ésta alcanza un valor demasiado alto, el controlador envía una orden al mecanismo de cambio del ángulo de paso, que inmediatamente hace girar las palas del rotor ligeramente fuera del viento. Y a la inversa, las palas son vueltas hacia el viento cuando éste disminuye de nuevo. El diseño de aerogeneradores controlados por este tipo de sistema requiere una ingeniería muy desarrollada, para asegurar que las palas giren exactamente el ángulo deseado. En este tipo de aerogeneradores, el ordenador generalmente girará las palas unos pocos grados cada vez que el viento cambie, para mantener un ángulo óptimo que proporcione el máximo rendimiento a todas las velocidades de viento. El mecanismo de cambio del ángulo de paso suele funcionar de forma hidráulica. Este tipo de sistema es más frecuente en eólicas de gran potencia, con diámetros superiores a 20 m, así como en aerogeneradores que trabajan en paralelo con grupos electrógenos (sistemas mixtos eólico-diesel).

En estos sistemas activos de paso variable, se encuentran a su vez dos posibles configuraciones:

- Sistemas en los que gira toda la pala alrededor de su eje longitudinal, cambiando el ángulo de paso de la misma para situarse siempre en condiciones de máximo rendimiento o para sacar a la pala de la acción del viento y parar el rotor.
- Sistemas en los que el giro se realiza sólo en el tramo final de la pala correspondiente al extremo o punta de la misma, de forma similar al funcionamiento del alerón en un avión.

**d)** Sistema de regulación activa por pérdida aerodinámica. Un número creciente de grandes aerogeneradores (a partir de 1 MW) están siendo desarrollados con un mecanismo de regulación activa por pérdida aerodinámica. Técnicamente, las

máquinas de regulación activa por pérdida aerodinámica se parecen a las de regulación por cambio del ángulo de paso, en el sentido de que ambos tienen palas que pueden girar. Para tener un momento de torsión (fuerza de giro) razonablemente alto a bajas velocidades del viento, este tipo de máquinas serán normalmente programadas para girar sus palas como las de regulación por cambio del ángulo de paso a bajas velocidades del viento (a menudo sólo utilizan unos pocos pasos fijos, dependiendo de la velocidad del viento). Sin embargo, cuando la máquina alcanza su potencia nominal, este tipo de máquinas presentan una gran diferencia respecto a las máquinas reguladas por cambio del ángulo de paso: si el generador va a sobrecargarse, la máquina girará las palas en la dirección contraria a la que lo haría una máquina de regulación por cambio del ángulo de paso. En otras palabras, aumentará el ángulo de paso de las palas para llevarlas hasta una posición de mayor pérdida de sustentación, y poder así consumir el exceso de energía del viento.

Una de las ventajas de la regulación activa por pérdida aerodinámica es que la producción de potencia puede ser controlada de forma más exacta que con la regulación pasiva, con el fin de evitar que al principio de una ráfaga de viento la potencia nominal sea sobrepasada. Otra de las ventajas es que la máquina puede funcionar casi exactamente a la potencia nominal a todas las velocidades de viento. Un aerogenerador normal de regulación pasiva por pérdida aerodinámica tendrá generalmente una caída en la producción de potencia eléctrica a altas velocidades de viento, dado que las palas alcanzan una mayor pérdida de sustentación. El mecanismo de cambio del ángulo de paso suele operarse mediante sistemas hidráulicos o motores eléctricos paso a paso.

### **Sistema de orientación**

A fin de optimizar el aprovechamiento energético del viento, el plano de rotación del rotor debe mantenerse perpendicular a la dirección del viento. En el caso de que el rotor esté situado a sotavento, como ya se comentó anteriormente, no es necesario un sistema de orientación ya que mediante una conicidad adecuada de las palas el sistema es auto-orientable. En cambio en

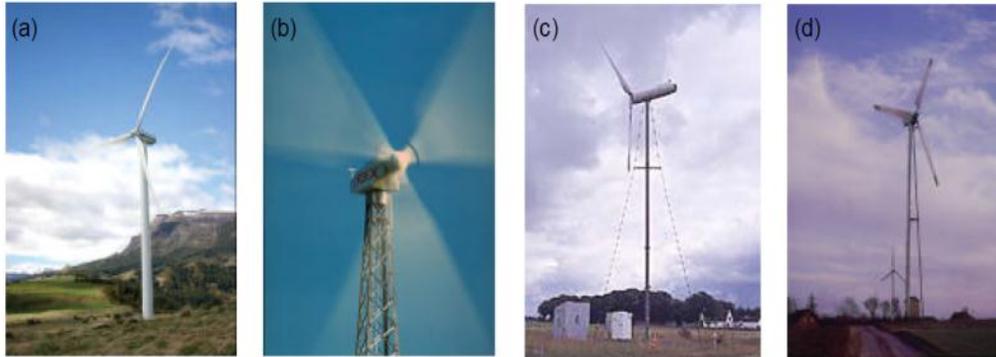
los rotores situados a barlovento, delante de la torre, si se debe incorporar algún sistema de orientación. Entre estos sistemas cabe distinguir los siguientes:

- a) Eólicas auxiliares: en particular molinos de cola, usados sólo en algunas eólicas pequeñas. Es un sistema poco fiable.
- b) Veletas de cola: se usan en pequeñas turbinas, formando parte del conjunto timón-veleta. La orientación del rotor se realiza de forma mecánica, al incidir el viento sobre el timón-veleta y ejerciendo sobre éste un par de fuerzas que hace que el rotor se coloque perpendicularmente a la dirección del viento.
- c) Rotor a barlovento con orientación asistida: es el sistema más utilizado en grandes aerogeneradores. Este sistema incorpora un sensor con un ordenador y, en función de la dirección y la velocidad del viento, envía las correspondientes órdenes de control a un servomotor para la orientación del plano de giro del rotor. El servomotor (eléctrico o hidráulico, acciona, a través de un sistema de piñones, una corona dentada que a su vez hace girar el plano del rotor para colocarlo perpendicularmente a la dirección del viento.

Debido a sus dimensiones, las pequeñas turbinas eólicas no pueden acomodar los mecanismos de transmisión y los motores de orientación que se emplean en las turbinas más grandes. Casi todas las pequeñas turbinas utilizan veletas de cola, aunque una de las pocas excepciones es la turbina de espalda al viento de la Proven Engineering.

## **Torre**

Las máquinas eólicas deben estar situadas sobre una estructura de soporte capaz de aguantar el empuje del viento. Existen varios tipos de torres como los que se describen a continuación (Figura 4.12 a, b, c y d).



**Figura 4.12.** Tipos de torre: (a) tubular, (b) celosía, (c) tensada y (d) híbrida

Fuente: Cuesta, 2008.

**a)** Torres tubulares de acero. En el caso de los grandes aerogeneradores generalmente se utilizan torres tubulares de acero (Figura 4.12a), fabricadas en secciones de 20-30 metros con bridas en cada uno de los extremos, y son unidas con pernos "in situ". Las torres son tronco-cónicas, es decir con un diámetro creciente hacia la base, con el fin de aumentar su resistencia y al mismo tiempo ahorrar material.

**b)** Torres de celosía. Son fabricadas utilizando perfiles de acero soldados (Figura 4.12b). La ventaja básica de las torres de celosía es su costo, puesto que para su fabricación se requiere sólo la mitad de material que en una torre tubular. La principal desventaja de este tipo de torres es su apariencia visual. En cualquier caso, por razones estéticas, las torres de celosía han desaparecido prácticamente en los grandes aerogeneradores modernos. Son muy comunes en la India, aunque se encuentran en otros países como Alemania y EE.UU.

**c)** Torres de mástil tensado. Muchos de los aerogeneradores pequeños están contruidos con delgadas torres de mástil sostenidas por cables tensores (Figura 4.12c). La ventaja es el ahorro de peso y, por lo tanto, de costo. Las desventajas son el difícil acceso a las zonas alrededor de la torre, lo que las hace menos apropiadas para zonas agrícolas. Las torres tubulares son las que ofrecen una vista más agradable, pero son las más costosas y, a menos que estén articuladas para arriarlas,

son también las que ofrecen más dificultades a la hora de efectuar el mantenimiento de la turbina. Las torres con tensores son las menos costosas.

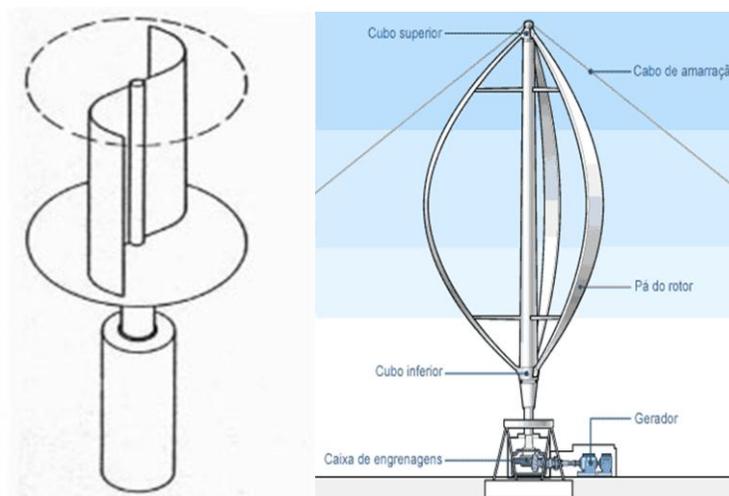
**d)** Torres híbridas. Algunas torres están hechas con diferentes combinaciones de las ya mencionadas. Un ejemplo es la torre de tres patas Bonus 95 kW, de la que podría decirse que es un híbrido entre una torre de celosía y una torre tensada con vientos (Figura 4.12d).

### 4.3.2. Clasificación de los aerogeneradores

Escudero, 2004, menciona que los aerogeneradores se pueden clasificar en 5 grupos de acuerdo a los siguientes criterios:

1) Según el eje de trabajo:

Estas a su vez se clasifican en eje vertical y eje horizontal. En las primeras, las hélices de las maquinas giran alrededor de un eje vertical. Son muy poco usadas para la generación de electricidad debido a que su diseño no les permite girar a altas velocidades; su rendimiento es muy bajo. Los más extendidos son: el aerogenerador Savonius y el Darrieus.



**Figura 4.13.** Aerogenerador Savonius (izquierda) y aerogenerador Darrieus (derecha).

Fuente: Escudero, 2004.

2) Según el número de palas:

Un aerogenerador no por tener más palas o aspas dará más potencia. Las turbinas eólicas pueden ser:

a) Máquinas rápidas: las principales son de 1, 2 y 3 aspas.

En un rotor bipala las fuerzas que experimentan las aspas no están compensadas en todo su radio de giro (Figura 4.14a). Cuando las palas están en posición vertical, la inferior surge un menor empuje debido a las turbulencias provocadas por la misma torre. Para compensar esta diferencia de fuerzas en grandes aerogeneradores es necesaria la instalación de un complicado buje oscilante. Su régimen de giro es superior y el ruido producido también. Su par de arranque es menor. Cuando el conjunto rota sobre sí mismo para orientarse al viento, lo hace de manera inestable, ya que su inercia es mayor cuando las palas están en horizontal. Todos estos problemas se pueden evitar añadiendo una tercera pala (Figura 4.14b). Las fuerzas experimentales se distribuyen y se compensan mejor entre ellas; son más silenciosas, con mayor par de arranque y más estable en la rotación para su orientación. Los rotores de una sola pala presentan los problemas incrementados del bipala, con el añadido de necesitar un contrapeso.

b) Máquinas multipala

Ganaron su fama por su utilización para la extracción de agua. Se les conoce como aerobombas o aeromotores. Arranca con velocidades bajas de viento con un alto par de arranque (Figura 4.14c).



**Figura 4.14.** Aerogenerador a) bipala, b) tripala y c) multipala.

Fuente: Salinas, 2011.

3) Según la posición del rotor en la máquina:

Los aerogeneradores se clasifican en máquinas de barlovento o sotavento dependiendo en la incidencia del viento sobre el rotor. Esta posición influye en el sistema de orientación, control de frenado, y diseño general de la máquina. La mayoría de los fabricantes opta por los aerogeneradores de barlovento, en los que el viento llega al rotor por su parte anterior.

4) Según el anclaje de las hélices al buje:

Los aerogeneradores cuyas hélices o palas pueden rotar sobre su eje longitudinal se denominan de paso variable. Esta opción facilita regular la velocidad de rotación en caso de fuertes vientos. Sus resultados son excelentes, pero complicados. Si las hélices son fijas y carecen de rotación, entonces se denominan de paso fijo. Los pequeños aerogeneradores no son de paso variable debido al encarecimiento del producto y a su exigente mantenimiento.

5) Según el tamaño y potencia:

En la energía eólica, el tamaño del aerogenerador y en especial del diámetro del rotor se ha convertido en un factor clasificatorio. Existen aerogeneradores desde 0.5 metros de diámetro hasta más de 90 m. aunque el principio de funcionamiento y diseño es similar, su construcción, concepción y aplicaciones son totalmente distintos.

Aerogeneradores de pequeño (20 kW a 100 kW), medio (100 kW a 500 kW) y gran tamaño (>500 kW).

#### **4.3.3. Aplicaciones de los aerogeneradores de baja potencia**

Existen dos aplicaciones generales de utilizar la energía eléctrica generada a partir de los aerogeneradores de baja potencia: instalaciones aisladas e instalaciones conectadas a la red eléctrica.

##### **Instalaciones aisladas a la red eléctrica**

Las pequeñas turbinas eólicas pueden ser fuente económica de electricidad para sitios aislados. La aplicación más común de sistemas aislados es la electrificación de viviendas rurales, para la cual existen diferentes configuraciones.

- a) **Sistemas individuales:** Generalmente, cuentan con un pequeño aerogenerador, una o más baterías para almacenar la energía generada y un regulador que controla la carga y descarga de las baterías.

Dependiendo de la aplicación, pueden incluir un inversor para transformar la electricidad de corriente continua en alterna como es este caso de estudio. Los aerogeneradores de baja potencia se pueden utilizar sin conectar a la red eléctrica en diferentes aplicaciones. Generalmente se utilizan para cargar baterías, suministrando tanto corriente alterna como continua, con los modernos sistemas de control electrónicos, pueden ser usados para mover bombas eléctricas directamente, sin emplear baterías.

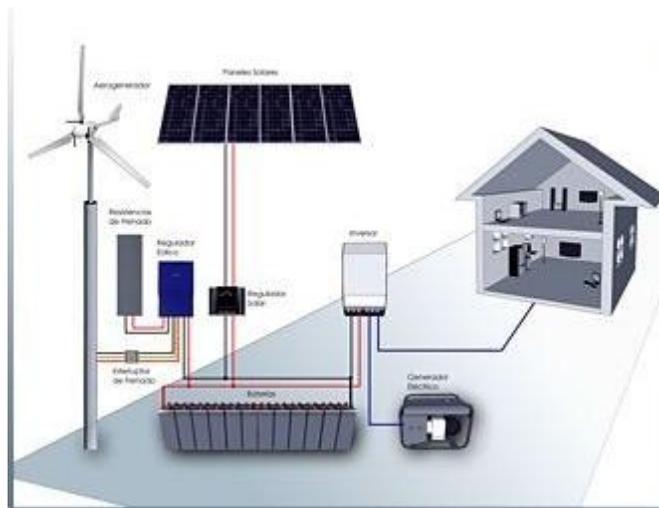
Los pequeños aerogeneradores también se pueden emplear para la calefacción de viviendas, etc. Por ejemplo, la Universidad de Massachussttes propuso un calentador eólico a mediados de los años setenta, y varias compañías trataron de sacar este proyecto al mercado. El concepto nunca tuvo acogida en Norteamérica porque no daba beneficios económicos, pero si lo tuvo en Dinamarca, donde los precios de la calefacción eran considerablemente altos. El Folkecenter for Renewable Energy de Dinamarca demostró que una turbina eólica que cubre las demandas de la calefacción en el invierno puede fácilmente cubrir las necesidades de agua caliente en verano (Cuesta, 2008).

**b) Sistemas centralizados:** Si las viviendas a electrificar se encuentran relativamente próximas entre sí, la opción más apropiada puede ser un sistema eólico centralizado debido a la concentración de equipos y energía, lo cual ofrece ventajas desde los puntos de vista técnico y económico.

Un sistema eólico centralizado satisface la demanda energética de una comunidad con electricidad producida, almacenada y transformada en un “sistema eólico central” y luego se distribuye, a través de líneas eléctricas, hasta cada una de las viviendas y otros sitios. Generalmente, este tipo de sistemas cuenta con más de una fuente de generación, para lograr mayor confiabilidad del sistema.

**c) Sistemas híbridos:** Las pequeñas turbinas eólicas, como se comentó anteriormente, brindan una solución muy atractiva para la electrificación rural en muchos lugares, pero muchas veces la fluctuación del viento hace que no se pueda obtener una producción de electricidad de manera constante. Por esta razón, frecuentemente, se usa una turbina eólica en combinación con otra fuente de generación: por ejemplo, paneles fotovoltaicos o un generador eléctrico a base de diesel. Este tipo de sistemas se denominan “sistemas híbridos”, y una de las mayores ventajas que presentan, con respecto a un sistema individual, es que dan una mayor seguridad para la generación de energía eléctrica.

- Instalaciones híbridas eólico-fotovoltaicas: La energía eólica y la fotovoltaica son complementarias. Juntas, no sólo mejoran la fiabilidad de los sistemas aislados sino que también los hacen más rentables que cuando operan separadamente. Como se puede ver en la Figura 4.15, estas instalaciones suelen estar constituidas por un aerogenerador de pequeñas dimensiones que, a través de un rectificador/regulador de carga, suministra la energía producida a las baterías. En paralelo se encuentra un sistema de paneles fotovoltaicos, uno o varios, que mediante su regulador de carga se conectan también a la batería. Las dimensiones de cada uno de los equipos (aerogenerador y paneles) dependerán de las características climatológicas así como de las características de la carga.



**Figura 4.15.** Configuración de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico.

Fuente: <http://soltec-energia.blogspot.mx/>

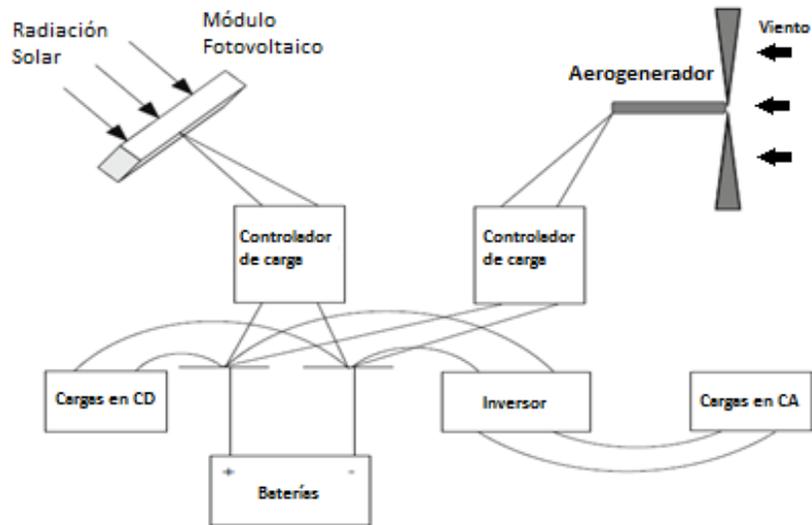
- Sistema eólico-diesel: En este tipo de instalación, el grupo diesel, interconectado a través de su sistema de control, permite una gran flexibilidad en su régimen de funcionamiento. El grupo diesel trabaja a plena carga cuando el viento está en calma o en régimen variable apoyando la producción del aerogenerador por existir variación de la velocidad del viento. Cuando el viento mantiene un régimen de velocidad suficientemente alto, el grupo diesel está parado y la producción eléctrica es suministrada solamente por el aerogenerador o mantiene su funcionamiento en condiciones de regulación mientras dura el viento fuerte.

### **Instalaciones conectadas a la red eléctrica**

Gracias a la Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE) publicada en 2008 y la reforma de Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica (LSPEE, 1992), el Marco Legal en México ofrece una gran variedad de posibilidades para el uso sustentable de fuentes renovables de energía en el sector privado para la generación de energía eléctrica y suministro de ésta hacia la red nacional. Esto es aplicable en los casos que exista una red en las proximidades del centro de consumo. En este caso, la energía requerida por el usuario sería suministrada por el sistema eólico o fotovoltaico y por la red eléctrica. Si el sistema generador produce energía en exceso, se entrega el excedente a la red eléctrica y, si se produce menos energía de la requerida, se toma de la red. El almacenamiento de la electricidad en baterías es opcional, pero su inclusión exige dispositivos rectificadores de corriente alterna para la carga de las baterías e inversores de corriente continua. De acuerdo con la LAERFTE si el sistema generador produce menos energía que la que consume la diferencia la tomará de la red y la CFE solo cobrará por dicha diferencia, pero si el usuario produce más energía que la que consume se sube a la red nacional, pero la CFE no pagará en efectivo por dicha energía suministrada sino que ésta será almacenada en un banco de energía y se puede entregar en otro momento al usuario. El período de almacenamiento de la energía se puede extender hasta por un año.

Dentro de los sistemas conectados a red empiezan a tener importancia los sistemas híbridos. Por ejemplo en España, la Agencia Energía de Barcelona (AEB) y la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC), Regesa y Fecsa Endesa firmaron, en Noviembre de 2007, un convenio de colaboración para la construcción de una instalación mixta eólica-fotovoltaica de conexión a la red en un edificio de 175 viviendas. Éste es un proyecto pionero en el uso de energías renovables que se realiza como sustitución de una instalación solar térmica para la producción de agua caliente sanitaria. El proyecto piloto consiste en una instalación de al menos 3 aerogeneradores verticales de 2.5 kW de potencia cada uno y un sistema de energía fotovoltaica de conexión a la red de 34.3 kW. Se estima que la central eólica-fotovoltaica producirá anualmente unos 52,200 kWh, es decir, el equivalente al consumo energético total,

no sólo para calentar agua, de unas 24 viviendas de 80 m<sup>2</sup>, y permitirá un ahorro de 5.5 toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera cada año (Cuesta, 2008).



**Figura 4.16.** Diagrama General de un sistema híbrido Eólico-Fotovoltaico.

Fuente: Hocaoglu, 2009

#### **4.4. Requerimiento energético para una vivienda rural**

El presente estudio está orientado hacia las viviendas rurales que no cuentan con suministro de energía eléctrica de la red, teniendo como ayuda solo los recursos renovables disponibles: energía del sol y del viento. Las viviendas rurales por lo regular se encuentran ocupadas todo el año por lo que el sistema de generación debe suministrar energía eléctrica para las necesidades diarias de las personas que viven en ella. El dimensionado de un sistema fotovoltaico, eólico o híbrido, conlleva a realizar una estimación del requerimiento energético para una vivienda rural tomando en cuenta lo que una familia ocupa para iluminación y suministro de agua que son los requerimientos más importantes a suplir en zonas de escasos recursos. Por lo regular las personas que viven en estas áreas no tienen grandes consumos de energía ya que están acostumbradas a no utilizar aparatos de alta demanda energética como lo son los aires acondicionados, micro ondas, calentadores eléctricos, tostadoras entre otros.

**Cuadro 4.1.** Estimación de la carga energética para una vivienda rural.

Estimación de la Carga											
Dispositivo	Watts		Cant.	Volts		Amps		Utilización		Consumo (Wh/Día)	
	Consumo	Surge <sup>13</sup>		CA	CD	CA	CD	Hr/Día	Días/Sem.	CA	CD
Foco ahorrador 25W	25	55.0	3	120		1.25		4.0	7	300.0	
Bomba de agua 1/2 hp	373	820.6	1	120		3.11		0.5	7	186.5	
								<b>kWh/día</b>		<b>0.49</b>	

Carga Total de CA (Watts): 448      Mayor carga de arranque CA (Watts): 821      kWh/día      0.49  
 Carga Total de CD (Watts): 0      Máxima potencia pico en CA (Watts): 448      Total kWh/día      0.49

Fuente: Elaboración propia.

Del cuadro anterior se puede ver que la fuente que requiere mayor cantidad de energía es la bomba de agua (186.5 Wh/día), que si bien es de primera necesidad y siempre existirá dentro de una vivienda. La iluminación es la que requiere una cantidad menor de energía debido a que se trata de 3 luminarias de bajo consumo. Ésta es una recomendación que se hace en nuestros días y en cualquier instalación fotovoltaica: instalar luminarias de bajo consumo energético para maximizar el ahorro ya que, en lo que respecta a esta carga, es de las que más energía demandan por la cantidad de horas de uso.

<sup>13</sup> Potencia máxima requerida al momento del arranque.

## 5. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1. Descripción del equipo y materiales utilizados

Los materiales que se utilizaron para la evaluación del sistema de producción de energías alternas son los siguientes, con una descripción de los mismos.

#### Sistema fotovoltaico

- Un sistema generador fotovoltaico SAECSA de 560 W formado por 4 módulos solares de silicio policristalino de 140 W de potencia pico con dimensiones de 1,480 mm x 670 mm x 50 mm. El área de captación de un módulo es igual a 0.99 m<sup>2</sup>. Área total de captación del sistema fotovoltaico igual 3.97 m<sup>2</sup>. Este sistema fue suministrado por la casa de venta SAECSA (Energía Solar Estratégica S.A. de C.V.)



**Figura 5.1.** Sistema fotovoltaico instalado en el Campus Montecillo.

#### Sistema eólico

- Un aerogenerador AIR BREEZE Land 12 Volts y 300 W de potencia, con un diámetro del rotor 1.2 m y área de barrido de 1.07 m<sup>2</sup>, con una velocidad de arranque (inicio de producción de energía) 2.2 m/s. Equipo suministrado por la casa de venta SAECSA (Energía Solar Estratégica S.A. de C.V.)



**Figura 5.2.** Aerogenerador Air Breeze instalado en el Campus Montecillo.

### **Calentador solar de agua**

- Calentador solar de tubos al vacío Sunnergy<sup>14</sup> modelo SEI-30-2000/58, con capacidad total de 381 litros.

Funciona por medio de tubos colectores de cristal de borosilicato al alto vacío. Cada colector de cristal tiene un tubo de doble capa, con un vacío en la capa (que aparenta ser dos tubos) los cuales forman el vacío entre ellos. El en la capa interior del tubo tiene un recubrimiento de nitrato de aluminio (de color oscuro), el cual absorbe la radiación solar (incluyendo los rayos infrarrojos) y dicha energía queda atrapada entre las capas (efecto de invernadero) y así se incrementa el calor, que por conducción calienta el agua que está en el interior del tubo. Dicha agua caliente se desplaza por su propia densidad (convección) al tanque de almacenamiento (que es un termo) el cual está recubierto con poliuretano. El calentador solar suministrado por la casa de venta Sunnergy Energías Renovables.

---

<sup>14</sup> <http://www.sunnergy.com.mx>



**Figura 5.3.** Calentador solar instalado en el Campus Montecillo.

Sus características son las siguientes:

Frente: 2.52 m.

Costado: 2.20 m.

Altura 1.25 m.

Peso del equipo: Vacío 241 kg, en operación 622 kg.

Capacidad total: 381 lts.

Cantidad de tubos al vacío: 30

### **Instrumental meteorológico**

- Instrumental meteorológico de la estación agrometeorológica del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo como son: anemómetros colocados a 4 y 6 metros de altura, Piranómetro (para medición de radiación global), Pirheliómetro (para medición de radiación directa) y un higrómetro (para medición de humedad relativa).

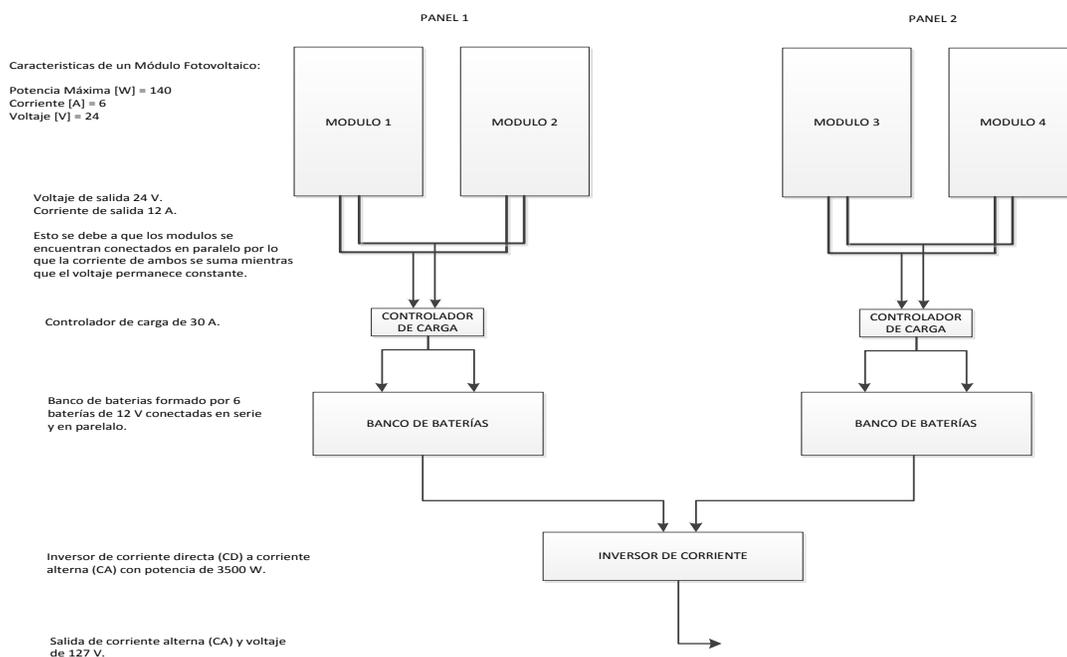
### **Normatividad**

La potencia pico de los módulos está determinado en Condiciones Estándar de Medida (en inglés STM-Standard Test Conditions) definidos por la Comisión Electrotécnica Internacional en su norma 60904-1 y recogidas en la Norma UNE-EN 61215 (Ángeles, 2009).

Estas condiciones son:

- Radiación solar igual  $1,000 \text{ W/m}^2$ .
- Temperatura de la célula de  $25^\circ\text{C}$ .
- Distribución espectral A.M. = 1.5.
- Irradiancia incidente perpendicular.

Este sistema híbrido (eólico-fotovoltaico) se encuentra instalado en la unidad de traspatios del Colpos (Figura 5.4) donde se entrega la energía generada para la iluminación del lugar.



**Figura 5.4.** Esquema de instalación del sistema fotovoltaico.

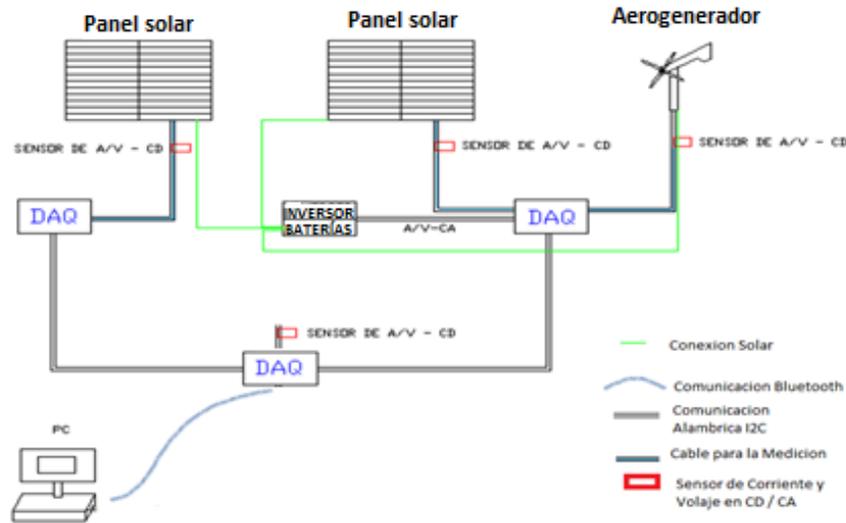
Fuente: Elaboración propia.

### Sistema para cuantificar energía producida y consumida

Sistema de adquisición y almacenamiento de datos (DAQ). Este cuenta con los siguientes elementos:

- Dos sensores de corriente para corriente directa (CD), dos sensores de corriente alterna (CA), dos sensores de voltaje, microcontroladores, resistencias, capacitores, transistores, cristales osciladores, bases de 40 pines para microcontroladores, leds,

cable de comunicación, cable de alimentación, fuente de alimentación de 5, 9 12, 12 y 24 volts de CD, placas fenólicas, soldadura 60% estaño y 20% plomo, removedor de soldadura, recipiente contenedor de los circuitos eléctricos, conectores estéreo, bornes, headers, adecuadores de señal, amplificadores de señal y computadora para descarga de datos.



**Figura 5.5.** Diagrama de instalación del sistema de adquisición de datos.

Fuente: Elaboración propia.

El sistema DAQ mide de forma periódica y en tiempo real el Voltaje y Corriente directa producido por los paneles solares, generador eólico y el inversor de acuerdo al Plan Solar de Castilla y León (EREN, 2004), (ver Figura 5.5).

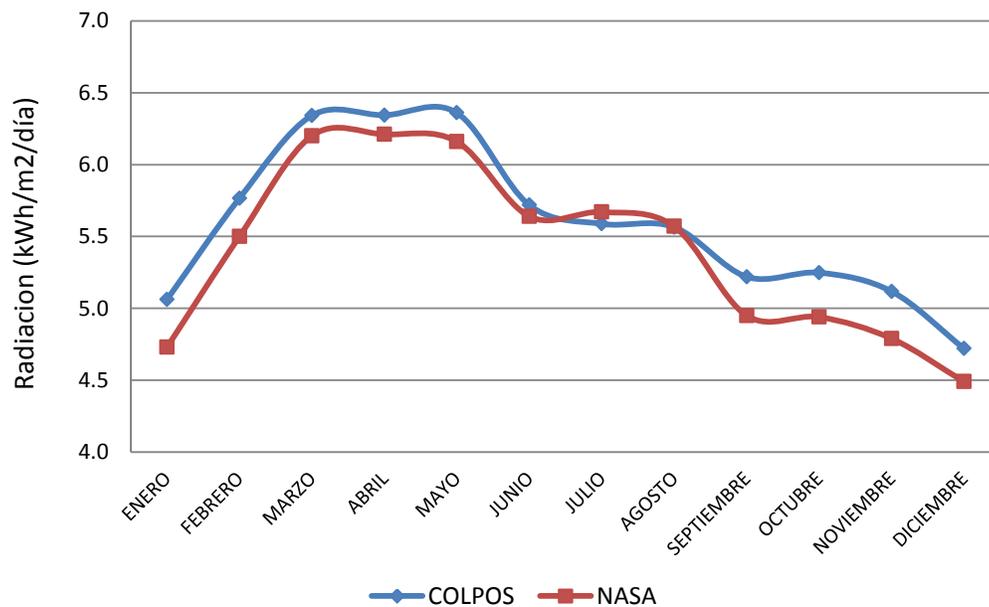
El sistema cuenta con 3 DAQ's para la adquisición de estas variables el cual se comunicara vía inalámbrica (Bluetooth) con una PC de escritorio que, mediante una base de datos (para almacenar la información) en MySQL y Excel (para exportar). Además cuenta con una interfaz de usuario visual que permite una mayor flexibilidad en el manejo de este sistema. Los datos medidos son sensados y almacenados cada 10 minutos, para su posterior análisis. Este sistema fue proporcionado e instalado por la empresa Actitud Sustentable<sup>15</sup> en el cual el responsable de la investigación participó en la configuración e instalación del sistema.

<sup>15</sup> <http://www.actitudsustentable.com/>

## 5.2. Características de los recursos energéticos disponibles

Se tomaron los datos meteorológicos para un año completo, de radiación solar, velocidad de viento (anemómetro) y temperatura ambiente (termómetro) de la zona de interés con los instrumentos de la estación meteorológica del Campus Montecillo.

Así mismo se realizó la consulta de datos de radiación solar y temperatura brindados por la NASA<sup>16</sup> con el motivo de realizar la comparación con los obtenidos de la estación meteorológica del Colpos. Esto se hizo debido a que en muchos lugares no se cuenta con estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio por lo que se corroboraron los datos obtenidos de la NASA y así comprobar la confiabilidad de los mismos para usos futuros en otros trabajos de investigación (Ver Anexo C).

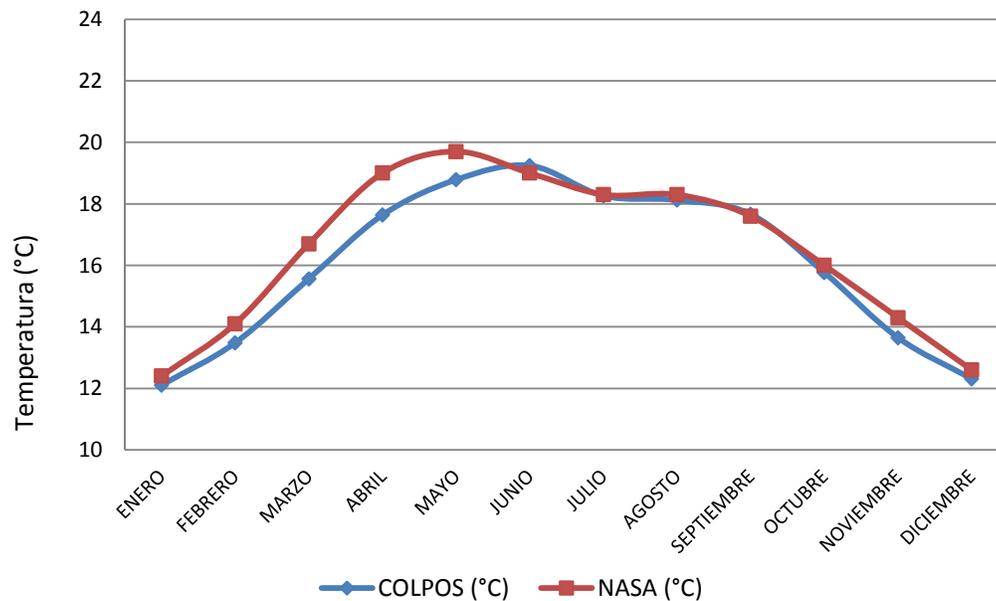


**Figura 5.6.** Comparación de la radiación promedio mensual entre dos fuentes de datos.

Fuente: Elaboración propia con datos históricos de la estación meteorológica del COLPOS y Surface meteorology and Solar Energy de la National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2011.

<sup>16</sup> Atmospheric Science Data Center <http://eosweb.larc.nasa.gov/> consultado el 17/Jul/2012.

En la radiación solar se presenta una diferencia promedio entre bases de datos de un 3.28%, por lo que se considera que los datos obtenidos de la pagina de la NASA son muy confiables para ser considerados en trabajos futuros donde no se tengan estaciones meteorológicas cercanas al área de interés.



**Figura 5.7.** Comparación de temperatura promedio mensual entre dos fuentes de datos.

Fuente: Elaboración propia con datos históricos de la estación meteorológica del COLPOS y Surface Meteorology and Solar Energy de la NASA, 2011.

Para el caso de la temperatura promedio mensual se presenta una diferencia promedio entre base de datos de 2.9% por lo que, al igual que la radiación solar, son de confianza para su utilización.

En este caso, la radiación expuesta es la que se presenta en un plano horizontal y paralelo a la superficie terrestre. Por cuestiones de cálculo se debe considerar la radiación que se obtiene en un plano orientado hacia el sur e inclinado a 19° que es la latitud del lugar.

A modo de resumen se presentan las siguientes ecuaciones propuestas por el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) de España que

pueden servir para realizar los cálculos de la radiación solar incidente a diferentes inclinaciones.

Primeramente se considera la fecha para la cual se desea realizar el cálculo de la radiación sobre un plano inclinado, por lo que se procede a definir la fecha en días julianos y el factor de corrección debido al día de interés.

**Factor de corrección de la excentricidad de la órbita de la Tierra:**

Relación entre la distancia del Sol a la Tierra de un día determinado ( $r$ ) y el valor medio de esta distancia a lo largo del año ( $r_0$ ):

$$E_0 = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi d_n}{365}\right) \quad (5.1)$$

Donde  $d_n$  = es el día juliano (1...365).

Se obtiene el ángulo diario y el de la declinación solar para la fecha de interés.

**Por lo que el ángulo diario (rad):**

$$\Gamma = 2\pi \frac{d_n - 1}{365} \quad (5.2)$$

**Declinación solar (rad):**

$$\delta = 0.006918 - 0.399912 \cos \Gamma + 0.070257 \sin \Gamma - 0.006758 \cos 2\Gamma + 0.000907 \sin 2\Gamma - 0.002697 \cos 3\Gamma + 0.00148 \sin 3\Gamma \quad (5.3)$$

Ahora se obtiene el ángulo de salida del sol para ese día y lugar en particular.

**Angulo de salida del Sol (rad):**

$$\omega_s = \arccos(-\tan \phi * \tan \delta) \quad (5.4)$$

Donde  $\phi$  = latitud del lugar.

Ahora se procede a calcular la radiación solar extraterrestre para un plano paralelo a la superficie terrestre de la latitud específica.

**Radiación solar extraterrestre sobre superficie horizontal (kWh/m<sup>2</sup>):**

$$G_{0d} = \frac{24}{\pi} I_{sc} E_0 (\omega_s \text{ Sen} \delta \text{ Sen} \phi + \text{Cos} \delta \text{ Cos} \phi \text{ Sen} \omega_s) \quad (5.5)$$

Donde  $I_{sc}$  = constante solar.

Se obtiene el dato de factor de transparencia atmosférica. Este dato va desde 0.3 para días nublados hasta 0.7 para días claros.

**Índice de transparencia atmosférica:**

$$K_d = \frac{G_d}{G_{0d}} \quad (5.6)$$

Ahora se obtiene la radiación solar difusa y directa para una superficie horizontal sobre la tierra considerando el índice de transparencia.

**Radiación difusa en superficie horizontal (kWh/m<sup>2</sup>):**

$$D_d = G_d (1.39 - 4.027K_d + 5.531K_d^2 - 3.108K_d^3) \quad (5.7)$$

**Radiación directa en superficie horizontal (kWh/m<sup>2</sup>):**

$$I_d = G_d - D_d \quad (5.8)$$

Una vez realizados los cálculos para los 12 meses del año se habrán obtenido las componentes de las radiaciones directas y difusas que al sumarse componen la radiación global recibida para superficies horizontales, se supone que la radiación reflejada es nula.

A continuación se deben aplicar las ecuaciones 9.9 a 9.12 para obtener las componentes directas y difusas de la radiación global sobre superficies inclinadas un cierto ángulo  $\beta$  que puede tomar cualquiera de los siguientes valores: 10°, 20°, 30°, 40°, 50° y 60°. Este ángulo es de la inclinación de la superficie de interés con respecto a la superficie del suelo y es diferente

al de la inclinación del lugar que ya fue considerado en la fórmula 9.4., por lo tanto se calcula el factor de conversión geométrico de acuerdo a los diferentes ángulos obtenidos.

**Factor de conversión geométrico:**

$$R_{b,\beta} = \frac{\omega_s \text{Sen}\delta \text{Sen}(\phi-\beta) + \text{Cos}\delta \text{Cos}(\phi-\beta)\text{Sen} \omega_s}{\omega_s \text{Sen}\delta \text{Sen}\phi + \text{Cos}\delta \text{Cos}\phi \text{Sen} \omega_s} \quad (5.9)$$

Hecho esto se procede a calcular la radiación directa y difusa recibida sobre una superficie inclinada.

**Radiación directa en superficie inclinada un ángulo  $\beta$  (kWh/m<sup>2</sup>):**

$$I_{d,\beta} = I_d R_b \quad (5.10)$$

**Radiación difusa en superficie inclinada un ángulo  $\beta$  (kWh/m<sup>2</sup>):**

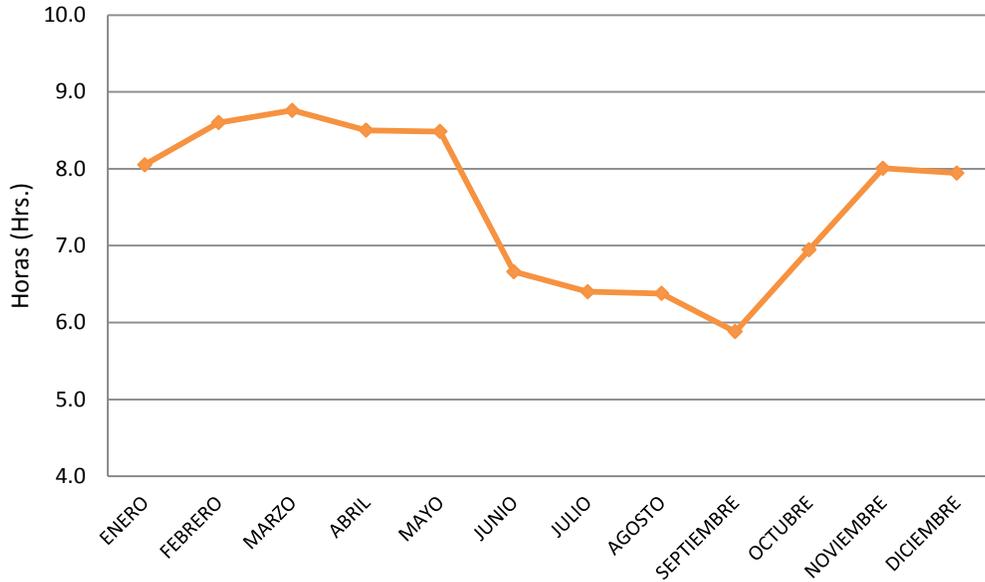
$$D_{d,\beta} = D_d \left[ (G_d - D_d) \frac{R_b}{G_{0d}} + \frac{1}{2} (1 + \text{Cos}\beta) \frac{(G_d - D_d)}{G_{0d}} \right] \quad (5.11)$$

Teniendo la radiación directa y difusa sobre un plano inclinado a cierto ángulo  $\beta$ , se obtiene finalmente la radiación global:

**Radiación global en superficie inclinada un ángulo  $\beta$  (KWh/m<sup>2</sup>):**

$$G_{d,\beta} = I_{d,\beta} + D_{d,\beta} \quad (5.12)$$

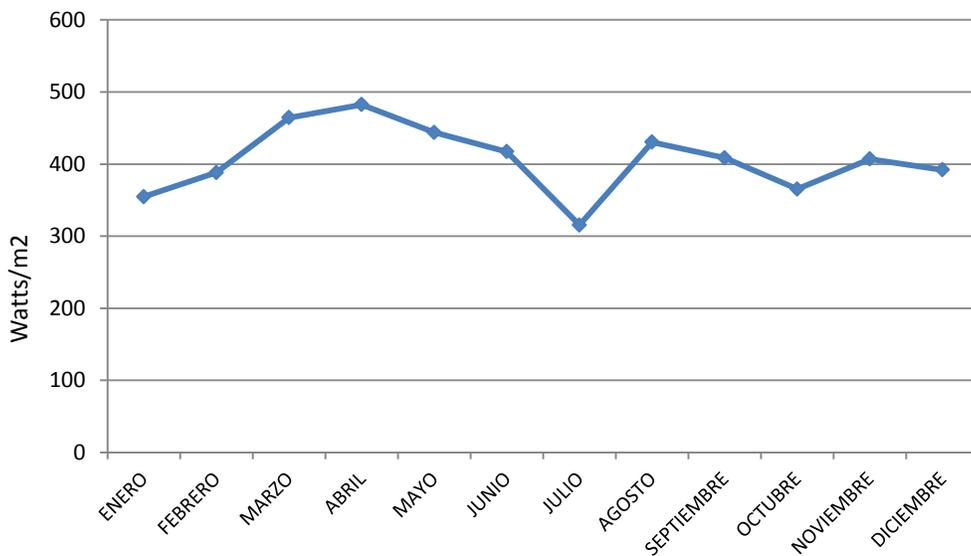
Como se puede ver en la figura siguiente, la mayor cantidad de horas sol que se tiene en el año se presenta en los meses de febrero a mayo. Los meses de julio a septiembre es donde se tiene la menor cantidad de horas sol, por lo tanto es donde se presenta la menor cantidad de radiación directa.



**Figura 5.8.** Promedio de horas de brillo solar para cada uno de los meses del año 2011.

Fuente: Elaboración propia con datos de la estación meteorológico del Colpos, 2011.

La radiación solar se comporta de manera semejante a las horas de brillo del sol. El mes con mayor cantidad de radiación en el año es abril donde se reciben casi los 1,000 Watts/m<sup>2</sup> como se puede ver en la siguiente Figura 5.9.



**Figura 5.9.** Radiación global promedio mensual de los meses de 2011.

Fuente: Elaboración propia con datos de la estación meteorológico del Colpos, 2011.

De acuerdo a los datos mostrados el mes de Julio es donde se presenta la menor cantidad de radiación promedio, por lo tanto, es para este mes para el cual se debe de realizar el diseño del sistema fotovoltaico, ya que al solventar la demanda requerida para este mes, los requerimientos de energía serían cubiertos para el resto del año.

Por lo que se puede ver en la Figura 5.9 el potencial energético solar con el que cuenta la zona de Montecillo es apropiado para la instalación de módulos fotovoltaicos en pequeña y gran escala.

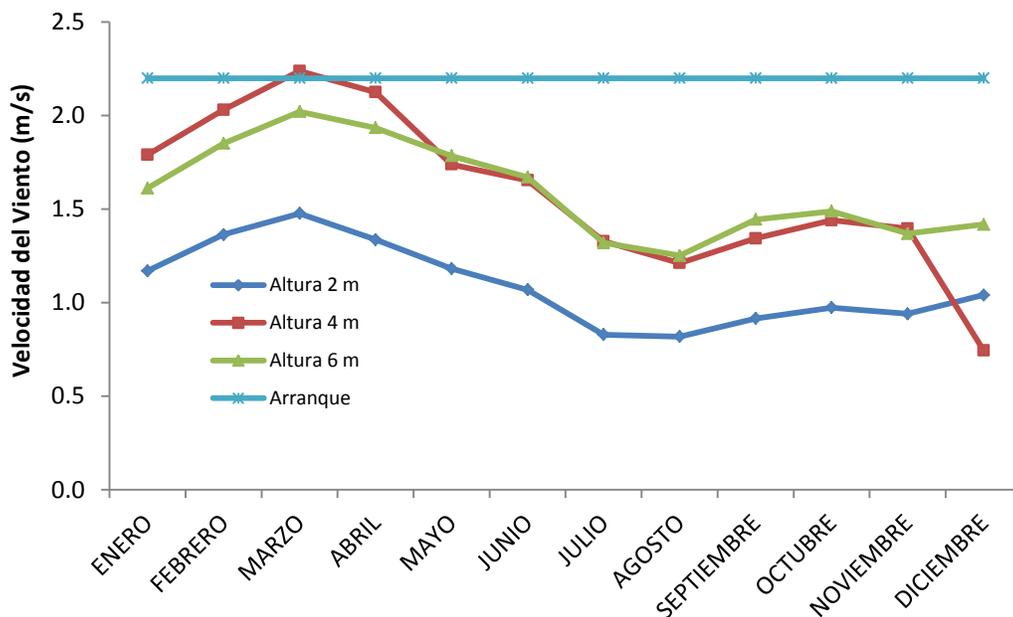
Para el potencial eólico no se puede mencionar lo mismo que con la energía fotovoltaica, debido a que las velocidades de viento registradas en la zona a una altura de 2, 4 y 6 metros, no son lo suficientemente fuertes para el arranque del generador eólico, ya que para que éste inicie su funcionamiento requiere de una velocidad mínima de 2.2 m/s hasta los 12.5 m/s que es donde adquiere su potencia nominal. Por lo tanto los vientos predominantes en la región son insuficientes para generar una importante cantidad de energía para consumo en viviendas (Cuadro 5.1).

Este problema de generación escasa se puede solucionar colocando el aerogenerador a una altura mayor a los 10 m sobre el nivel del suelo que es donde posiblemente exista una mayor cantidad de flujo de aire. Lamentablemente la empresa que suministró el equipo para el presente estudio no recomendó adquirir un poste o torre más elevada (aunque esto hubiera elevado el costo), para que el equipo pueda funcionar.

**Cuadro 5.1.** Medición de las velocidades de viento a diferentes alturas.

MES\ALTURA (m)	2	4	6
ENERO	1.17	1.79	1.61
FEBRERO	1.36	2.03	1.85
MARZO	1.48	2.24	2.02
ABRIL	1.34	2.12	1.93
MAYO	1.18	1.74	1.78
JUNIO	1.07	1.65	1.67
JULIO	0.83	1.33	1.32
AGOSTO	0.82	1.21	1.25
SEPTIEMBRE	0.92	1.34	1.44
OCTUBRE	0.97	1.44	1.49
NOVIEMBRE	0.94	1.40	1.37
DICIEMBRE	1.04	0.74	1.42
<b>PROMEDIO</b>	<b>1.09</b>	<b>1.59</b>	<b>1.60</b>

Fuente: Elaboración propia con datos de la estación meteorológico del Colpos, 2011.



**Figura 5.10.** Velocidad del viento a diferentes alturas en el Colpos.

Fuente: Elaboración propia con datos de la estación meteorológica del Colpos, 2011.

A continuación se presenta un resumen del estado de los estándares más importantes desarrollados por la IEC (International Electrotechnical Commission) enfocados a sistemas fotovoltaicos autónomos que se refieren a los distintos componentes y al funcionamiento del

sistema. Una revisión extensa de las normas publicadas y en trámite en el marco de la IEC y de otros organismos de normalización se puede encontrar en la publicación correspondiente de la Agencia Internacional de Energía IEA (por sus siglas en Inglés), (Egido y Camino 2008).

- IEC 61215 Ed.2. 2005 Esp. Módulos FV de silicio cristalino para uso terrestre - Cualificación del diseño y homologación.
- IEC 61427 Ed.2. 2005 Esp. Acumuladores para sistemas de conversión fotovoltaicos de energía - Requisitos generales y métodos de ensayo.
- IEC 62093 Ed.1. 2005 Esp. Componentes de acumulación, conversión y gestión de energía de sistemas fotovoltaicos. Cualificación del diseño y ensayos ambientales.
- IEC 61683 Ed.1. 1999 Esp. Sistemas fotovoltaicos - Acondicionadores de potencia - Procedimiento para la medida del rendimiento.
- IEC 60925 Ed.1.2. 2005 Esp. Balastros electrónicos alimentados con corriente continua para lámparas fluorescentes tubulares. Sección uno: prescripciones de funcionamiento.
- IEC 60904 Ed.2. 2006 Esp. Dispositivos fotovoltaicos. Parte 1: Medida de la característica corriente-tensión de dispositivos fotovoltaicos
- IEC 61173 Ed 1. 1992 Esp. Protección contra las sobretensiones de los sistemas fotovoltaicos (FV) productores de energía. Guía.

Cuando se trata de un proyecto totalmente nuevo, la metodología a seguir es la siguiente:

### **5.3. Proceso de cálculo para determinar el número de paneles necesarios y la capacidad del acumulador para un sistema alejado de la red**

Una forma de realizar el proceso de cálculo para la estimación del número de paneles solares necesarios, es siguiendo la metodología propuesta por el Centro de Estudios de Energía Solar (CENSOLAR). Esta metodología se resume en los siguientes 11 pasos:

1. Partir de la potencia en vatios (watts) de cada aparato de consumo (con o sin convertidor) y estimar el número medio de horas de funcionamiento de cada uno en el día medio del mes más desfavorable.
2. Calcular en  $W \cdot h$  el consumo diario  $E_T$  en el mes más desfavorable. (En su caso, se calcularán también los consumos semanales, mensuales o anuales así como los de periodicidad distinta a los citados).
3. Elegir el número de días de autonomía ( $N$ ) y averiguar la profundidad de descarga máxima  $p_d$  admitida para el acumulador<sup>17</sup>. Determinése también el valor de la autodescarga diaria si se tienen datos suficientes.
4. Calcular la energía necesaria:

$$E = \frac{E_T}{R} \quad (5.13)$$

Donde  $R$  es un factor global de rendimiento de la instalación y se obtiene como sigue:

$$R = 1 - \left[ \frac{(1 - k_b - k_c - k_v) k_a N}{p_d} \right] - k_b - k_c - k_v \quad (5.14)$$

Los valores de los coeficientes más usuales (a tomar en defecto de otros más precisos) son:

$$k_b = 0.05 \quad \text{Coeficiente de pérdidas por rendimiento en el acumulador} \quad (5.15)$$

$$k_a = 0.005 \quad \text{Coeficiente de autodescarga} \quad (5.16)$$

$k_c = 0$  Coeficiente de pérdidas en el convertidor o inversor de corriente. Si no existe convertidor, o si el rendimiento de éste ya se ha tenido en cuenta al calcular la potencia real consumida por los aparatos a los que afecte.

---

<sup>17</sup> Por lo general, un 0.8 para los de Níquel-Cadmio (Ni-Cd) o los estacionarios de Plomo-Antimonio (Pb-Sb) y 0.4 para los de Plomo-Calcio (Pb-Ca).

- $k_c = 0.2$  Cuando existe un convertidor senoidal que afecta a todo el circuito de consumo.
- $k_c = 0.1$  En el caso de que el convertidor sea de onda cuadrada.
- $k_v = 0.15$  Coeficiente que agrupa otras pérdidas (rendimiento global de toda la red de consumo, pérdidas por efecto Joule). Si las potencias de partida en el punto 1 son las teóricas de cada aparato.
- $k_v = 0.1$  Caso general, si no se dispone de información en detalle de los rendimientos.
- $k_v = 0.05$  Si las potencias de partida del punto 1 son las realmente consumidas por cada aparato, habiendo tenido ya en cuenta sus pérdidas.

5. Calcular la capacidad útil de la batería:

$$C_u = E * N \quad (5.17)$$

Donde:

$E$ = Energía necesaria o requerida, Wh

$N$ = Días de autonomía.

6. Calcular la capacidad nominal de la batería:

$$C = \frac{C_u}{p_d} \quad (5.18)$$

Donde:

$p_d$  = Profundidad de descarga máxima  $p_d$  admitida para la batería (por lo general, un 0.8 para baterías de Ni-Cd: Níquel-Cadmio o los estacionarios de Pb-Sb: Plomo-Antimonio, y 0.4 para los Pb-Ca: Plomo-Calcio).

7. Buscar la energía  $H$  para el mes más desfavorable en cuestión de radiación.

Para esto se debe de tener una base de datos donde se muestren las radiaciones promedio mensuales y el consumo estimado, seleccionar el dato del mes que posea la menor cantidad de radiación disponible. Al seleccionar este dato se da por hecho que en el resto de los meses la generación de energía estará garantizada y asegurará un correcto funcionamiento de la instalación en el mes en que la relación Consumo/Radiación es máxima. Esto es especialmente importante en las instalaciones cuyo consumo varíe y donde la garantía del suministro es más importante que el maximizar la captación energética a lo largo del año.

8. Hallar el número de horas sol pico sobre la superficie inclinada:

$$H.S.P. = 0.2778 * k * H \quad (5.19)$$

Donde  $k$  es el coeficiente de corrección por inclinación de los paneles ( $15^\circ$  más que la latitud para instalaciones que deben funcionar durante todo el año). Caso de montarse los paneles sobre un seguidor solar o “tracker”, multiplicar  $H.S.P.$  por el factor 1.2 ó 1.3 (Cuadro 5.2).

**Cuadro 5.2.** Factor de corrección de la radiación por inclinación.

Latitud = 37°												
Inclinación	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1.07	1.06	1.04	1.03	1.01	1.01	1.02	1.03	1.05	1.07	1.08	1.08
10	1.13	1.10	1.08	1.05	1.02	1.01	1.02	1.05	1.09	1.13	1.16	1.15
15	1.18	1.15	1.10	1.06	1.02	1.01	1.02	1.06	1.12	1.19	1.23	1.22
20	1.23	1.18	1.12	1.06	1.02	1.00	1.02	1.07	1.15	1.23	1.29	1.28
25	1.27	1.21	1.14	1.06	1.00	0.98	1.00	1.07	1.16	1.27	1.34	1.33
30	1.30	1.23	1.14	1.05	0.98	0.96	0.98	1.06	1.17	1.30	1.38	1.37
35	1.33	1.24	1.14	1.03	0.96	0.93	0.96	1.04	1.17	1.32	1.42	1.41
40	1.35	1.25	1.13	1.01	0.92	0.89	0.92	1.02	1.17	1.34	1.44	1.43
45	1.35	1.25	1.11	0.98	0.88	0.85	0.88	0.99	1.15	1.34	1.46	1.45
50	1.35	1.24	1.09	0.94	0.84	0.8	0.84	0.95	1.13	1.33	1.47	1.46
55	1.35	1.22	1.06	0.9	0.78	0.74	0.78	0.91	1.10	1.32	1.47	1.45
60	1.33	1.19	1.02	0.85	0.73	0.68	0.73	0.86	1.06	1.30	1.45	1.44
65	1.31	1.16	0.98	0.8	0.67	0.62	0.66	0.80	1.02	1.26	1.43	1.42
70	1.27	1.12	0.93	0.74	0.6	0.55	0.6	0.74	0.97	1.22	1.40	1.40
75	1.23	1.07	0.87	0.67	0.53	0.48	0.53	0.68	0.91	1.17	1.36	1.36
80	1.19	1.02	0.81	0.6	0.46	0.40	0.45	0.60	0.84	1.12	1.31	1.31
85	1.13	0.96	0.74	0.53	0.38	0.32	0.38	0.53	0.77	1.05	1.26	1.26
90	1.07	0.89	0.67	0.46	0.3	0.25	0.30	0.45	0.70	0.98	1.19	1.20

Fuente: Manuales de CENSOLAR Tomo 2, 2003.

9. Si los paneles son bifaciales y se montan con un fondo reflectante apropiado, multiplicar su potencia nominal  $P$  por el factor 1.2 (a menos que en la potencia nominal de dichos paneles ya se incluya la potencia absorbida por la cara dorsal).

10. La potencia  $E_p$  que deben producir los paneles es mayor que  $E$ , debido principalmente a las pérdidas por usar regulador. Se estima como:

$$E_p = \frac{E}{0.9} \quad (5.20)$$

11. Calcular el número de paneles necesarios de potencial nominal  $P$ :

$$N^{\circ} \text{ de paneles} = \frac{E_p}{[0.9P(H.S.P)]} \quad (\text{El factor } 0.9 \text{ es opcional}) \quad (5.21)$$

En resumen sería como sigue:



**Figura 5.11.** Proceso del diseño de la dimensión de un sistema fotovoltaico.

Fuente: Elaboración propia con datos de CENSOLAR Tomo 5, 2003.

## 5.4. Cálculo energético para un calentador solar de agua

De acuerdo con Guevara, 2003, en el diseño de sistemas de calentamiento de agua, es necesario disponer de datos que definen el sistema los cuales están representados por:

- Radiación solar
- Demanda energética
- Número de colectores
- Volumen y aislamiento del depósito de almacenamiento

### 5.4.1. Radiación

En el diseño del sistema de calentamiento es necesario, en lo posible, conocer los datos de radiación solar diaria, los que se pueden encontrar en los reportes de radiación solar de las estaciones meteorológicas o en cuyo defecto deben ser determinados. Para el caso de México y en particular de la zona del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, la cantidad de radiación solar es de alrededor de  $5.4 \text{ kWh/m}^2$ , por lo que el uso de esta tecnología es viable.

### 5.4.2. Demanda energética

Es la energía necesaria para elevar la temperatura de un volumen determinado de agua, desde una temperatura inicial ( $T_i$ ) hasta una temperatura de consumo ( $T_f$ ).

$$E = MC_p(T_p - T_i) \quad (5.22)$$

Donde:

- E : Demanda energética (kJ/día)
- M : Masa de agua a calentar en un día(kg/día)
- C<sub>p</sub> : Capacidad calorífica del agua (4.18 kJ/kg °C)
- T<sub>i</sub> : Temperatura inicial del agua (°C)
- T<sub>f</sub> : Temperatura de consumo del agua (°C)

Por otra parte, la masa de agua  $M$  está dada por la siguiente ecuación:

$$M = \eta_p \rho_{H_2O} V_p \quad (5.23)$$

Donde:

- n<sub>p</sub> : Número de personas (personas/día)
- V<sub>p</sub> : Volumen de agua per cápita (lt/persona)
- ρ<sub>H<sub>2</sub>O</sub> : Densidad del agua (1,000 kg/m<sup>3</sup>)

El volumen de agua per cápita  $V_p$  es la cantidad de agua que necesita una persona diariamente para actividades domésticas, este volumen varía en un rango de 20 a 60 litros. Pero también puede ser utilizada para actividades agroindustriales como por ejemplo el de nixtamalización en donde se requiere agua con temperaturas cerca del punto de ebullición.

### 5.4.3. Número de colectores

En la determinación del número de colectores del sistema de calentamiento de agua, es necesario conocer el área de captación y la eficiencia global del colector. En el caso del presente estudio, se trata de colectores con tubos al alto vacío con recubrimiento de capas de cobre, aluminio con nitrógeno y aluminio que convierte la radiación solar en calor.

### ***Área de captación***

Es el área necesaria para captar la energía solar que pueda satisfacer la demanda energética. El área depende de la radiación global y de la eficiencia total del sistema de calentamiento de agua.

$$A_{cap} = \frac{E}{H_p * \eta_g} \quad (5.24)$$

Donde:

$A_{cap}$  : Área de captación (m<sup>2</sup>)

$H_p$  : Radiación solar (Wh/m<sup>2</sup>)

$\eta_g$  : Eficiencia global diaria del sistema (%)

### ***Eficiencia global del sistema de calentamiento***

Es la relación entre la cantidad de energía empleada para elevar la temperatura del agua en el depósito de almacenamiento ( $Q_u$ ) y la energía solar que incide sobre un área determinada ( $I_d$ ).

$$\eta_g = \frac{Q_u}{I_d} \quad (5.25)$$

La cantidad de colectores necesarios para satisfacer la demanda energética está determinada por la relación:

$$N_c = \frac{A_{cap} * F.S.}{A_c} \quad (5.26)$$

Donde:

$N_c$  : Número de colectores

$A_{cap}$  : Área de captación (m<sup>2</sup>)

$A_c$  : Área de colector (m<sup>2</sup>)

F.S. : Factor de seguridad o de proyección de demanda (1-1.5)

#### **5.4.4. Volumen y aislamiento del depósito de almacenamiento**

La temperatura a la que se almacena el agua, se denomina temperatura equivalente ( $T_{eq}$ ), la cual varía en función de la temperatura del agua fría. Sin embargo el incremento de

temperatura, es decir, la temperatura equivalente menos la temperatura del agua fría, es un valor aproximadamente constante para cada sistema, 30 °C en el sistema puntual y 20 °C en el sistema continuo. Con el valor de la temperatura equivalente se recalcula la demanda energética, y el valor de la masa de agua a almacenar. En los cálculos se reemplaza el valor la temperatura de consumo por el de la temperatura equivalente, y el valor de la masa a calentar por el de masa a almacenar.

El volumen del depósito está determinado por la masa de agua a almacenar y por el tipo de uso, ya sea un sistema puntual o un sistema continuo. En el sistema puntual, el volumen se calcula 15% más que la masa de agua a almacenar en un día.

### 5.5. Cálculo de la potencia de salida de un aerogenerador

La potencia de salida del generador eólico se estima mediante la interpolación de los valores de los datos proporcionados por los fabricantes. Como las curvas de potencia son muy suaves, se puede aproximar mediante una interpolación spline cúbica que sería el primer método de obtención de la potencia entregada (Hocaoglu, 2009).

La ecuación de ajuste de las características de salida del generador de viento se puede expresar como:

$$P_{WG}(V) = \begin{cases} 0 & V \leq V_{ci} \text{ or } V \geq V_{co} \\ a_1 V^3 + b_1 V^2 + c_1 V + d_1 & V_{ci} < V < V_1 \\ a_2 V^3 + b_2 V^2 + c_2 V + d_2 & V_1 < V < V_2 \\ \dots & \dots \\ a_n V^3 + b_n V^2 + c_n V + d_n & V_{n-1} < V < V_r \\ P_r & V_r \leq V < V_{co} \end{cases} \quad (5.27)$$

Donde  $P_{WG}(V)$  es la potencia de salida del aerogenerador a la velocidad de viento  $V$ ,  $P_r$  es el rango de potencia;  $V$  es la velocidad del viento a la altura del cubo o “nariz” del aerogenerador;  $V_{ci}$ ,  $V_r$  y  $V_{co}$  son las velocidades de arranque, velocidad nominal y velocidad de corte, respectivamente. La primera velocidad representa la velocidad que el viento debe de poseer para que el aerogenerador inicie su proceso de generación de energía eléctrica, mientras que la velocidad nominal es valor donde el aerogenerador obtiene el máximo rendimiento de producción. La velocidad de corte representa el valor de la velocidad del viento donde se pone en riesgo la estructura y funcionalidad del generador eólico por lo que dispone de un dispositivo de seguridad que, al llegar a tener estas velocidades de viento, provoca el cese de la producción de energía y el paro del aerogenerador.

En el caso del presente trabajo, el aerogenerador instalado en el área de traspatio está a una altura insuficiente y con múltiples obstáculos que le impiden aprovechar el poco recurso eólico con los que cuenta la zona, por lo que no se pudo tomar datos representativos acerca de su funcionamiento. Como se mencionó anteriormente, lamentablemente la empresa que suministró el equipo no recomendó adquirir un poste o torre más elevada con altura mínima de 10 m (aunque esto hubiera significado un incremento en el costo del sistema) para que el equipo pudiera funcionar.

## **6. PROPUESTA DE USO DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN EL CAMPUS MONTECILLO DEL COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

Con base en el objetivo de este trabajo es evaluar los generadores fotovoltaicos, un generador eólico y un calentador solar de agua instalados en la Unidad de Traspatio del Campus Montecillo. Con lo cual se cumplen parcialmente los propósitos señalados y complementariamente se desarrolla una propuesta para ampliar en particular la generación de energía eléctrica fotovoltaica.

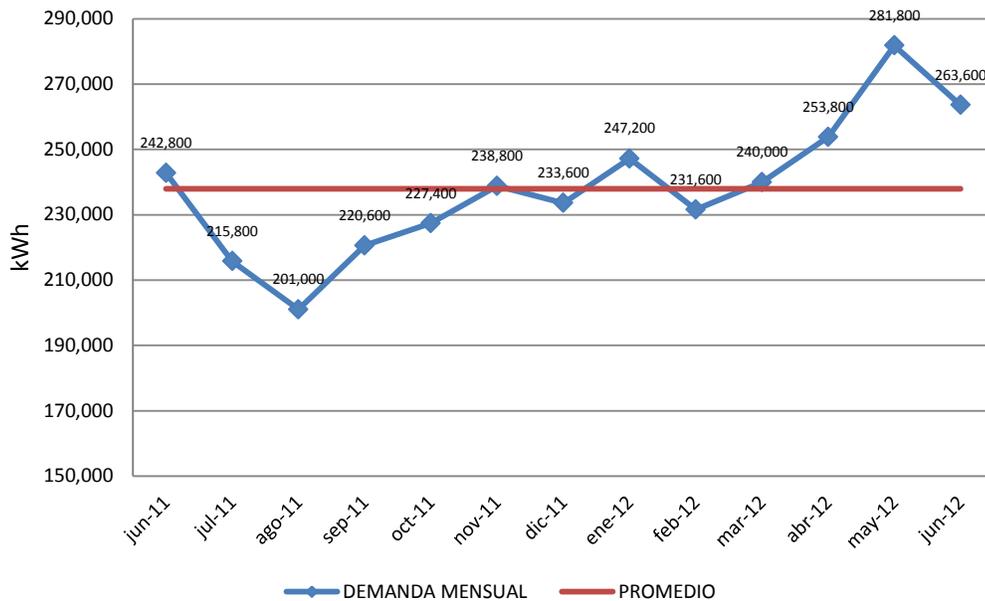
Como complemento al presente trabajo se realiza el cálculo de un sistema fotovoltaico para el Campus Montecillo por lo que se analizaron los recibos emitidos por la CFE y se encontró que al igual que en otros campus del Colegio de Postgraduados, se tiene una demanda creciente en el uso de energía eléctrica, la cual se toma de la red y es generada principalmente en centrales termoeléctricas que utilizan combustibles fósiles.

El interés de promover el uso de energías alternas, básicamente fotovoltaica, en el Colegio de Postgraduados tiene al menos tres fundamentos:

- a) Contribuir (al menos simbólicamente) al combate del cambio climático global al disminuir el consumo de energía que se genera de la quema de combustibles fósiles.
- b) Lograr un ahorro en los gastos de energía eléctrica.
- c) Ser congruentes con lo que se pregona en el sentido de buscar un desarrollo sustentable y un manejo cuidadoso de los recursos naturales, sobre todo de los no-renovables.

En este apartado se hace una sugerencia de cómo es posible utilizar generadores fotovoltaicos y al mismo tiempo lograr un ahorro en el gasto por consumo de energía eléctrica.

Actualmente en el Campus Montecillo del Colegio de Postgraduados el consumo de energía tiene una tendencia a la alza como se puede ver en la Figura 6.1.

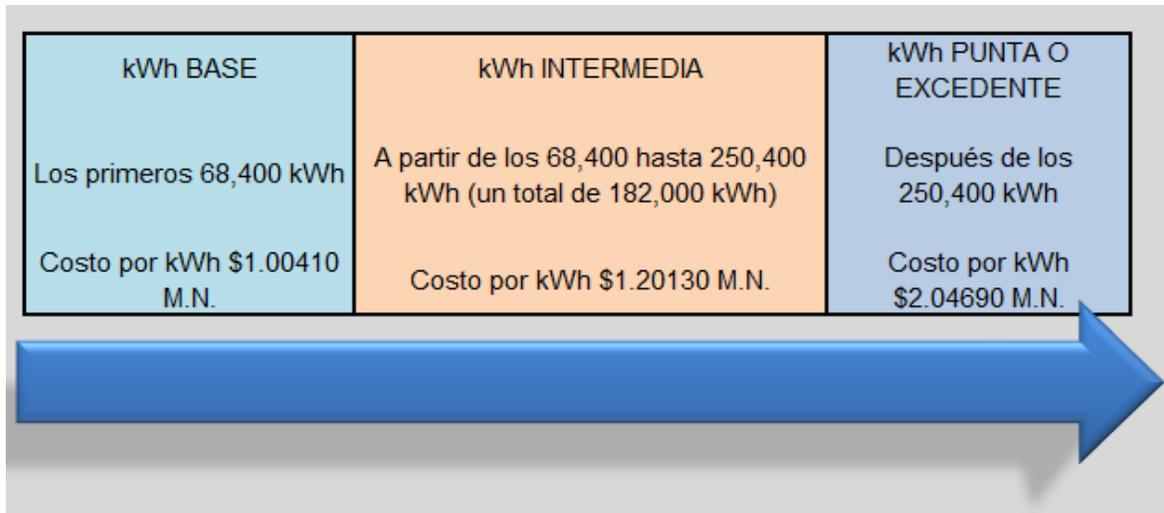


**Figura 6.1.** Consumo energético mensual en el campus Montecillo del Colegio de Postgraduados.

Fuente: Comisión Federal de Electricidad, 2012.

En los cuatro meses últimos de información de consumo mensual de energía en el Campus se superó el promedio mensual de 237,000 kWh/mes, donde muy probablemente en un futuro muy cercano el consumo medio mensual superará los 250,000 kWh. Consumo que representa un costo del kWh con un aumento considerable, por lo que se hace atractiva la inversión en un sistema de paneles fotovoltaicos, como se muestra más adelante.

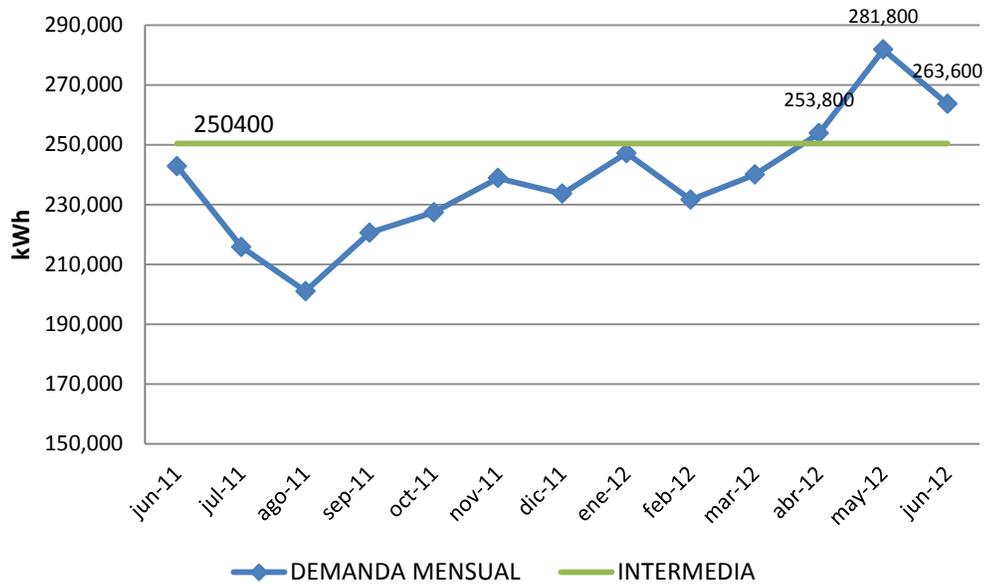
La Comisión Federal de Electricidad tiene tarifas diferenciales del costo del kWh según el consumo mensual de energía, como se muestra en la Figura 6.2, (CFE, 2012).



**Figura 6.2.** Costos de energía para la tarifa HM.

Fuente: Elaboración propia con datos de CFE, 2012.

Para el caso del Campus Montecillo en los últimos tres meses el consumo de energía ha superado el nivel intermedio y se ha llegado a la categoría de energía excedente, lo que representa un mayor costo por cada kWh consumido. Esta energía de consumo en exceso se paga 70.4% más caro que el consumo intermedio y 103.8% más con respecto al costo base (recibo emitido por CFE, 2012). Por lo que es necesario mantener un consumo menor, al menos en la tarifa intermedia, para evitar gastos extraordinarios (para mayor detalle revisar el Anexo B).



**Figura 6.3.** Consumo de energía de punta en el Campus Montecillo del Colpos.

Fuente: Elaboración propia con datos de CFE, 2012.

### **UNA ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN: LA UTILIZACIÓN DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS CON INTERCONEXIÓN A LA RED DE CFE.**

Para mantener el consumo energético del Colpos ante la CFE por debajo de los 250,400 kWh mensuales sería recomendable generar 38,000 kWh al mes, es decir 1,264 kWh por día, lo que representa un 15.9% del consumo promedio del Campus Montecillo. Si se utilizan módulos solares con capacidad de 230 W se requeriría la cantidad de 1,260 unidades con un área total de 2,600 m<sup>2</sup>. Con la instalación del sistema fotovoltaico se tendría un promedio de consumo mensual de 200,000 kWh que se estaría dentro del límite del consumo intermedio. Si el Campus Montecillo se fijara el propósito de alcanzar esta meta en 5 años entonces habría que instalar alrededor de 250 módulos por año. Si se inicia el programa con tan solo unos 100 módulos el primer año, para ganar experiencia en la operación de estos paneles y en los años futuros se continuaría con el programa al mismo ritmo o más aceleradamente.

Las áreas disponibles para la instalación del sistema de producción de energía renovables son los techos de los edificios del campus, pues representa áreas con buena iluminación y poco o nulo sombreado.

Una forma importante de reducir costos en un sistema fotovoltaico y que ahora la ley lo permite, es conectar a la red de la CFE la energía generada (en caso de haber un exceso), la cual se va a restar de la consumida, por lo que habría que pagar solo por la diferencia. Así se podría no utilizar baterías que representan un costo adicional muy importante.

El costo total que tendría el sistema fotovoltaico sería aproximadamente de \$12,001,615.02<sup>18</sup> Moneda Nacional (M.N.) con IVA e instalación incluida o bien US \$ 3.59 por Watt instalado.

El tiempo de recuperación de la inversión es de aproximadamente 15.4 años, si se asume que la energía no varíe su precio, pero si ésta se incrementa su costo el tiempo de recuperación sería menor.

Si el proyecto se llevara a cabo en 5 años cada año se instalarían 250 módulos con capacidad para generar 95,547.60 kWh por año, lo que tendría un costo de \$2,400,323.00 con IVA y costos de instalación incluidos. Se pueden analizar otras alternativas.

El ahorro energético que esto representaría al Colegio de Postgraduados sería de \$133,146.34 M.N. aproximadamente para el primer año de funcionamiento y de \$671,068.41 M.N. anuales cuando el proyecto esté completo, al considerar los costos actuales de energía. En el Anexo B se presentan detalles de los cálculos.

---

<sup>18</sup> Costo con base en la cotización del día 30/Agosto/2008 de la empresa Energía Solar Modular, S.A. de C.V. Precio que fue transformado de dólares estadounidenses a pesos mexicanos considerando una Tasa de Cambio de \$13.50 pesos por dólar. El costo no incluye obra civil ni el módulo de exposición de datos.

## 6.1. EJEMPLO DE USO DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA

Un ejemplo claro del uso de energía fotovoltaica a nivel institucional lo tiene la Universidad Autónoma Metropolitana. Donde siendo rector el Dr. Oscar Armando Monroy Hermosillo, en Octubre de 2009 se instalan 286 módulos fotovoltaicos con una potencia de 210 Wp (Watts pico) cada uno, teniendo en total 60 kWp instalados.



**Figura 6.4.** Visita a la instalación fotovoltaica en la UAM, con atención de la M.C. Martha Mireya Ruíz Amelio (14 de Septiembre de 2012).

El sistema fue instalado por la empresa TENESOL<sup>19</sup> en el techo de uno de los edificios de la universidad. Se tiene una configuración de 7 módulos conectados en serie y se integraron 2 series para cada inversor para obtener así 21 inversores con 14 módulos cada uno. Cada inversor tiene una potencia de 2,500 W.

---

<sup>19</sup> <http://www.tenesol-group.com/>



**Figura 6.5.** Configuración de la instalación de los inversores y módulos fotovoltaicos.

Desde su instalación a la fecha el sistema fotovoltaico ha generado un total de 271 MWh y se ha dejado de emitir aproximadamente 151.18 toneladas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. En lo que lleva este año se han generado 90 MWh de energía (Ruíz, 2012).

El costo del sistema fotovoltaico fue de US \$7.59 por Watt instalado, teniendo un total de US \$ 455,400.00.

Se instaló un sistema de monitoreo de datos que recibe información cada 10 segundos generando un promedio cada 10 minutos, que mantiene una constante vigilancia del funcionamiento de los módulos. También se cuenta con un sistema de medición de radiación solar paralelo a la superficie del suelo y uno en un ángulo igual a la inclinación de los módulos para medir en forma real el rendimiento de los paneles de acuerdo a las condiciones del lugar.



**Figura 6.6.** Sistema de adquisición de datos.

La instalación fotovoltaica que posee la UAM aparte de solventar un porcentaje de la energía que consume la institución, cumple con la función de laboratorio de investigación para los estudiantes de la universidad, ya que fomenta a la concientización del uso de energías renovables y sobre todo a la investigación y formación de recursos humanos capacitados en dicha área.

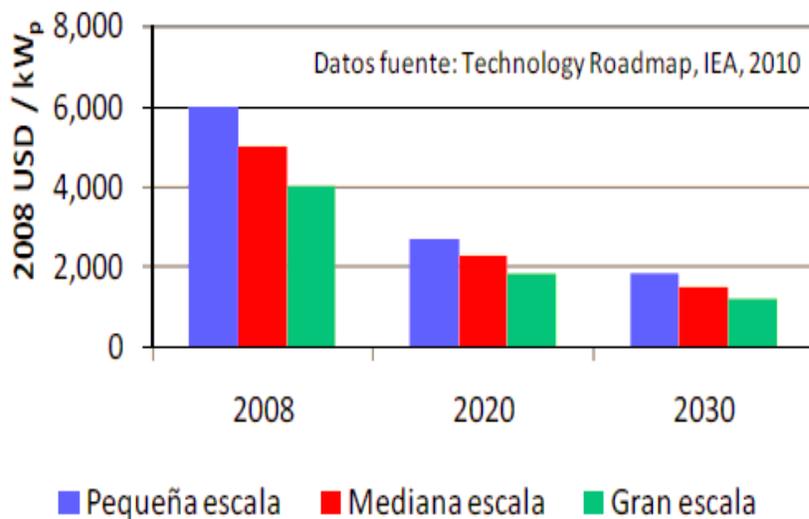
## 7. ANÁLISIS DE COSTOS

En 2010 y 2011, la mayoría de las tecnologías experimentaron un crecimiento tanto en la fabricación de equipos como en las ventas e instalación. La reducción de los costos de las tecnologías que aprovechan las fuentes renovables de energía ha propiciado altas tasas de crecimiento en la industria manufacturera, en particular en la tecnología solar fotovoltaica; la reducción de costos en las turbinas eólicas y las tecnologías de procesamiento de biocombustibles también contribuyeron en ese sentido.

Al mismo tiempo, hubo una mayor consolidación del sector, especialmente en la industria de la biomasa y biocombustibles, empresas tradicionales que migraron al área de las energías renovables convirtiéndose en empresas más fuertes. Las empresas manufactureras continuaron desarrollando proyectos.

En algunos casos los costos típicos de capital y el costo nivelado de generación para diferentes grupos de tecnologías de energías renovables se han ido acercando cada vez a los de las energías convencionales.

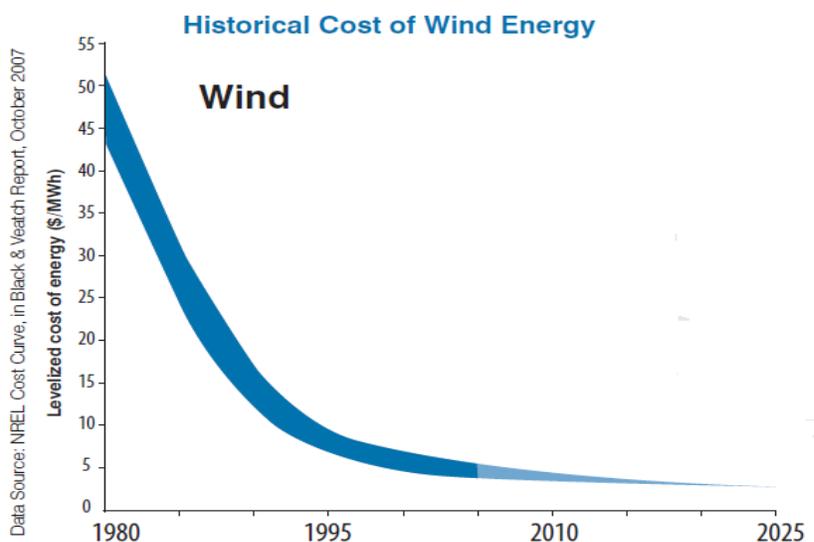
De acuerdo con Becerra 2011, el costo de inversión de los sistemas fotovoltaicos es inversamente proporcional al tamaño mismo de la instalación, esto quiere decir que las instalaciones pequeñas son más costosas (US \$ 6,000.00/kWp) que las instalaciones a gran escala (US \$ 4,000.00/kWp).



**Figura 7.1.** Proyección del costo instalado de sistemas fotovoltaicos en países líderes.

Fuente: Becerra, 2011.

Según la AWEA (American Wind Energy Association) en los últimos años la generación de energía eólica ha disminuido su precio hasta llegar de US \$ 5-7 /MWh (Figura 7.2).



**Figura 7.2.** Costo de generación de energía eólica.

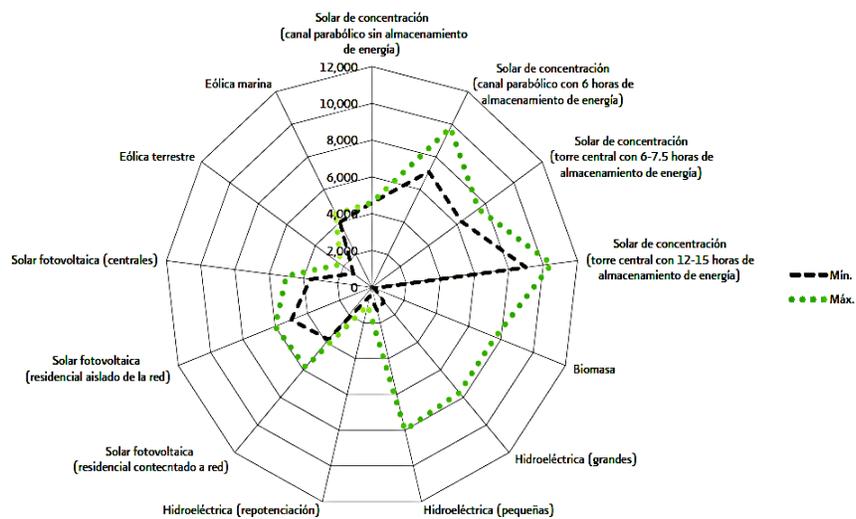
Fuente: AWEA, 2011.

Datos arrojados por la SENER en las Perspectivas de Energías Renovables 2012-2026, indican que para un sistema solar casero de 20 a 100 W de potencia que suministre energía

eléctrica a una vivienda rural, tiene un costo típico de 40 a 60 US¢/kWh; mientras que una turbina eólica (en pequeña escala) de 0.1 a 3 kW de potencia, con el mismo propósito que el sistema fotovoltaico, el costo oscila entre 15-35 US¢/kWh. Estos costos son indicativos de los costos económicos nivelados, y excluyen subsidios o incentivos. Los costos característicos de la energía se calculan bajo las mejores condiciones, incluyendo el diseño del sistema, la ubicación y disponibilidad de recursos. Las condiciones óptimas pueden reducir los costos de producción, y condiciones menos favorables pueden generar costos considerablemente superiores. Los costos de los sistemas híbridos fuera de la red eléctrica a partir de energías renovables dependerán en gran medida del tamaño del sistema, su ubicación y los elementos asociados, tales como baterías de almacenamiento y equipos electrógenos a base de diésel. Los costos de la energía solar fotovoltaica varían según la latitud y la cantidad de insolación solar.

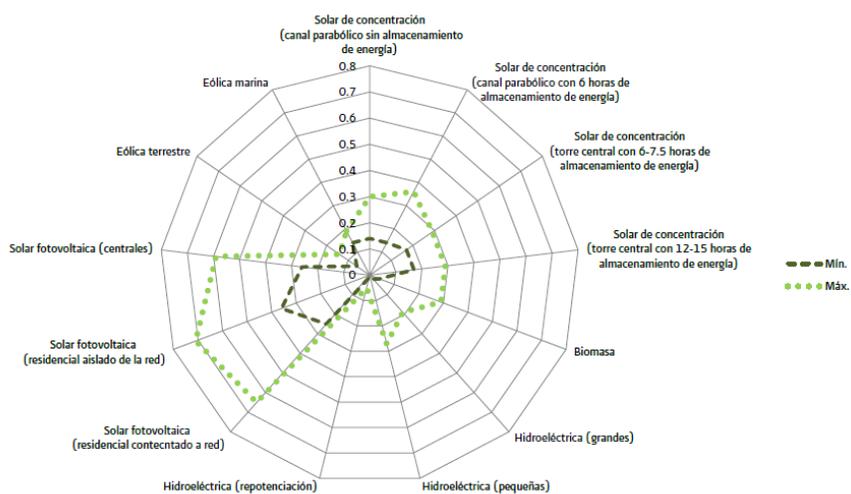
El gran problema de las energías renovables es la dificultad en calcular de una manera integrada cual es el efectivo nivel de competitividad económica en relación a las convencionales. En este sentido el concepto de Costos Nivelados de Energía (acrónimos en inglés: LCoE o LCE), que permite comparar en su integralidad los costos de diferentes tecnologías de generación, a lo largo del tiempo de vida (lifetime) de las mismas, ver Figura 7.3 y Figura 7.4, (Coviello, 2010).

Cory, 2009 resume el LCoE como el precio mínimo al cual hay que vender la energía para alcanzar el punto de equilibrio de un proyecto.



**Figura 7.3.** Costos internacionales típicos de instalación de energías renovables<sup>20</sup> (USD 2010/kW).

Fuente: SENER 2012b, con información de Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series, IRENA, 2012.



**Figura 7.4.** Costos nivelados de energía internacionales generada típicos a partir de fuentes renovables (USD 2010/kWh).

Fuente: SENER 2012b, con información de Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series, IRENA, 2012.

<sup>20</sup> Los costos de instalación para las tecnologías que aprovecha la biomasa que se muestran en la gráfica, agrupa diversas tecnologías disponibles en el mercado (planta de caldera/turbina para generación, calderas de lecho fluidizado circulante, gasificadores fijos y de lecho fluidizados, calderas para producción de electricidad y calor, gasificadores de biomasa para producción de electricidad y calor, biodigestores, co-combustión.

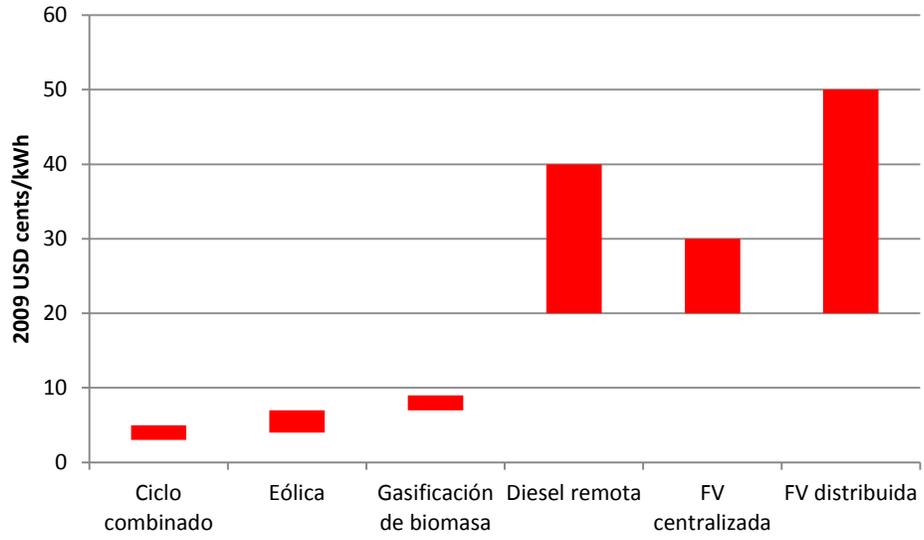
La generación de energía tiene diferentes costos de producción dependiendo del tipo de tecnología y recursos que se utilizan para ello. Becerra, 2011 resume estos costos de producción de energía en la Figura 7.5 para diferentes tecnologías observándose que, la energía fotovoltaica distribuida<sup>21</sup> es la que presenta mayor costo seguida de la energía fotovoltaica centralizada.

Las diferencias entre estas dos son las siguientes:

- La Centralizada supone que la generación quede en manos de las grandes empresas o inversionistas mientras que la Distribuida permitiría que cada ciudadano produjera su propia energía.
- La Centralizada obliga a la construcción de nuevas líneas de transporte mientras que la Distribuida, al ser de pequeña potencia, aprovecha las existentes de baja tensión.
- La Centralizada supone pérdidas de energía por transporte mientras que la Distribuida es altamente eficiente por generarse en puntos donde se consume.
- La Centralizada supone construcción a gran escala con mano de obra a precio residual y trabajo en serie, la Distribuida requiere un alto porcentaje de técnicos de ciclos formativos e ingenierías.
- La Centralizada generaría básicamente valor añadido para empresas de fuera de la región mientras que la Distribuida dejará la plusvalía en la economía regional (propietarios, instaladores, ingenierías, almacenes de materiales eléctricos, almacenes de metal, mantenedores entre otros).

---

<sup>21</sup> También conocida como microgeneración. Se trata de pequeñas instalaciones que se construyen sobre puntos de consumo (viviendas, naves industriales, etc.) para que los “pequeños consumidores” puedan ahorrar energía.



**Figura 7.5.** Costos comparativos de producción de energía eléctrica.

Fuente: Becerra, 2011.

## 8. RESULTADOS

El uso de fuentes de energías alternativas, como es el caso del aprovechamiento de las energías fotovoltaica y eólica, son alternativas para atender de forma amigable el medio ambiente, para aquellos procesos que requieran de energía eléctrica para consumo humano o industrial. En específico en el sector rural, los requerimientos de energía eléctrica, como es la iluminación, bombeo de agua o arranque de motores eléctricos en invernaderos entre otros, son los problemas que se pueden resolver con la energía energías renovables para zonas que no cuenten con el servicio de electrificación.

Dentro de las ventajas y beneficios que se pueden encontrar de la energía fotovoltaica son los siguientes:

- Prácticamente inagotable.
- La disponibilidad en México, dada su ubicación geográfica.
- No incluye partes en movimiento sujetas a desgaste o averías por lo que se requiere poco mantenimiento.
- El proceso de conversión fotovoltaica no genera emisiones.
- La tecnología fotovoltaica puede producir electricidad en el punto de consumo lo que reduce las pérdidas por transmisión e incrementa la confiabilidad del servicio.
- La tecnología fotovoltaica se puede complementar con otras fuentes de energías tanto no renovables como renovables.
- El ciclo de vida de los módulos fotovoltaicos llega a superar los 30 años.

La energía eólica presenta ventajas similares a la energía fotovoltaica entre las que se pueden destacar:

- Prácticamente inagotable.
- No genera emisiones.
- El costo de producción por MWh es mucho más barato que el de la de energía fotovoltaica.

- La superficie utilizada para la instalación de un parque eólico puede ser utilizada para la agricultura al mismo tiempo.
- Genera más fuentes de empleo que otras energías renovables.

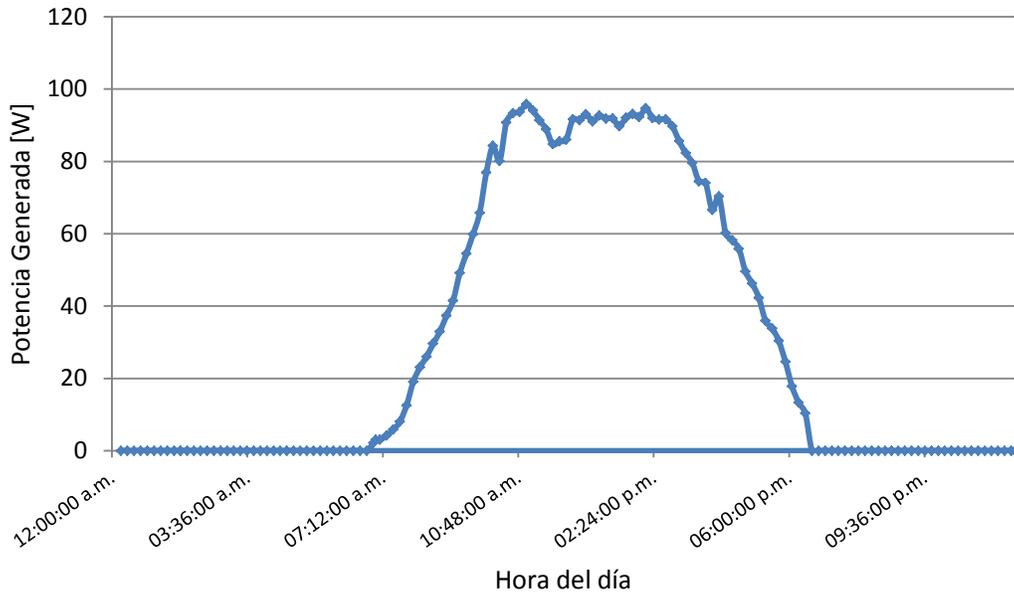
### **8.1. Evaluación de la energía fotovoltaica generada**

De acuerdo a la casa de venta, SAECSA S.A. de C.V., la producción del sistema fotovoltaico de la Unidad de Traspatio del Colpos es de 2,016 Wh/d. Lo que se hizo fue medir y obtener exactamente cuál es la cantidad de Watts-hora que genera un panel fotovoltaico y determinar la eficiencia de funcionamiento bajo las condiciones reales de operación.

Se inició la evaluación del sistema de producción de energías alternas con la instalación de los mismos dándoles la orientación hacia el Sur y un ángulo de inclinación de 23° de acuerdo a los manuales de CENSOLAR, otros autores manejan el ángulo de inclinación igual a la latitud del lugar.

Se realizó la adquisición, instalación y calibración de un sistema de adquisición de datos (DAQ), que mide, registra y almacena la información de corriente, voltaje y potencia generada por los paneles fotovoltaicos.

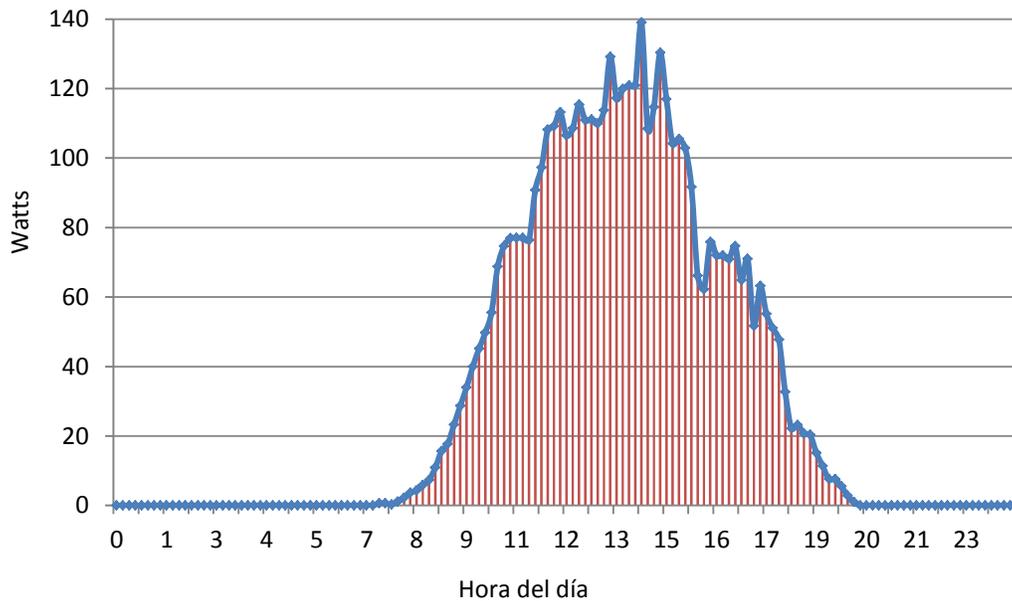
Se tomaron los datos de generación de energía (voltaje y corriente directa) de unos de los módulos fotovoltaicos obteniéndose las mediciones que a continuación se muestran.



**Figura 8.1.** Promedio de energía producida durante el mes de Enero de 2011.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez medida la generación de energía para el módulo, se obtuvieron los promedios móviles para cada punto de medición, como se muestra en la siguiente figura (8.2).



**Figura 8.2.** Promedio horario de energía producida durante un mes de medición (Abril de 2011).

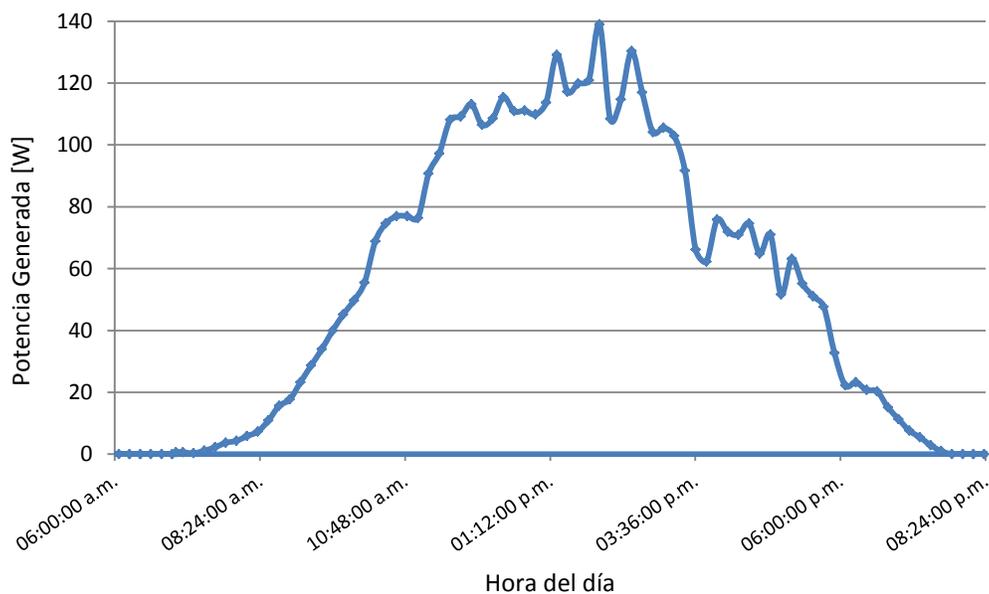
Fuente: Elaboración propia.

Se realiza el mismo procedimiento para el resto de los meses obteniéndose los siguientes resultados (Cuadro 8.1).

**Cuadro 8.1.** Promedio mensual de generación de energía eléctrica fotovoltaica de un módulo fotovoltaico.

Meses	Producción de un Módulo Fotovoltaico (Wh/día)
Enero	615.93
Febrero	603.92
Marzo	741.73
Abril	796.78
Mayo	786.76
Junio	657.24
Julio	677.94
Agosto	621.42
Septiembre	658.62
Octubre	728.42
Noviembre	699.28
Diciembre	689.67
<b>Promedio anual</b>	<b>689.81</b>

Fuente: Elaboración propia.

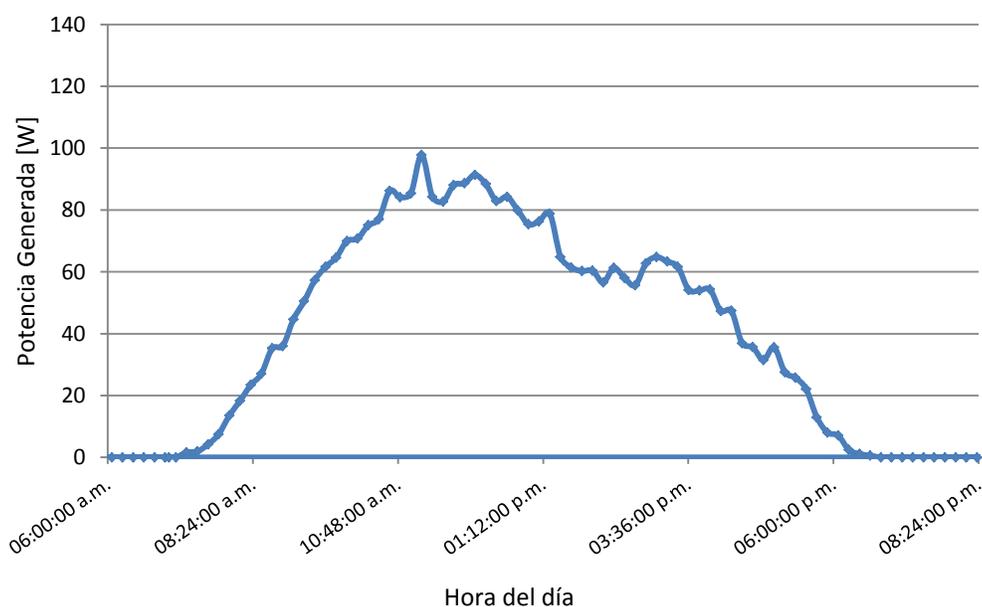


**Figura 8.3.** Producción de energía fotovoltaica de un módulo fotovoltaico para el mes de Abril de 2011.

Fuente: Elaboración Propia.

La Figura 8.3 representa la producción promedio mensual de un módulo fotovoltaico en el mes de Abril. Donde cada módulo genera entre 80 a 110 Watts durante las 5 horas de radiación máxima (entre las 11:00 am a 3:00 pm), con picos de hasta 140 W. Durante este mes un solo módulo fotovoltaico generó 796.78 Wh/día, por lo tanto el sistema completo formado por cuatro módulos de las mismas características, podría generar la cantidad total de 3,187 Wh/día en promedio, que en este caso sería para el mes de mayor radiación solar. (Ver Anexo C para el resto de las gráficas).

En Febrero, el mes más desfavorable en cuanto a producción, se tiene una generación de 603.92 Wh/día por cada módulo, obteniendo un total de 2,415 Wh/día del sistema fotovoltaico (ver Figura 8.4).



**Figura 8.4.** Producción de energía eléctrica de un módulo fotovoltaico para el mes de Febrero de 2011.

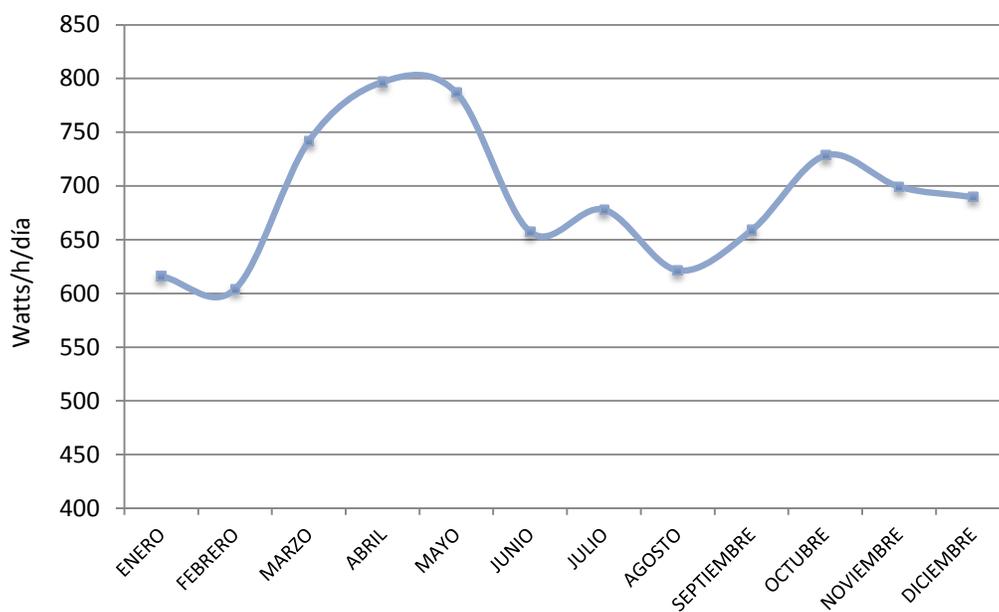
Fuente: Elaboración Propia.

En el Cuadro 8.2 se observa que el mes de Abril es donde se presenta la mayor cantidad de producción de energía y en Febrero donde hay una menor generación.

**Cuadro 8.2.** Promedio mensual de generación de energía eléctrica para el sistema fotovoltaico.

Mes	Producción de un Módulo Fotovoltaico (Wh/día)	Producción del Sistema Fotovoltaico (Wh/día)
Enero	615.93	2,463.73
Febrero	603.92	2,415.69
Marzo	741.73	2,966.93
Abril	796.78	3,187.12
Mayo	786.76	3,147.04
Junio	657.24	2,628.95
Julio	677.94	2,711.76
Agosto	621.42	2,485.70
Septiembre	658.62	2,634.47
Octubre	728.42	2,913.70
Noviembre	699.28	2,797.13
Diciembre	689.67	2,758.66
<b>Promedio anual</b>	<b>689.81</b>	<b>2,753.57</b>

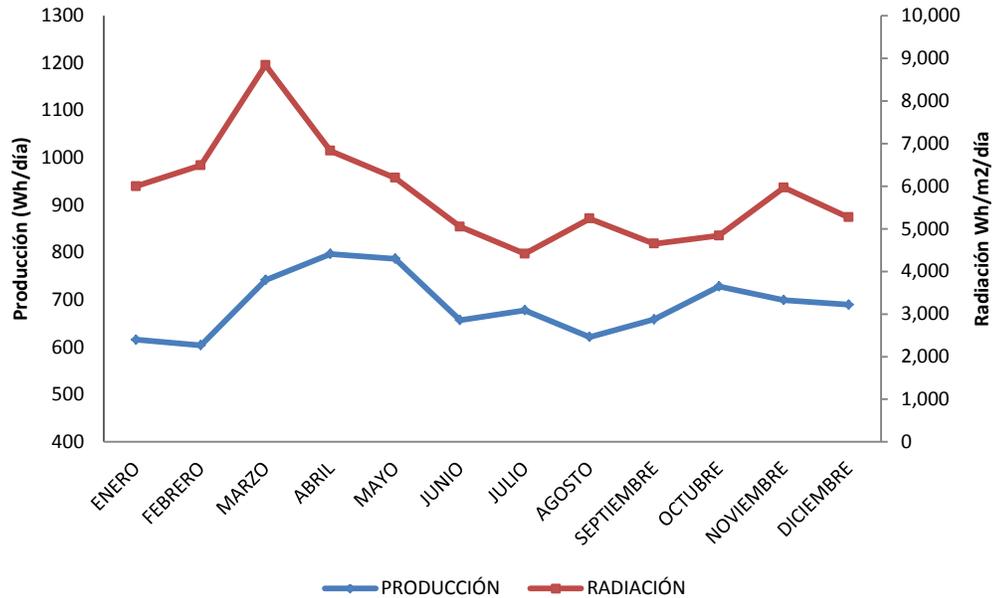
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de las mediciones.



**Figura 8.5.** Promedio mensual de generación de electricidad de un módulo fotovoltaico.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los datos de radiación obtenidos de la estación meteorológica del Colpos, la generación de energía en el área de prueba se comporta de manera similar a la radiación solar recibida, como se indica en la Figura 8.6.



**Figura 8.6.** Comparación entre la generación de eléctrica obtenida y la radiación total recibida.

Fuente: Elaboración propia.

Con base a los datos medidos y recopilados de generación de energía fotovoltaica y radiación solar respectivamente, se obtiene la eficiencia de conversión de los módulos fotovoltaicos. Se sabe que los datos de radiación están dados en Wh/m<sup>2</sup>/día, y que el área de captación de un módulo es igual a 0.99 m<sup>2</sup> (ver apartado 5.1), por lo que la eficiencia se calcula como sigue:

$$E_M = \frac{G_M}{(R_{Prom} * A_c)} \quad (8.1)$$

Donde:

$E_M$  = Eficiencia del módulo, decimal.

$G_M$  = Promedio de energía generada por el módulo, Wh/día.

$R_{Prom}$  = Radiación solar promedio, Wh/m<sup>2</sup>/día.

$A_c$  = Área de captación del módulo, m<sup>2</sup>.

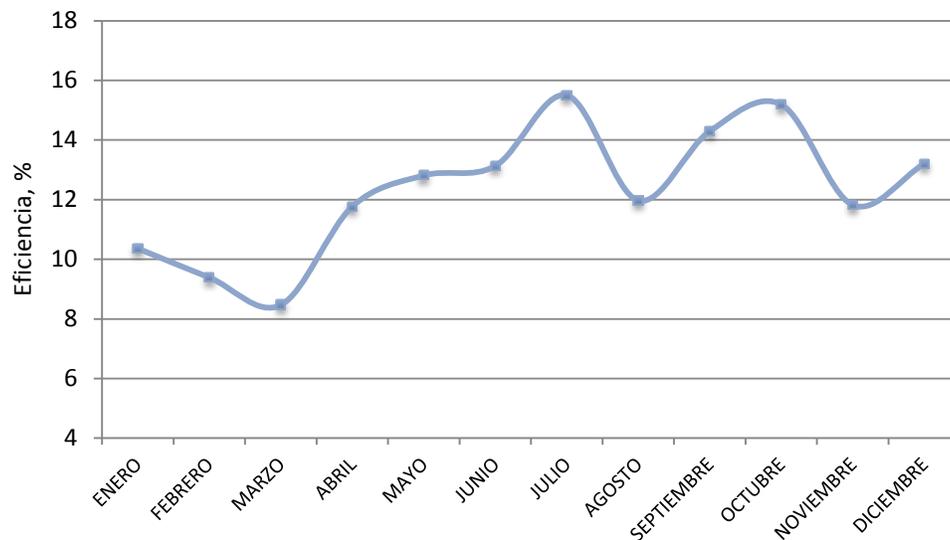
Del procedimiento anterior se obtienen los valores de eficiencia de conversión energética de los módulos fotovoltaicos, que se muestran en el cuadro 8.3 para cada mes del año.

**Cuadro 8.3.** Comparación entre la energía producida y la radiación recibida.

Meses	Producción de un Módulo Fotovoltaico (Wh/día)	Promedio Radiación en un Plano Inclinado (Wh/m <sup>2</sup> /día)	Eficiencia, %
Enero	615.93	5,995.37	10.4
Febrero	603.92	6,487.65	9.4
Marzo	741.73	8,836.99	8.5
Abril	796.78	6,827.48	11.8
Mayo	786.76	6,192.68	12.8
Junio	657.24	5,047.84	13.1
Julio	677.94	4,411.04	15.5
Agosto	621.42	5,235.78	12.0
Septiembre	658.62	4,646.47	14.3
Octubre	728.42	4,836.40	15.2
Noviembre	699.28	5,966.51	11.8
Diciembre	689.67	5,267.81	13.2
<b>Promedio</b>	<b>689.81</b>	<b>5,812.67</b>	<b>12.3</b>

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de la medición.

NOTA: En la eficiencia se considera la superficie de la instalación que es igual a 0.9916 m<sup>2</sup>.



**Figura 8.7.** Eficiencia de conversión energética de un módulo fotovoltaico en operación.

Fuente: Elaboración propia.

La eficiencia calculada y mostrada en la Figura 8.7, incluye las pérdidas ocasionadas por temperatura, suciedad generada por polvo y otros factores. Por lo tanto se calculó las pérdidas originadas por estos factores que contribuyen a la disminución de la eficiencia en la conversión energética. La eficiencia del módulo, a través del año es variable debido a que esta eficiencia es medida con respecto a la radiación sobre el plano inclinado y lo que genera el módulo solar. Para los meses de Julio y Octubre se realizó la limpieza de los paneles de forma continua, es decir, cada tercer o cuarto día logrando así que los paneles estuvieran lo más limpios posible para observar el comportamiento de estos bajo condiciones similares.

A partir de los datos de producción de energía fotovoltaica generada del Cuadro 8.2, se cuantificó que el sistema de módulos solares ha generado un total de 2, 394,342.54 Wh, es decir 2.39 MWh de energía desde Agosto de 2010 hasta Diciembre de 2012.

De acuerdo con Agencia Internacional de Energía (IEA), el promedio de emisión de CO<sub>2</sub> por kWh de energía eléctrica generada a partir del consumo de gas natural en los últimos 9 años en México fue de 427 kg/MWh. En contraste de acuerdo con la producción de energía eléctrica de los paneles fotovoltaicos se ha dejado de emitir a la atmósfera 1,022.38 kg de CO<sub>2</sub>. Según la Environmental Protection Agency (EPA) de los U. S. Por cada galón de gasolina (3.78 lts.), se emiten 8.92 kg de CO<sub>2</sub>, por lo que es equivalente a 433.87 litros de gasolina la generación obtenida de los paneles fotovoltaicos<sup>22</sup>.

## **8.2. Cálculo de eficiencia de conversión energética**

A partir de los datos obtenidos, la eficiencia de conversión energética de los paneles fotovoltaicos llegó a 15.5 y 15.2% para los meses de Julio y Octubre respectivamente, que representa el 25.7 y 23.2% más que el promedio anual calculado. Por lo que se puede decir que esta es la eficiencia que se pierde en cada módulo por acción del polvo y temperatura principalmente, ya que fue en estos meses donde se realizó la limpieza de los módulos de

---

<sup>22</sup> U.S. Environmental protection Agency. [www.epa.gov](http://www.epa.gov) consultado el 10 de Dic. de 2012.

manera continua (cada 3 días), que se logró mantenerlos limpio la mayor cantidad de horas de funcionamiento.

Se tiene el rango de variación de la eficiencia de conversión energética con respecto al polvo pero se sabe que la temperatura también ejerce una importante disminución de esta eficiencia por el calentamiento de las células de silicio. Se considera el dato dado por el fabricante llamado Coeficiente de Potencia Respecto a la Temperatura, lo cual como su nombre lo indica, es la variación de la potencia respecto a cada grado °C de temperatura en el celda. Para los módulos de prueba este dato tiene un valor aproximado de 0.45%/°C. De acuerdo con las condiciones estándares de medición la temperatura de la celda solar debe ser de 25 °C para obtener el óptimo funcionamiento del sistema, pero si este valor incrementa la célula perderá una cierta eficiencia por cada grado de incremento en la temperatura igual al Coeficiente de Potencia Respecto a la Temperatura. Por lo que una vez conocida la temperatura se puede estimar la pérdida en la potencia originada por la temperatura.

Esta producción es la generación bruta obtenida por los 4 módulos, pero aún no se han considerado las pérdidas por cableado, batería e inversor de corriente. Para ello se toman los siguientes valores teóricos.

**Cuadro 8.4.** Factores de pérdida para una instalación fotovoltaica.

<b>Factor de pérdidas PV Watts</b>				
<b>Variable</b>	<b>Default</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Utilizado</b>
Especificaciones en CD de los módulos	0.95	0.80	1.050	0.98
Inversor y transformador	0.92	0.88	0.980	0.95
Controlador de carga				0.95
Baterías				0.85
Diferencias entre módulos	0.98	0.97	0.995	0.98
Diodos y conexiones	0.99	0.99	0.997	0.99
Cableado de CD	0.98	0.97	0.990	0.98
Cableado de CA	0.99	0.98	0.993	0.98
Ensuciamiento	0.95	0.30	0.995	1.00
Disponibilidad del sistema	0.98	0.00	0.995	1.00
Incidencia de sombras	1.00	0.00	1.000	1.00
Seguidor de sol	1.00	0.95	1.000	1.00
Envejecimiento	1.00	0.70	1.000	1.00
<b>Total</b>	<b>0.77</b>			<b>0.70</b>

Fuente: Fest, 2012.

También se debe considerar el funcionamiento promedio de la celda de los módulos fotovoltaicos a la temperatura ambiente de operación, para ello se calcula con las siguientes ecuaciones.

Voltaje a temperatura promedio de las celdas en operación ( $V_{tpc}$ )

$$V_{tpc} = V_{mp} \times [1 + (T_{prom} + 30^{\circ}\text{C} - T_{stc}) \times C_{tv}] \quad (8.2)$$

Donde:

$V_{mp}$ = Voltaje a máxima potencia

$T_{prom}$ = Temperatura Promedio

$T_{stc}$ = Temperatura Estándar de Medición,  $25^{\circ}\text{C}$ .

$C_{tv}$ = Coeficiente de temperatura de voltaje

Corriente a temperatura promedio de las celdas en operación ( $I_{tpc}$ )

$$I_{tpc} = I_{mp} \times [1 + (T_{prom} + 30^{\circ}\text{C} - T_{stc}) \times C_{ti}] \quad (8.3)$$

Donde:

$I_{mp}$ = Voltaje a máxima potencia

$T_{prom}$ = Temperatura Promedio

$T_{stc}$ = Temperatura Estándar de Medición,  $25^{\circ}\text{C}$ .

$C_{ti}$ = Coeficiente de temperatura de corriente

Potencia a temperatura promedio de las celdas ( $P_{prom}$ ):

$$P_{prom} = V_{tpc} \times I_{tpc} \quad (8.4)$$

Por lo que ante estas condiciones los paneles funcionan teóricamente a un 94.5% de su potencia pico.

Una vez obtenidos estos datos se calcula la eficiencia global del sistema fotovoltaico considerando como 1 el valor del factor por inclinación de los módulos y el factor por

orientación. Por lo que la eficiencia global del sistema fotovoltaico aislado se obtiene como sigue:

**Eficiencia del Sistema** = Factor de Perdidas x Eficiencia de paneles a temperatura Promedio x Factor por inclinación de los módulos x Factor de orientación.

Sustituyendo valores tenemos:

**Eficiencia del Sistema:  $(0.70 \times 0.945 \times 1.00 \times 1.00) \times 100 = 66 \%$**

Con este valor ahora se puede obtener el valor real de la energía disponible a la salida del inversor, para lo cual se hizo para el mes con mayor producción:

Mes de Abril:

A la salida del inversor =  $784.45 \text{ Wh/día} \times 4 \times 0.66 = \mathbf{2,070.95 \text{ Wh/día}}$

Y para el mes de menor radiación, Febrero:

A la salida del inversor =  $612.24 \text{ Wh/día} \times 4 \times 0.66 = \mathbf{1,616.31 \text{ Wh/día.}}$

El resultado final se muestra en el cuadro 8.5.

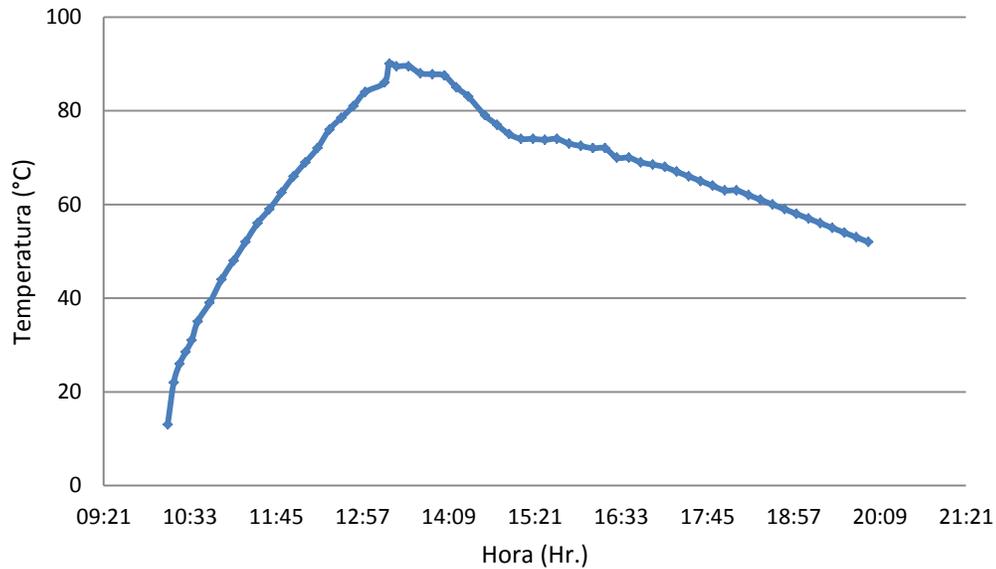
**Cuadro 8.5.** Promedio mensual de generación de energía eléctrica fotovoltaica para el sistema fotovoltaico y potencia a la salida del inversor.

Meses	Producción de un Módulo F. (Wh/día)	Producción del Sistema F. (Wh/día)	Potencia de Salida en el Inversor (Wh/día)
Enero	751.09	3,004.34	1,982.87
Febrero	760.00	3,040.00	2,006.40
Marzo	765.05	3,060.20	2,019.73
Abril	784.45	3,137.80	2,070.95
Mayo	780.83	3,123.31	2,061.39
Junio	674.31	2,697.22	1,780.17
Julio	668.74	2,674.96	1,765.47
Agosto	612.24	2,448.95	1,616.31
Septiembre	666.89	2,667.56	1,760.59
Octubre	715.16	2,860.66	1,888.03
Noviembre	729.14	2,916.55	1,924.92
Diciembre	685.31	2,741.23	1,809.21
<b>Promedio</b>	<b>716.10</b>	<b>2,864.40</b>	<b>1,890.50</b>

Fuente: Elaboración propia.

### 8.3. Evaluación del calentador solar

Se realizó la evaluación de un tubo al vacío del calentador solar con capacidad de 13.5 litros, con tubos que tiene 2.0 m de longitud por 0.058 m de diámetro. Se midió la temperatura del agua con un termómetro de caratula en intervalos de 10 minutos con una temperatura inicial de 13 °C.



**Figura 8.8.** Evolución de la temperatura del agua en el tubo al vacío durante el día.

Fuente: Elaboración propia.

El punto de máxima temperatura se dio a las 13:20 horas y a 90 °C obteniéndose vapor de agua que salía del tubo. Después de lograr la evaporación del agua, el vapor se mantuvo presente durante 1.5 horas mientras que el agua inició un descenso de temperatura pequeño pero gradual.

La energía total utilizada para elevar la temperatura del agua de 13 a 90 °C en un tiempo de 3 horas con 5 minutos fue de 1,208.37 Wh. La radiación recibida en ese lapso de tiempo para el área del tubo al vacío fue de 1,604.85 Wh, por lo que de acuerdo a la fórmula propuesta por Guevera, 2003.

$$\eta_g = \frac{\text{Energía Térmica Útil } (Q_u)}{\text{Energía Solar Recibida } (I_d)} \quad (8.5)$$

Sustituyendo los valores tenemos:

$$\eta_E = \frac{1,208.37 \text{ Wh}}{1,604.85 \text{ Wh}} = 75\% \quad (8.6)$$

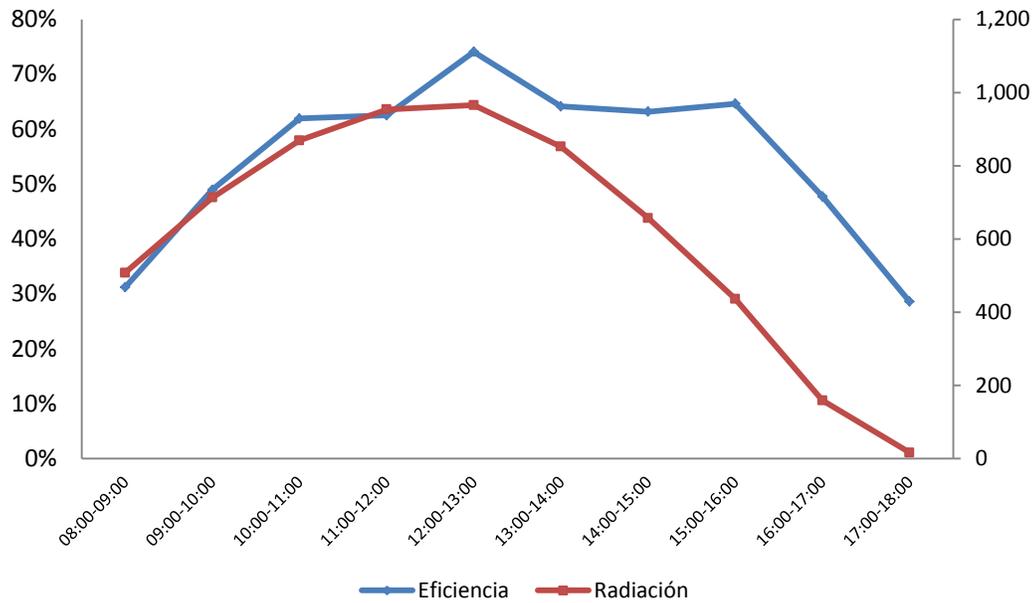
Se realizó nuevamente la medición de la temperatura pero ahora aplicado al calentador solar de 381 litros de capacidad. Este calentador cuenta con 30 tubos al vacío como el utilizado en la prueba anterior y con un termotanque para el almacenamiento del agua. Se midió la temperatura del agua en la entrada y en la salida de las líneas de conducción. De igual forma se tomaron los datos de radiación del lugar y del mismo día de la prueba para obtener la eficiencia de conversión energética del calentador solar obteniéndose los siguientes datos.

**Cuadro 8.6.** Eficiencia energética del calentador solar.

Horario	Energía Recibida (Wh/m <sup>2</sup> )	Corrección por Inclinación (Wh/m <sup>2</sup> )	Energía Acumulada (Wh/m <sup>2</sup> )	Temperatura Entrada (°C)	Temperatura Salida (°C)	Energía Extraída (Wh/colector)	Eficiencia (%)
08:00-09:00	781.9	815.5	815.5	13.0	15.0	885.8	31%
09:00-10:00	713.1	743.8	1,559.3	15.0	21.0	2,657.4	49%
10:00-11:00	869.0	906.4	2,465.7	18.0	30.0	5,314.7	62%
11:00-12:00	953.9	994.9	3,460.6	19.0	36.0	7,529.2	63%
12:00-13:00	965.6	1,007.1	4,467.7	18.0	44.0	11,515.3	74%
13:00-14:00	852.0	888.6	5,356.3	18.0	45.0	11,958.1	64%
14:00-15:00	657.0	685.2	6,041.5	19.0	49.0	13,286.8	63%
15:00-16:00	436.4	455.1	6,496.7	18.0	51.0	14,615.5	65%
16:00-17:00	159.0	165.8	6,662.5	17.0	42.0	11,072.4	48%
17:00-18:00	16.5	17.2	6,679.6	16.0	31.0	6,643.4	29%

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver en el cuadro anterior, la eficiencia máxima obtenida fue de 74%, lo cual difiere de la eficiencia obtenida para un tubo al vacío, esto se debe principalmente a las pérdidas de calor ocasionadas por la temperatura del exterior sobre las líneas de conducción. Como era de esperar, los todos los calentadores solares muestran una mayor efectividad cuando no hay mucha diferencia entre la temperatura del calentador y el ambiente debido a que las pérdidas del colector son mayores cuando hace frío en el exterior (Bérriz, 2008).



**Figura 8.9.** Comportamiento de la eficiencia del calentador solar vs radiación solar.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la figura anterior, el punto de máxima eficiencia concuerda con el punto de máxima radiación durante el día. Si el agua no se utiliza durante todo el día se puede llegar al punto de ebullición y generar vapor a tal grado de dejar sin agua al calentador solar, lo cual no es recomendable.

#### 8.4. Evaluación de la energía eólica generada

En lo que respecta a la generación de energía eólica, se realizó también la medición y captura de datos de producción aunque estos fueron insuficientes para realizar un análisis completo del comportamiento del aerogenerador. Las velocidades de viento a 2, 4 y 6 m son insuficientes, incluso para que se inicie el funcionamiento del aerogenerador (ver Cuadro 5.1) y los vientos de mayor velocidad se presentaban en forma de ráfagas lo cual ocasionaba el paro automático del aerogenerador para evitar daños en el mismo. Aunado a lo anterior, la altura a la que está instalado el aerogenerador es insuficiente (4 m) ya que como mínimo debe de estar a 10 metros sobre el nivel del suelo y libre de estructuras o arboles en su alrededor

que impidan el libre flujo del viento para poder aprovechar lo más posible la fuerza de giro que el aire origina en el generador eólico.

Por lo que para conocer de forma teórica el funcionamiento del generador eólico se realizó una simulación del comportamiento de este con ayuda del programa RETScreen disponible en la red ([http://www.retscreen.net/ang/d\\_data\\_w.php](http://www.retscreen.net/ang/d_data_w.php)).

Se alimentó al programa con datos de velocidad de viento mensuales a 10 y 20 m de altura tomados de la estación meteorológica de la ciudad de México así como la capacidad de generación del aerogenerador.



Figura 8.10. Datos iniciales de simulación con el Software RETScreen.

Los datos que arrojados por el software son los siguientes:

**Cuadro 8.7.** Generación de energía eléctrica a diferentes alturas.

Método de evaluación de los recursos	Velocidad del Viento a 10 m.	Electricidad entregada a la carga a 10 m.	Velocidad del Viento a 20 m.	Electricidad entregada a la carga a 20 m.
Mes	m/s	MWh	m/s	MWh
Enero	2.5	0.00	6.0	0.03
Febrero	2.6	0.00	6.0	0.03
Marzo	2.6	0.00	6.0	0.03
Abril	3.0	0.03	5.0	0.03
Mayo	3.0	0.03	5.0	0.03
Junio	3.1	0.03	4.0	0.03
Julio	2.6	0.00	4.0	0.03
Agosto	2.4	0.00	4.0	0.03
Setiembre	2.6	0.00	5.0	0.03
Octubre	2.4	0.00	5.0	0.03
Noviembre	2.1	0.00	6.0	0.03
Diciembre	2.0	0.00	6.0	0.03
<b>Anual</b>	<b>2.6</b>	<b>0.09</b>	<b>5.2</b>	<b>0.37</b>

Fuente: Elaboración propia con ayuda del programa RETScreen.

De acuerdo con el cuadro anterior se puede apreciar que entre mayor altura sobre el nivel del suelo se ubique el aerogenerador mayor será la velocidad de viento y mayor será la generación de electricidad obtenida. Como ya se comentó anteriormente, lamentablemente la empresa que suministró el equipo no recomendó adquirir un poste o torre más elevada (con altura mínima de 10 m) para que el equipo pudiera funcionar.

### 8.5. Consumo energético para una vivienda rural

Se consideraron estos elementos básicos que son los que con mayor frecuencia se encuentran en una vivienda rural y son los de primera necesidad. Se ajustó la cantidad de focos y bomba de acuerdo a la potencia de un solo módulo fotovoltaico (en la unidad de traspatio se tienen 4 módulos instalados). En el Cuadro 8.8 se muestran algunos aparatos electrodomésticos más comunes que se pueden encontrar dentro de una vivienda.

**Cuadro 8.8.** Consumo energético de algunos aparatos electrodomésticos.

<b>Electrodoméstico</b>	<b>Consumo (Wh)</b>
Radio reloj	3
Transmisor inalámbrico WiFi casero	20
Foco ahorrador	25
Teléfono inalámbrico base	30
Microcomponente estéreo	40
Ventilador de techo	40
Computadora Laptop	65
Refrigerador 20 pies cúbicos	91
Impresora inyección de tinta	100
TV color LCD 32"	135
Computadora de escritorio	140
Licuada	300
Bomba de agua ½ hp	373
Plancha	1,000
Microondas casero	1,100

Fuente: Fest, 2012.

Se aprovechó la energía generada para sustituir la energía eléctrica de la red y hacer funcionar a los aparatos electrónicos como computadoras, impresoras, escáneres y luminarias instalados en la casa de prueba que se encuentra en la misma ubicación que el sistema híbrido.

De acuerdo con los datos del Cuadro 8.2 se puede ver que en un día de producción un módulo fotovoltaico genera entre 603.9 a 796.8 Wh/día. Considerando la eficiencia de conversión energética de 66% calculado en el apartado 8.2, se obtiene que la producción real en la salida del inversor es de 398.6 a 525.9 Wh/día. Por lo que bastaría con un solo módulo fotovoltaico para solventar la energía que requiere una vivienda rural que posee 3 focos y una bomba de agua de medio caballo de potencia (Cuadro 4.1). Esta energía generada sería almacenada en 2 baterías de 12 volts con capacidad de 104 Ah cada una y se tendrían 2 días de autonomía. Este cálculo se hizo con base a las características de los componentes que posee el sistema fotovoltaico con el que cuenta la unidad de traspatio.

## 9. CONCLUSIONES

Se evaluó el funcionamiento de un sistema fotovoltaico obteniéndose como conclusión que la zona del Colegio de Postgraduados se encuentra enormemente beneficiada por la radiación solar que por consiguiente es altamente recomendable establecer un proyecto de módulos fotovoltaicos para suministrar energía limpia para el consumo del Campus Montecillo. En la radiación solar se presenta una diferencia promedio entre bases de datos, del Colegio de Postgraduados y la Surface Meteorology and Solar Energy de la NASA, de un 3.28%, por lo que se considera que los datos obtenidos de la pagina de la NASA son muy confiables para ser considerados en trabajos futuros donde no se tengan estaciones meteorológicas cercanas al área de interés.

El funcionamiento de un sistema fotovoltaico es funcional por la radiación solar disponible en el Colegio de Postgraduados, por lo que recomienda establecer proyectos de módulos fotovoltaicos para suministrar energía limpia para el consumo del Campus Montecillo.

Al compara la información disponible de radiación solar del Colegio de Postgraduados con la que brinda la NASA, se presenta una diferencia del 3.28% en promedio entre ambas bases de datos, por lo que se considera que los datos obtenidos de la pagina de la NASA son muy confiables, como un apoyó en lugares donde no se disponga de dicha información meteorológica.

Al analizar el comportamiento de los módulos fotovoltaicos y el cálculo del consumo energético para una vivienda rural, se encontró que tan sólo uno de estos y dos baterías son capaces de solucionar el problema de iluminación y consumo de agua para una familia rural pequeña donde no cuenten con la cobertura de energía eléctrica de la Comisión Federal de Electricidad.

En lo que respecta al calentador se encontró que es cuenta con una alta eficiencia de conversión energética (74%) por lo que es una tecnología muy recomendada para que se

utilice en los sectores donde se requiera agua caliente como lo es en la cuestión doméstica, agroindustrial, albercas y laboratorios, entre otros.

El aerogenerador que se ubica ubicado en el área de traspatio se encuentra instalado a una altura insuficiente para generar energía eléctrica de manera funcional aunado que se presenta velocidades de viento bajos y en ocasiones se presentan ráfagas por lo que el generador eólico frena su funcionamiento por seguridad estructural, por lo tanto no fue una opción viable.

Se instalaron lámparas con tecnología LED para aprovechar la energía producida por el sistema híbrido de generación de energía alternativa. Estas luminarias mostraron una funcionalidad excelente con la energía que se les suministró por medio de las baterías de respaldo.

## 10. RECOMENDACIONES

Para el sistema fotovoltaico se recomienda convertir el sistema autónomo a un sistema interconectado a la red de CFE. Por dos razones: aprovechar de manera más eficiente la generación de energía obtenido de los módulos debido a que por medio de un sistema interconectado a la red toda la energía generada se inyectaría directamente a la red y a los puntos de consumo más cercanos y no a las baterías de respaldo que dejan de almacenar energía cuando se saturan; así los módulos fotovoltaicos funcionarían de manera continua y sin interrupciones de almacenamiento; la segunda razón es la vida útil corta (tres años), dado que las que se tienen instaladas están en su límite, por lo que se tendría que remplazar, lo que implica un costo relativamente alto por la cantidad, tipo de baterías. El uso de baterías solo se recomienda para usuarios rurales aislados que no tienen acceso a las redes de distribución de la CFE.

En lo que respecta al aerogenerador, se recomienda realizar una extensión para incrementar la altura del generador eólico, e incluso un cambio de ubicación, en una zona con menores obstáculos como son árboles, edificios e invernaderos.

El agua caliente obtenida del calentador solar se puede aprovechar de igual manera para mantener un equilibrio en el agua que se usa para el cultivo de peces del área de traspatio. La capacidad del sistema está calculada para uso doméstico de una familia de 8 integrantes por lo que se puede ampliar su uso.

Así mismo se recomienda instalar calentadores solares en los edificios del Campus donde se requiera la utilización de agua caliente.

## 11. BIBLIOGRAFÍA

- Agredano D., J.; Munguía G.; Huacuz V., J. y Flores H., R. 1998. *Especificación Técnica para Sistemas Fotovoltaicos de Iluminación Doméstica Rural*. Área de Energía Solar, Departamento de Fuentes No Convencionales de Energía Instituto de Investigaciones Eléctricas. Cuernavaca, México, pp. 1-39.
- Aguilera, Jorge y Hontoria, Leocadio. *Dimensionado de Sistemas Fotovoltaicos Autónomos*. Universidad de Jaén y Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), pp. 8-14.
- ANES, 2007. *Las Energías Renovables en México. Potencial, Retos y Oportunidades*. Asociación Nacional de Energía Solar, A.C. México, pp. 3-7.
- Ángeles Ordóñez, Gonzalo. 2009. *Conservación Ambiental y Desarrollo Rural al Aplicarse Tecnología Fotovoltaica. Estudio de Caso en Tapanatepec, Oaxaca*. Instituto Politécnico Nacional, pp. 178-184.
- Becerra López, Humberto R.. 2011. *Energía Solar Fotovoltaica. Primer Seminario de Energías Renovables*. Instituto de Investigaciones Eléctricas. Cuernavaca, México, pp. 6-76.
- Bérriz Pérez, Luis y Álvarez González, Manuel. 2008. *Manual Para el Cálculo y Diseño de Calentadores Solares*. Editorial Cubasolar. La Habana, Cuba, pp. 76-84.
- Casas Villar del Saz, Fátima; López Álvarez, Eva y Marzal Cebrian, Silvia. 2010. *Plan de Negocio: Planta Solar Fotovoltaica*. Universidad Autónoma de Barcelona, España, pp. 10-11.
- Collado Fernández, Eduardo. 2009. *Energía Solar Fotovoltaica, Competitividad y Evaluación Económica, Comparativa y Modelos*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Nacional de Educación a Distancia, pp. 59-100.

- CONEVAL, 2010. *Carencia en el Acceso a los Servicios Básicos en la Vivienda*. Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social. México, 8 p.
- Cory, Karlynn y Schwabe, Paul. 2009. *Wind Levelized Cost of Energy: A Comparison of Technical and Financing Input Variables*. Technical Report NREL/TP-6A2-46671. National Renewable Energy Laboratory, 25 p.
- Coviello, Manlio F. 2010. *Energías Renovables en América Latina y el Caribe: Buenas y Malas Noticias*. Unidad Energías y Recursos Naturales (CEPAL), Naciones Unidas, pp. 29-44.
- Cuesta Santianes, María José; Pérez Martínez, Marta y Cabrera Jiménez, Juan Antonio. 2008. *Aerogeneradores de Potencia Inferior a 100 kW*. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT). España, pp. 10-20.
- CENSOLAR. 2003. *Curso de Instalaciones de Energía Solar*. Centro de Estudios de Energía Solar (CENSOLAR). Promotora General de Estudios S. A. Sevilla, España PROGENSA. Tomo 2, Sección 2.1.4. p. 25. y Tomo 5, Sección 5.2.1. .
- Egido, Miguel A. y Camino, María. 2008. *Guía de Normas y Protocolos Técnicos para la Electrificación Rural con Energías Renovables*. Proyecto: DOSBE, EIE-O6-255 COOPENER. Instituto de Energía Solar/Universidad Politécnica de Madrid, pp. 26-28.
- EREN, 2004. *Energía Solar Fotovoltaica, Manual del Instalador*. Ente Regional de la Energía de Castilla y León. España, pp. 41-48.
- Escudero López, José María y Bornay, Juan de Dios. 2004. *Manual de Energía Eólica. Investigación, Diseño, Promoción Construcción y Explotación de Distinto Tipo de Instalaciones*. Mundi-Prensa. 471 p.
- Fernández Díez, Pedro. 2003. *Procesos Termosolares en Baja, Media y Alta Temperatura*. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. Universidad de Cantabria. España. 34 p.

- Fest, Agustín. 2012. *Curso de Energía Solar*. Impartido por Energía Solar Modular S. A. de C. V. Julio de 2012. México.
- García Murillo, Mario y Hernández Bautista, Cristóbal, 2009. *Diseño Aerodinámico y Construcción de un Álabo para un Aerogenerador de 500 Watts (W)*. Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo. 103 p.
- Guevara Vásquez, Sixto, 2003. *Diseño del Sistema de Calentamiento Solar de Agua*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Perú, pp. 3-7.
- Hocaoglu, Fatih O.; Omer N., Gerek y Kurban, Mehmet. 2009. *A Novel Hybrid (Wind–Photovoltaic) System Sizing Procedure*. Solar Energy 83 (2009) 2019–2028. Science Direct. 10 p.
- Huacuz Villamar, Jorge. 2011. *Energías Renovables para la Generación Eléctrica en México: ¿Opción Real o Moda Pasajera?*. Gerencia de Energías No Convencionales. Instituto de Investigaciones Eléctricas, pp. 16-20.
- IEA, 2011. *CO<sub>2</sub> Emissions From Fuel Combustión*. Statistics International Energy Agency. Paris, Francia, pp. 45-123.
- IEA/OECD, 2012. *Monthly Electricity Statistics*. International Energy Agency/ Organisation for Economic Co-Operation and Development International. Paris, Francia, pp. 1-2.
- INEGI, 2011. *Censos de Población y Vivienda, 1990, 2000 y 2010*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.
- Madrid Vicente, Antonio. 2009. *Curso de Energía Solar (Fotovoltaica, Térmica y Termoeléctrica)*. Mundi Prensa. 311 p.
- Mera Oña, José Guillermo. 2006. *Estudio de Sistemas Híbridos (Eólico-Solar) de Energía para Iluminación y Bombeo en la Escuela y Viviendas de la Comunidad PITIUR en el Oriente Ecuatoriano*. Ecuador. 111 p.

- Montoya Portugal, Luis Alberto; Palo Tejada, Juan Ernesto; Cabana Hanco, Wilson Ricardo y Soria Guía, Lourdes; 2011. *Evaluación de un Calentador Solar de Agua de Acuerdo a Norma Técnica Peruana*. Universidad Nacional de San Agustín. Perú. 12 p.
- NORMEX, 2006. *Norma Mexicana PROY-NMX-ES-002-NORMEX-2006*. Sociedad Mexicana de Normalización y Certificación S.C. 21 p.
- OECD/IEA, 2006. *Barriers to Technology Diffusion: The Case of Solar Thermal Technologies*. Organisation for Economic Co-Operation and Development International / International Energy Agency. Paris. 39 p.
- Ruiz Amelio, Martha. 2012. *Plática Directa y Visita al Proyecto de Energía Fotovoltaico Instalado en la Universidad Autónoma Metropolitana*. México, D. F.
- Salinas Martínez, Jesús. 2011. *Control de un Aerogenerador*. Memoria Técnica. Universidad Politécnica de Catalunya. 99 p.
- SENER, 2007. *Programa para la Promoción de Calentadores Solares de Agua en México 2007-2012 (PROCALSOL)*. Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE). Secretaría de energía. México. 82 p.
- SENER, 2011. *Balance Nacional de Energía 2010*. Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico. Secretaría de energía. México. 138 p.
- SENER, 2012a. *Balance Nacional de Energía 2011*. Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico. Secretaría de energía. México. 159 p.
- SENER, 2012b. *Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026*. Secretaría de energía. México. 156 p.
- SENER, 2012c. *Prospectivas del Sector Eléctrico 2010-2025*. Dirección General de Planeación Energética. Secretaría de Energía. México. 227 p.

## Páginas Web

Actitud Sustentable. <http://www.actitudsustentable.com/> 8 de Febrero de 2012.

AMDEE, 2012. *Noticias Febrero 2012*. Asociación Mexicana de Energía Eólica A.C. <http://www.amdee.org/announcements/mexico-windpower-2012-potenciara-la-expansion-del-mercado-de-energia-eolica-en-el-pais>. Febrero de 2012.

AWEA, 2011. American Wind Energy Association. <http://www.awea.org>. Diciembre de 2011.

CFE, 2012. Comisión Federal de Electricidad. <http://www.cfe.gob.mx/paginas/home.aspx>. Consultado Enero de 2012.

EPA, 2012. United States Environmental Protection Agency. <http://www.epa.gov/cleanenergy/energy-resources/refs.html>. Consultado el 10 de Diciembre de 2012.

EPIA, 2011. *Market Report 2011*. European Photovoltaic Industry Association. <http://www.epia.org/> consultado el 8 de Febrero de 2012.

Fried, Lauha. 2011. *Global Wind Statistics 2011*. Bruselas, Bélgica. [www.gwec.net](http://www.gwec.net). Diciembre de 2011.

GWEC, 2012. *Global Wind Statistics, 2011*. Global Wind Energy Council. <http://www.energiasolarmodular.com>. Diciembre de 2011.

NASA, 2012. Atmospheric Science Data Center. Surface Meteorology and Solar Energy. <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen/>. Enero de 2012.

PVS in Bloom. 2012. *Grupo de Investigación y Desarrollo en Energía Solar y Automática (IDEA)*. Universidad de Jaén, España. <http://www.ujaen.es/investiga/solar/> consultado 06 de Febrero de 2012.

Revista EstePaís, 2012. *El sector energético en México: Cinco temas clave*. Edición Abril 2012. [www.estepais.com](http://www.estepais.com).

Rodríguez, P. Javier. [www.medioambiente.gov.ar/documentos/](http://www.medioambiente.gov.ar/documentos/) consultado el 26 de Noviembre de 2012.

SENER, 2013. Subsecretaría de Electricidad de la Secretaría de Energía, <http://www.sener.gob.mx/portal/Mobil.aspx?id=1430> consultado en Enero de 2013.

## 12.ANEXOS

### ANEXO A

#### Glosario de Términos y Definiciones

- **Viento**

Movimiento del aire respecto a la superficie de la tierra en una dirección y velocidad determinadas. Las direcciones se toman donde viene o precede el viento, las velocidades en metros por segundo.

- **Amperio**

Amperio o ampere (símbolo  $A$ ), es la unidad de intensidad de corriente eléctrica. Las corrientes eléctricas también son el tiempo promedio de cambio o desplazamiento de cargas eléctricas. Un amperio representa el promedio de un culombio de carga por segundo.

$$1A = 1 \frac{C}{s}$$

Donde:

$A$  = Intensidad de corriente;

$C$  = unidad de carga eléctrica *culombio* que corresponde a  $6.241\ 509 \times 10^{18}$  electrones;

$s$  = segundo.

Su fórmula es:

$$I = \frac{Q}{t}$$

Para poder comprender mejor este término es conveniente establecer una analogía con un sistema hidráulico donde la corriente es una medida del volumen de agua que fluye a través de un determinado punto, la tasa de ésta está determinada por la tensión y la potencia total se mide en watts (también llamado vatios).

- **Voltio**

Voltio o volt (símbolo  $V$ ), es la unidad derivada del SI para el potencial eléctrico, fuerza electromotriz y el voltaje. Recibe su nombre en honor de Alessandro Volta.

El voltio puede ser definido como la diferencia de potencial existente entre dos puntos tales que hay que realizar un trabajo de 1 julio para trasladar del uno al otro la carga de 1 culombio:

$$V = \frac{W}{A} = \frac{J}{C} = \frac{N * m}{A * s} = \frac{kg * m^2}{A * s^3} = \frac{N * m}{C} = \frac{kg * m^2}{C * s^2}$$

Siguiendo con la misma analogía de la hidráulica donde se compara un circuito eléctrico con el flujo de agua en las tuberías, el voltaje se asemeja a la presión del agua ya que, en los fluidos, esta presión es la que determina la rapidez de los fluidos; semejante a los electrones en el circuito eléctrico.

Para generar 1V se necesitan 0.9999999844 electrones.

**Cuadro A1.** Tipos de tensión para diferentes voltajes.

Baja tensión	0 a 1,000 Voltios
Mediana Tensión	1,000 Voltios a 69 kV (69,000 Voltios)
Alta Tensión	69 kV y hasta 400 kV

Fuente: CFE, 2012.

- **Watt**

Watt o Vatio (símbolo  $W$ ), es la unidad de potencia del Sistema Internacional de Unidades.

Es el equivalente a 1 julio sobre segundo (1 J/s) y es una de las unidades derivadas. Expresado en unidades utilizadas en electricidad, un vatio es la potencia eléctrica producida por una diferencia de potencial de 1 voltio y una corriente eléctrica de 1 amperio (1 Voltio-Amperio).

$$W = \frac{J}{s} = \frac{N * m}{s} = \frac{kg * m^2}{s^3}$$

**Cuadro A2.** Múltiplos del Sistema Internacional para Watt (W).

Submúltiplos			Múltiplos		
Valor	Símbolo	Nombre	Valor	Símbolo	Nombre
$10^{-1}$ W	dW	decivatio	$10^1$ W	daW	decaatio
$10^{-2}$ W	cW	centivatio	$10^2$ W	hW	hectovatio
$10^{-3}$ W	mW	millivatio	$10^3$ W	kW	kilovatio
$10^{-6}$ W	$\mu$ W	microvatio	$10^6$ W	MW	megavatio
$10^{-9}$ W	nW	nanovatio	$10^9$ W	GW	gigavatio
$10^{-12}$ W	pW	picovatio	$10^{12}$ W	TW	teravatio
$10^{-15}$ W	fW	femtovatio	$10^{15}$ W	PW	petavatio
$10^{-18}$ W	aW	atovatio	$10^{18}$ W	EW	exavatio
$10^{-21}$ W	zW	zeptovatio	$10^{21}$ W	ZW	zettavatio
$10^{-24}$ W	yW	yoctovatio	$10^{24}$ W	YW	yottavatio

Fuente: es.wikipedia.org, 2012.

- **Julio**

Julio o joule (símbolo  $J$ ) es la unidad derivada del Sistema Internacional utilizada para medir energía, trabajo y calor.

El trabajo necesario para mover una carga eléctrica de un culombio a través de una tensión (diferencia de potencial) de un voltio. Es decir, un voltio por culombio ( $C \cdot V$ ). Esta relación puede ser utilizada, a su vez, para definir la unidad voltio.

$$1J = 1N \cdot m = (kg \cdot m/s^2) m = (kg \cdot m^2)/s^2$$

Un julio equivale a:

- 1 N•m (newton metro)
- 1 W•s (vatio segundo)
- $6,2415 \times 10^{18}$  eV (eV)
- 1 C•V (culombio voltio)
- 0,00987 atm•L (atmósfera litro)
- 1 Pa•m<sup>3</sup> (Pascal metro)
- 0,238902957 cal (calorías)

Un petajoule ( $10^{15}$  Joules) es una unidad de medida de calor y energía que se utiliza para cuantificar grandes cantidades de energía. Equivale a poco más de 277 millones de kilowatts hora (kWh) (Revista *EstePaís*, 2012).

Un Joule también tiene las siguientes equivalencias prácticas aproximadas:

- ✓ Una unidad de energía eléctrica igual al trabajo realizado cuando una corriente de un amperio se pasa a través de una resistencia de un ohmio durante un segundo.
- ✓ La energía necesaria para levantar una manzana pequeña (102 g) un metro contra la gravedad de la Tierra.
- ✓ Energía liberada cuando la misma manzana cae un metro hacia el suelo.
- ✓ La cantidad de energía, como calor, que una persona tranquila produce cada centésima de segundo.

## Unidades de Medida de la Radiación

Las unidades que se utilizan son muy variadas según los objetivos que se quieran conseguir, aquí nos vamos a limitar a poner los conceptos básicos:

- En forma de energía, es decir la capacidad para realizar un trabajo:

En el Sistema Internacional la unidad es el julio (*J*). En termometría las unidades más habituales son:

La caloría (*cal*), es la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de un gramo de agua en 1°C.

$$1 \text{ cal} = 4.1868 \text{ J}$$

$$1 \text{ kcal} = 1,000 \text{ cal}$$

La Btu, la British Thermal Unit, es la cantidad de calor necesario para elevar la temperatura de una libra de agua 1°F.

$$1 \text{ Btu} = 1\,055.06 \text{ J}$$

- En forma de flujo energético, es decir energía utilizada por unidad de tiempo: el Watt (*W*), Btu/hora y kcal/hora.

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$$

$$1 \text{ Btu/h} = 0.293 \text{ W}$$

$$1 \text{ kcal/h} = 1.163 \text{ W}$$

- En forma de intensidad o densidad de flujo energético, cuando además del tiempo se tiene en cuenta la superficie. En el Sistema Internacional se mide en  $\text{W/m}^2$ .

$$1 \text{ J/m}^2 \cdot \text{hora} = 277.77 \cdot 10^{-6} \text{ W/m}^2$$

$$1 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{hora} = 11.63 \text{ W/m}^2$$

En Climatología se utiliza con frecuencia el Langley ( $L_y$ ) por día u hora:

$$1 \text{ ly/d} = 1 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{d} = 0.4858 \text{ W/m}^2$$

$$1 \text{ ly/h} = 1 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{h} = 11.63 \text{ W/m}^2$$

Una unidad práctica es el kilovatio-hora por metro cuadrado:

$$1 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} = 86.4 L_y$$

<http://es.wikipedia.org/wiki/Langley> consultado el 23/01/2012

- **Wh**

El Watt-hora, simbolizado Wh (o a veces también  $W \cdot h$  o  $W-h$ ), es una unidad de energía expresada en forma de unidades de *potencia*  $\times$  *tiempo*, con lo que se da a entender que la cantidad de energía de la que se habla es capaz de producir y sustentar una cierta potencia durante un determinado tiempo. Así, un Watt-hora es la energía necesaria para mantener una potencia constante de un Watt (1 W) durante una hora, y equivale a 3600 julios. Más frecuentemente usados son sus múltiplos kilowatt-hora y megawatt-hora, de símbolos kWh y MWh respectivamente.

El kilowatt-hora, equivalente a mil Watts-hora, se usa generalmente para la facturación del consumo eléctrico domiciliario, dado que es más fácil de manejar que la unidad de energía del Sistema Internacional, el julio ( $J$ ). Como esta última es una unidad comparativamente muy pequeña (un julio apenas puede sustentar un Watt durante un segundo) su uso obligaría a emplear cifras demasiado grandes. El megawatt-hora, igual a un millón de Wh, suele emplearse para medir el consumo de grandes plantas industriales o de conglomerados urbanos.

Múltiplos aún más grandes como el Gigawatt-hora (GWh), el Terawatt-hora (TWh) o el kilowatt-año, son utilizados para informar las energías producidas por las centrales eléctricas durante un cierto período. Por otra parte, el Watt-segundo (simbolizado Ws, o a veces  $W \cdot s$ ), que no es otra cosa más que una forma alternativa de llamar al propio julio, es una unidad

habitual para referir las energías involucradas en fenómenos de corta duración como los destellos de un flash fotográfico.

Cuando una cierta cantidad de energía se expresa mediante la combinación de una unidad de potencia y una de tiempo, puede ser interpretada conceptualmente de dos formas diferentes, aunque cuantitativamente equivalentes. Por ejemplo, si hablamos de 100 Watts-hora podemos entender indistintamente que se trata de la energía necesaria para mantener encendida un foco de 100 W durante una hora, o bien una pequeña luz de apenas 1 W durante 100 horas.

En otras palabras, el saber que se dispone de una energía de 100 Wh no nos dice nada acerca de en cuánto tiempo ha de ser consumida esa energía. Podríamos usarla tanto para encender la lámpara de 100 W durante una hora como para hacer funcionar una poderosa máquina de cientos de kW durante unos pocos segundos, producir una violenta descarga de varios millones de vatios durante unos milisegundos, o mantener activo por años un microcircuito cuyo consumo sea de apenas unos microwatts.

Un watt es igual a un julio por cada segundo y un kW es igual a 1,000 W; por lo tanto, el kilowatt-hora será:

$$1 kWh = \frac{1,000 J}{1 s} * 3,600 s = 3,600,000 J$$

Además:

$$1 kWh = \frac{238.8459 cal}{1 s} * 3,600 s = 859,845.2 cal = 859.8452 kcal$$

Algunos múltiplos son:

- el megawatt-hora (MWh) = 1,000 kWh
- el megawatt-año = 365 × 24 × 1,000 kWh
- el gigawatt-hora (× 1,000,000 kWh)
- el terawatt-hora (× 1,000,000,000 kWh) y sus múltiplos anuales (×365×24).

1 kWh  $\approx$  3,412 BTU  $\approx$  a la energía térmica producida por 0.1 Nm<sup>3</sup> (metro cúbico en condiciones normales) de gas natural.

Los aparatos eléctricos cuando están funcionando generan un consumo de energía eléctrica en función de la potencia que tengan y del tiempo que estén en funcionamiento.

- **Hora-Pico**

A el total de energía recibida diariamente, por unidad de área, en un sitio particular, se le ha denominado Recurso Solar, este valor representa la irradiación diaria que se obtiene a partir de un promedio diario, semanal, mensual, ó anual. Las unidades usadas comúnmente para este concepto en el Sistema Internacional (SI) , son los Joules sobre metro cuadrado [J/m<sup>2</sup>]. También es frecuente encontrarlas en otros sistemas de unidades como se muestra en el siguiente Cuadro C:

**Cuadro A3.** Unidades frecuentemente utilizadas para la determinación del recurso solar.

<b>Unidad</b>	<b>Equivalencia (SI)</b>
MJ/m <sup>2</sup>	1 x 10 <sup>6</sup> J/m <sup>2</sup>
kWh/m <sup>2</sup>	3.6 x 10 <sup>6</sup> J/m <sup>2</sup>
Btu/ft <sup>2</sup>	11.356 x 10 <sup>3</sup> J/m <sup>2</sup>
Langley = 1 cal/cm <sup>2</sup>	2.4 x 10 <sup>-5</sup> J/m <sup>2</sup>

Fuente: Instituto de Geofísica de la UNAM, 2006.

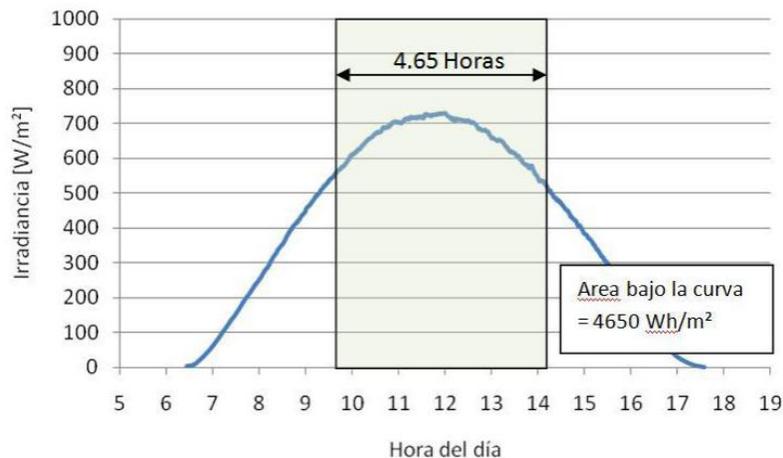
Para la aplicación del Recurso Solar en los Sistemas Fotovoltaicos, los ingenieros han tomado por convención otra unidad para especificar el recurso solar. En un día claro a nivel del mar, un captador horizontal puede recibir una irradiancia directa aproximada de 1,000 W/m<sup>2</sup> al medio día solar. Por lo anterior, se le ha llamado irradiancia-pico, al valor de 1,000 W/m<sup>2</sup>. En consecuencia, a la cantidad de irradiación recibida en un captador durante un tiempo de una hora, se ha convenido llamarla hora-pico. Así, la transformación de unidades puede escribirse de manera simple como:

1 hora-pico = 1,000 Wh/m<sup>2</sup>

La equivalencia con el SI

1 hora-pico = 3.6 x 10<sup>6</sup> J/m<sup>2</sup>

Para expresar al recurso solar en unidades de horas-pico, debe recordarse que el área bajo la curva de irradiancia contra tiempo representa la irradiación del día. Si se considera que esta área es igual al área de un rectángulo cuya altura corresponde a una irradiancia-pico de 1,000 W/m<sup>2</sup>, entonces la base de este rectángulo es el número de horas en que supuestamente el Sol debería haber brillado con esta intensidad para obtener la misma irradiación del día. Las horas-pico de un sitio determinado, se obtiene al dividir el valor de la irradiación diaria en Wh/m<sup>2</sup>, entre 1,000 W/m<sup>2</sup>. El resultado será el número de horas-pico en que el captador estuvo aparentemente recibiendo el valor pico de la irradiancia. Por ejemplo, si la irradiación diaria de un lugar específico fue de 4,650 Wh/m<sup>2</sup>, al dividir entre la irradiancia pico (1,000 W/m<sup>2</sup>), obtenemos un resultado de 4.65 horas-pico para ese lugar en ese día en particular, es decir el equivalente a una irradiancia solar de 1,000 W/m<sup>2</sup> recibida de manera continua durante 4.65 horas (4 horas y 39 minutos) (ver Figura A1).



**Figura A1.** Representación de horas-pico.

Fuente: <http://www.geofisica.unam.mx/ors/recurso.html> 2012.

- **Langley**

El Langley (Ly) es una unidad utilizada para medir la radiación solar o insolación que llega a la parte superior de la atmósfera de la Tierra o a la superficie de la Tierra en un día o en un mes:

Esta unidad recibe su nombre como homenaje a Samuel Pierpont Langley (1834-1906).

La unidad en el sistema internacional es el julio por metro cuadrado, muy pequeño para su uso:

$$1 \frac{J}{m^2} = 2.4 * 10^{-5} L_y$$

Un múltiplo es:

$$1 \frac{kJ}{m^2} = 2.4 * 10^{-2} L_y$$

$$1 L_y = 41.8 \frac{kJ}{m^2}$$

Una unidad práctica es el kilovatio-hora por metro cuadrado:

$$1 \frac{kWh}{m^2} = 86.4 L_y$$

<http://es.wikipedia.org/wiki/Langley> consultado el 23/01/2012.

## Definiciones

**Batería.** Dispositivo provisto de materiales activos que convierte directamente la energía química en energía eléctrica mediante una reacción electroquímica de reducción-oxidación. Este tipo de reacción involucra el traspaso de electrones desde un material a otro a través de un circuito eléctrico. También se denomina acumulador.

**Batería de plomo-ácido.** Categoría general que incluye las baterías formadas con placas de plomo puro, plomo-antimonio o plomo-calcio, y un electrolito ácido.

**Batería de cierre hermético.** Batería que tiene un electrolito cautivo y una tapa de ventilación recerrable. También se denomina batería hermética con regulación de válvula.

**Capacidad de batería.** Número total de ampere-horas que se puede extraer de una batería con carga completa. Véase "Capacidad nominal de batería".

**Capacidad nominal de batería.** Expresión que usan las fábricas de baterías para indicar la cantidad máxima de energía que se puede extraer de una batería a una tasa especificada. También se denomina capacidad de régimen de batería.

**Carga.** Cantidad de energía eléctrica necesaria para el funcionamiento de cualquier dispositivo o aparato eléctrico en un momento dado. También se denomina "carga" al propio dispositivo o aparato que recibe la energía.

**Celda de Silicio Amorfo.** Celda fotovoltaica fabricada con material de silicio sin estructura cristalina.

**Celda de silicio cristalino.** Celda fotovoltaica fabricada con cristales de silicio.

**Celda de silicio monocristalino.** Celda que proviene de un lingote de un solo cristal.

**Celda de silicio policristalino.** Celda que proviene de un lingote de silicio cuya estructura es policristalina.

**Celda fotovoltaica.** Dispositivo semiconductor con tratamiento químico que convierte la irradiancia solar en electricidad. También se denomina celda solar.

**Choque Eléctrico.** Se considera que existe riesgo de choque eléctrico en alguna parte si el potencial entre la parte y la tierra o cualquier otra parte accesible es mayor de 30 volts corriente directa y la corriente de fuga excede a los siguientes valores: de marcos, gabinetes, etc., 10 A; de partes de circuito, 1 mA.

**Controladores.** Terminología de uso común:

**Advertencia de bajo voltaje.** Señal luminosa o audible que indica el bajo voltaje de una batería.

**Compensación de temperatura.** Función de un circuito que ajusta los puntos o niveles de desconexión, ya sea de alto o bajo voltaje de una batería.

**Controlador de carga.** Aparato que controla el régimen y la condición de carga de las baterías. Véase "Régimen de carga".

**Desconexión de alto voltaje.** Punto o nivel de desconexión de alto voltaje de una batería para impedir su sobrecarga.

**Desconexión de bajo voltaje.** Punto o nivel de desconexión de bajo voltaje para impedir una descarga excesiva.

**Protección contra corriente en sentido inverso.** Método que impide el flujo de corriente desde la batería al conjunto fotovoltaico.

**Corriente de cortocircuito.** Corriente que se genera en una celda, módulo, o conjunto de módulos de un sistema fotovoltaico cuando se ponen en cortocircuito las terminales de salida.

**Corriente de fuga.** Corriente que una batería fuera de operación pierde en forma natural.

**Corriente de potencia máxima.** Corriente en el punto de operación de la curva I-V donde el producto corriente-voltaje es máximo. Véase "Curva I-V".

**Curva I-V.** Trazado gráfico de las características de corriente en función de voltaje de una celda, módulo, o conjunto de un sistema fotovoltaico.

**Densidad de energía.** Relación entre la capacidad energética de una batería y su volumen (expresada en Wh/litro) o su peso (en Wh/kg).

**Densidad de potencia.** Relación entre la potencia nominal disponible en una batería y su volumen (expresada en W/litro) o su peso (en W/kg).

**Descarga.** Extracción de energía eléctrica de una batería (mediante la aplicación de una carga externa, por ejemplo iluminación, radio, etc.).

**Insolación.** Radiación solar que llega a una superficie en un período de tiempo. Generalmente se expresa en kilowatt-horas por metro cuadrado. Véase también "Recurso solar".

**Módulo.** La unidad reemplazable más pequeña de un conjunto fotovoltaico. Un módulo integral encapsulado contiene una cantidad determinada de celdas fotovoltaicas.

**Profundidad de descarga.** Porcentaje de energía extraída de la batería, en relación con su capacidad energética total.

**Punto de potencia máxima.** Modo de funcionamiento de un controlador de potencia que regula continuamente una fuente de voltaje fotovoltaico para que la fuente funcione a su punto máximo de potencia.

**Recurso Solar.** Cantidad de insolación que recibe un sitio o lugar. Generalmente se mide en kilowatt-hora por metro cuadrado por día. Véase también "Insolación".

**Régimen de carga.** Velocidad con que se recarga una batería. Se expresa como una relación entre la capacidad de la batería y el flujo de la corriente. Por ejemplo, C/5.

**Régimen de descarga.** Velocidad de extracción de corriente de una batería. Se expresa como una relación entre la capacidad de la batería y el régimen de descarga de corriente. También se denomina régimen C. Véase "Régimen de carga".

**Rendimiento de conversión.** Relación entre la energía eléctrica que produce una celda fotovoltaica y la energía solar que recibe la celda.

**Semiconductor.** Dispositivo de material sólido que posee una capacidad limitada de conductividad eléctrica.

**Sistema fotovoltaico.** Instalación de módulos fotovoltaicos y otros componentes, proyectada para generar potencia eléctrica a partir de la luz del sol.

**Sistema fotovoltaico autónomo.** Es aquel que funciona sin estar conectado a la red de energía eléctrica.

**Voltaje de funcionamiento del sistema.** Voltaje de servicio o régimen de un sistema fotovoltaico.

**Voltaje de circuito abierto.** Voltaje máximo que produce una celda, módulo o conjunto fotovoltaico sin aplicación de carga.

**Voltaje de corte.** Nivel o punto de voltaje en que el controlador de carga desconecta de la batería el conjunto fotovoltaico o la carga. Véase "Controlador de carga".

## ANEXO B

### Consumo energético en el Campus Montecillo del Colegio de Postgraduados

En el Campus Montecillo, al igual que en otros campus del Colegio de Postgraduados, se tiene una demanda creciente en el uso de energía eléctrica (ver Cuadro A1).

**Cuadro B1.** Consumo mensual de energía del Campus Montecillo del Colegio de Postgraduados.

Mes	Demanda Máxima kW	Consumo Total kWh
Jun-11	486	242,800.00
Jul-11	387	215,800.00
Ago-11	403	201,000.00
Sep-11	435	220,600.00
Oct-11	454	227,400.00
Nov-11	480	238,800.00
Dic-11	510	233,600.00
Ene-12	461	247,200.00
Feb-12	491	231,600.00
Mar-12	518	240,000.00
Abr-12	538	253,800.00
May-12	527	281,800.00
Jun-12	408	263,600.00

Fuente: Comisión Federal de Electricidad (CFE), 2012.

Se puede ver que se tiene un promedio en el consumo de energía de 475,867 kWh/bimestre por lo que al mes serían 237,000 kWh.

En los últimos 3 meses el consumo de energía ha superado el nivel intermedio y se ha llegado a la categoría de energía excedente lo que representa un mayor costo por cada kWh consumido. Esta energía de punta se paga 70.4% más caro que el consumo intermedio y 103.8% mas que el base (CFE, 2012).

## Pago por concepto de energía

Las tarifas que se tienen para el consumo de energía en el colegio de Postgraduados es el siguiente:

Tarifa 1er. escalón primeros 68400 kWh/mes (Junio 2012):	1.00410	\$/kWh
Tarifa 2do. escalón siguiente hasta los 250,400 kWh/mes (Junio 2012):	1.20130	\$/kWh
Costo excedente (Junio 2012):	2.04690	\$/kWh

Por lo que el pago actual es de:

	<b>\$/Mes</b>	<b>\$/Bim</b>
Cargo 1er. escalón:	68,680.44	137,360.88
Cargo 2do. escalón:	203,660.39	407,320.79
Cargo excedente:	0.00	0.00
Cargo fijo:	0.00	0.00
Subtotal:	272,340.83	544,681.67
IVA 16%:	43,574.53	87,149.07
Total Mensual:	<b>315,915.37</b>	<b>631,830.73</b>

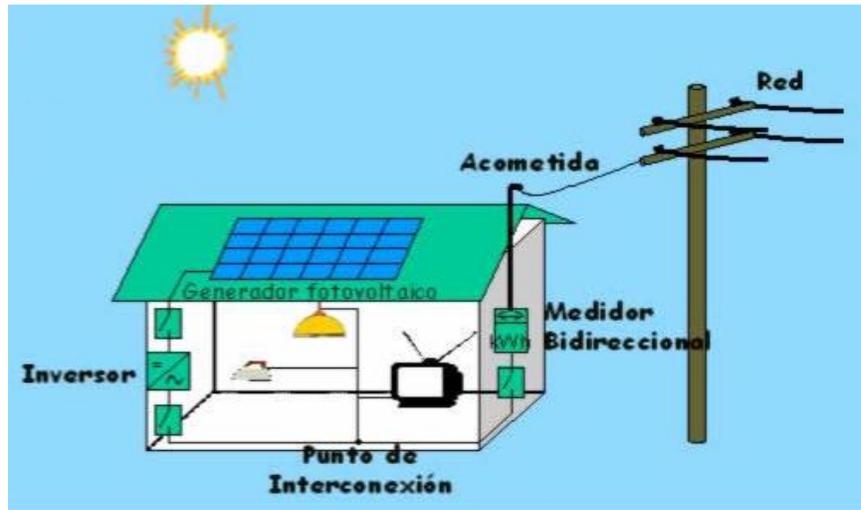
Este costo es únicamente por el concepto de energía. En los recibos de luz que emite la CFE se agregan otros cargos como el IVA, la demanda facturable y derecho de alumbrado público.

## Generación de energía requerida

Para mantener el consumo energético del Colpos ante la CFE por debajo de los 250,400 kWh mensuales sería recomendable generar 38,000 kWh al mes y “subirlos” a la red de la Comisión Federal de Electricidad.

	kWh/mes	kWh/bim
Si se reduce el consumo de:	237,933.00	475,866.00
a:	200,000.00	400,000.00
Se requiere un sistema que genere:	<b>37,933.00</b>	<b>75,866.00</b>

Por lo anterior se requiere un sistema fotovoltaico que genere el 15.9% de la energía consumida en el Colegio.



**Figura B1.** Configuración típica de un sistema fotovoltaico conectado a red.

Fuente: Instituto de Investigaciones Eléctricas.

### Cálculo del sistema fotovoltaico

Con los datos anteriores se procede a realizar el cálculo para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico que se requiere.

Energía requerida por mes:	37,933.00 kWh/mes
Energía requerida por día:	1,337.70 kWh/día
Considerando 5.4 hr de insolación/día promedio anual:	5.40 hr de insolación
1264.4 kWh/día entre 5.4 h/día:	247.8 kW
Estimando una eficiencia del sistema de:	85.5 %
Potencia requerida del sistema (234.2 kW entre 85.48 %):	289.9 kW
Potencia de los módulos que se instalarán:	230 Watts
No. de módulos = 289900 Watts entre 230 Watts:	1,260 Módulos
Potencia requerida del(los) inversor(es):	289.9 kW

### Energía generada por el sistema

Con el sistema calculado anteriormente se tendría una producción de energía igual a lo siguiente:

No. de módulos =	1,260	Piezas
Potencia de los módulos a STC =	235.00	Watts
Eficiencia del sistema =	83.70	%
Potencia efectiva del sistema =	247.72	kWatts
Generación por día =	1,337.69	KWh/día
Generación por mes =	40,130.64	KWh/mes
Generación por bimestre =	80,261.28	KWh/bim

### Nuevo pago

Por lo tanto el pago de energía sería solo por la diferencia obtenida entre el consumo y la producción:

Cargo 1er. escalón:	68,680.44
Cargo 2do. escalón:	155,451.46
Cargo excedente:	0.00
Cargo fijo:	0.00
Subtotal:	224,131.90
IVA 16%:	35,861.10
Total Mensual:	<b>259,993.00</b>
Total Bimestral:	<b>519,986.00</b>

### Ahorro con el sistema Fotovoltaico

Ya con el sistema fotovoltaico instalado se presentarían el siguiente consumo y ahorros de energía para el Colpos:

Pago anterior =	315,915.37	631,830.73	3,790,984.40
Pago actual =	259,993.00	519,986.00	3,119,915.99
<b>Ahorro =</b>	55,922.37	111,844.74	671,068.41
	<b>\$/mes</b>	<b>\$/bim</b>	<b>\$/año</b>

### **Costo del sistema fotovoltaico**

El costo total que tendría el sistema fotovoltaico sería aproximadamente de \$889,008.52 USD, IVA e instalación incluidos y se recuperaría la inversión en aproximadamente 15.4 años, considerando que la energía no varíe su precio, pero si el costo incrementa el tiempo de recuperación sería menor.

## ANEXO C

### Datos Meteorológicos

En el siguiente cuadro se muestra la comparación realizada entre las dos fuentes de datos de radiación solar. Se obtuvo una diferencia del 3.28% entre las dos fuentes. Por lo que se puede decir que los datos obtenidos de la página de internet son confiables para ser considerados en los cálculos del dimensionamiento de sistemas energéticos donde no se cuente con una estación meteorológica cercana.

**Cuadro C1.** Radiación solar absoluta.

Meses	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Promedio	% Diferencia
Colpos kWh/m <sup>2</sup> / día	5.06	5.77	6.34	6.34	6.36	5.72	5.59	5.57	5.22	5.25	5.12	4.72	5.59	
Nasa kWh/m <sup>2</sup> /día	4.73	5.5	6.2	6.21	6.16	5.64	5.67	5.57	4.95	4.94	4.79	4.49	5.40	
Diferencia Colpos - Nasa	0.33	0.27	0.14	0.13	0.20	0.08	-0.08	0.00	0.27	0.31	0.33	0.23	0.18	<b>3.28</b>

Fuente: Estación Meteorológica del Colegio de Postgraduados y Atmospheric Science Data Center <http://eosweb.larc.nasa.gov/>.

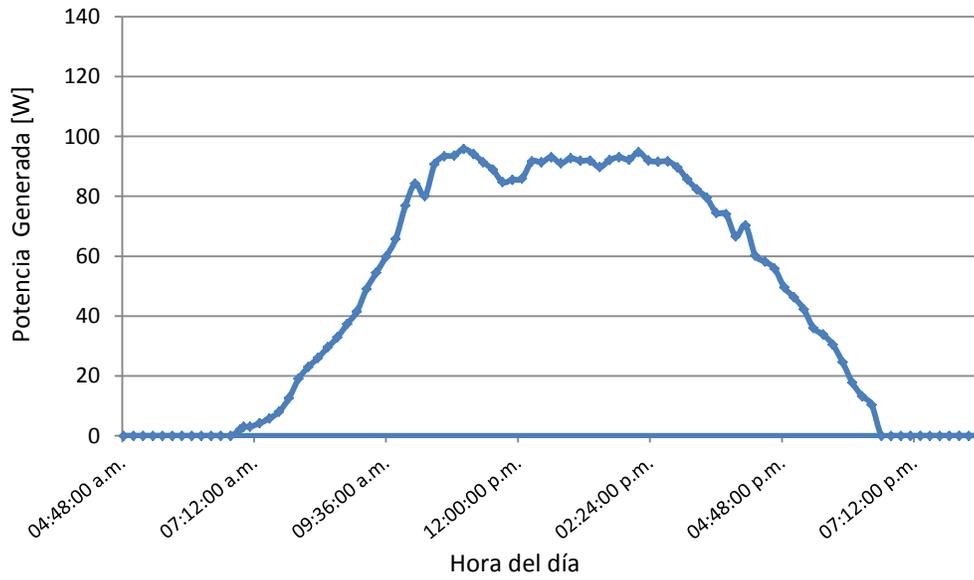
Se realizó la misma consulta pero ahora para la temperatura promedio del aire obteniéndose una diferencia entre los datos de -2.81%, por lo que, al igual que los datos de radiación, los datos de temperatura de la página de Atmospheric Science Data Center son confiables.

### Cuadro C2. Temperatura Promedio del aire.

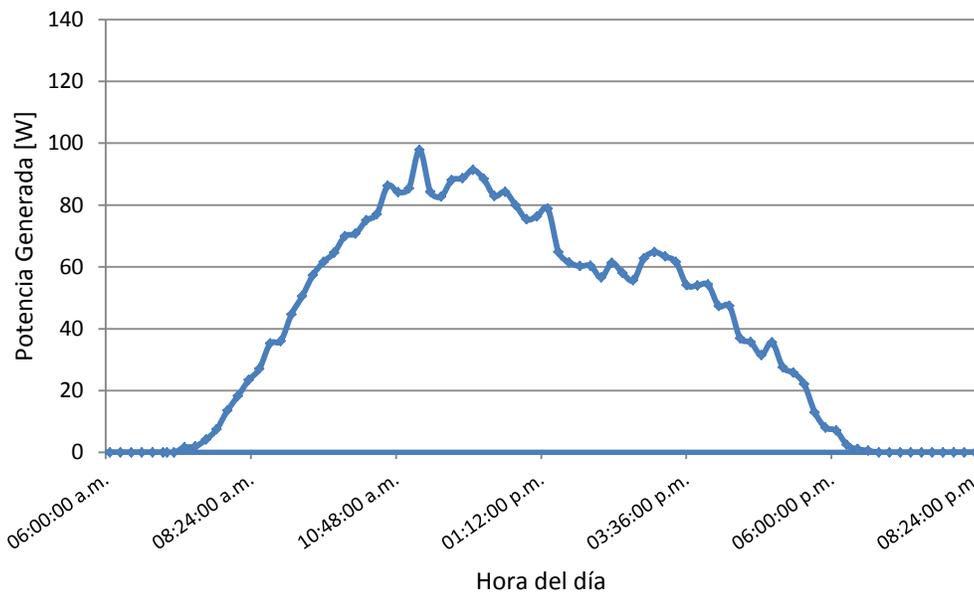
Meses	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Promedio	% Diferencia
Colpos (°C)	12.11	13.48	15.56	17.64	18.78	19.24	18.26	18.12	17.66	15.77	13.65	12.31	16.05	
Nasa (°C)	12.4	14.1	16.7	19	19.7	19	18.3	18.3	17.6	16	14.3	12.6	16.50	
Diferencia Colpos - Nasa (°C)	-0.29	-0.62	-1.14	-1.36	-0.92	0.24	-0.04	-0.18	0.06	-0.23	-0.65	-0.29	-0.45	<b>-2.81</b>

Fuente: Estación Meteorológica del Colegio de Postgraduados y Atmospheric Science Data Center <http://eosweb.larc.nasa.gov/>.

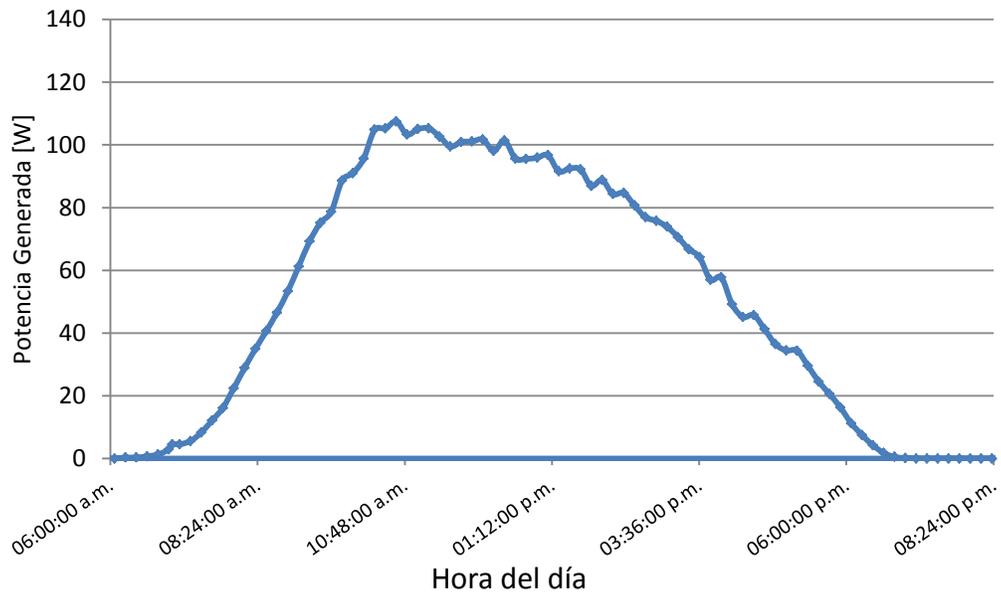
A continuación se muestran las gráficas de la generación de energía para un módulo fotovoltaico durante los meses del año 2011.



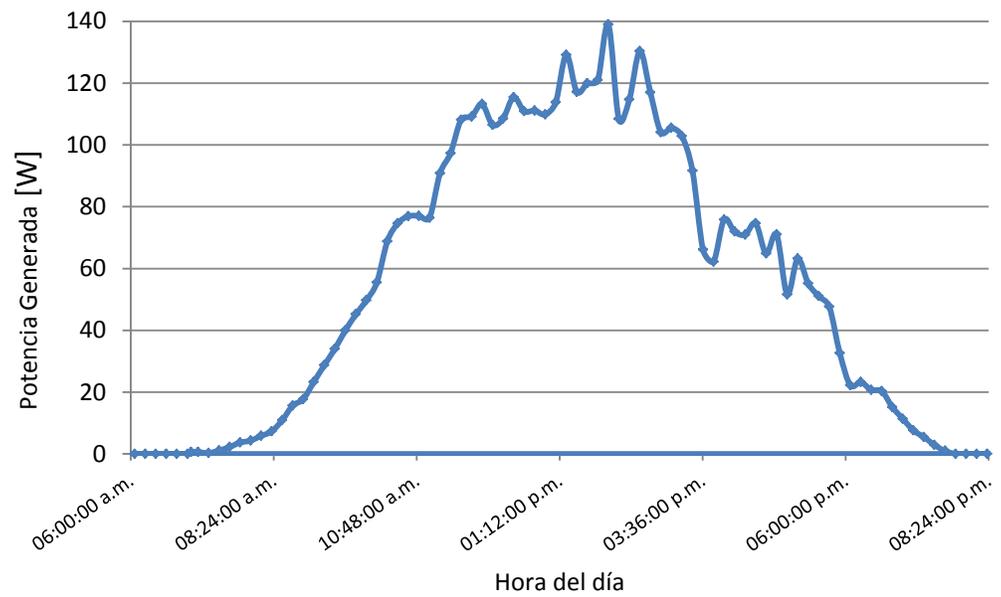
**Figura C1.** Producción promedio mensual de energía fotovoltaica para el mes de Enero.



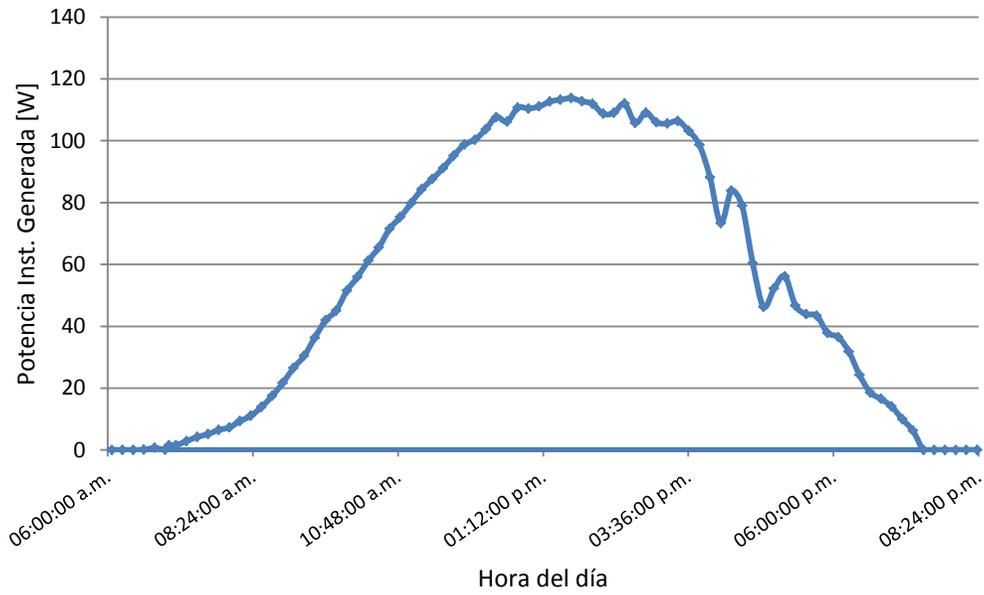
**Figura C2.** Producción promedio mensual de energía fotovoltaica para el mes de Febrero.



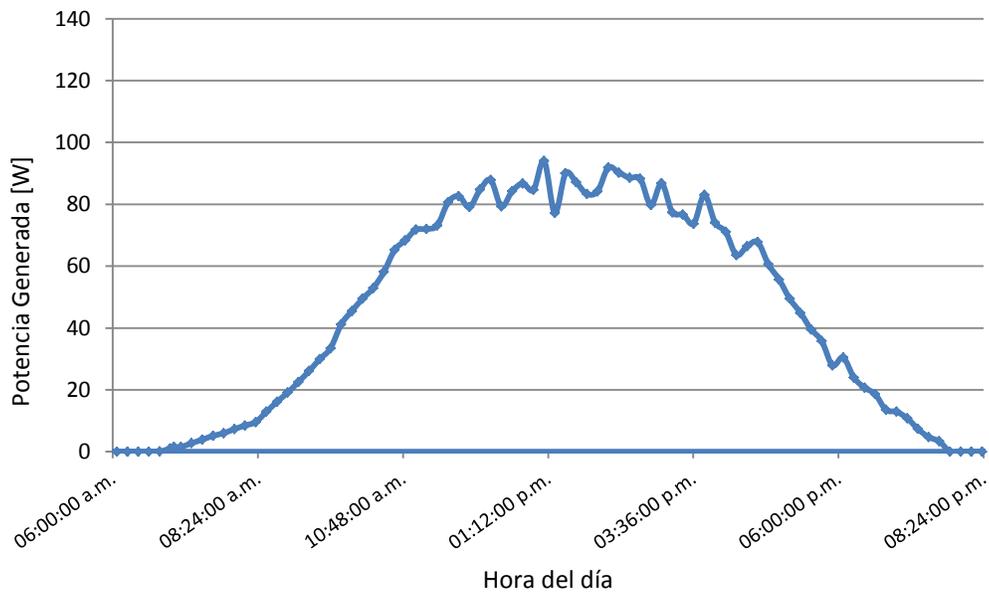
**Figura C3.** Producción promedio mensual de energía fotovoltaica para el mes de Marzo.



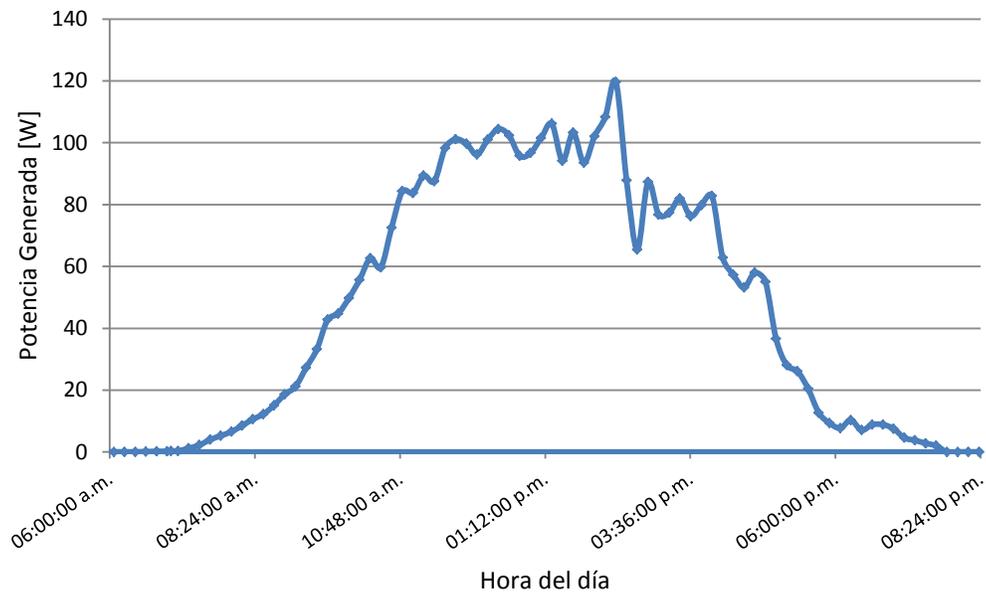
**Figura C4.** Producción promedio mensual de energía fotovoltaica para el mes de Abril.



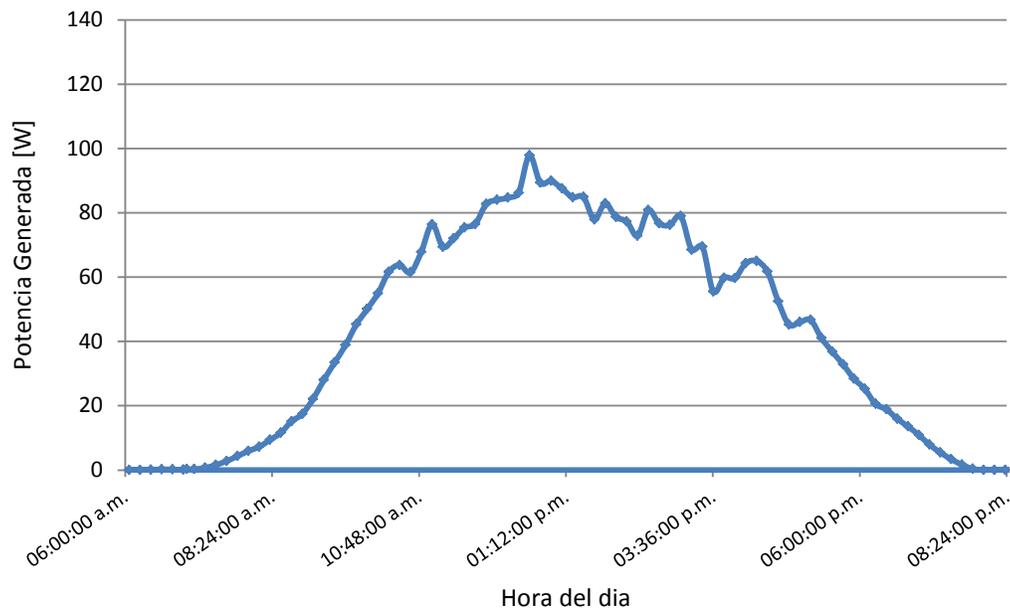
**Figura C5.** Producción promedio mensual de energía fotovoltaica para el mes de Mayo.



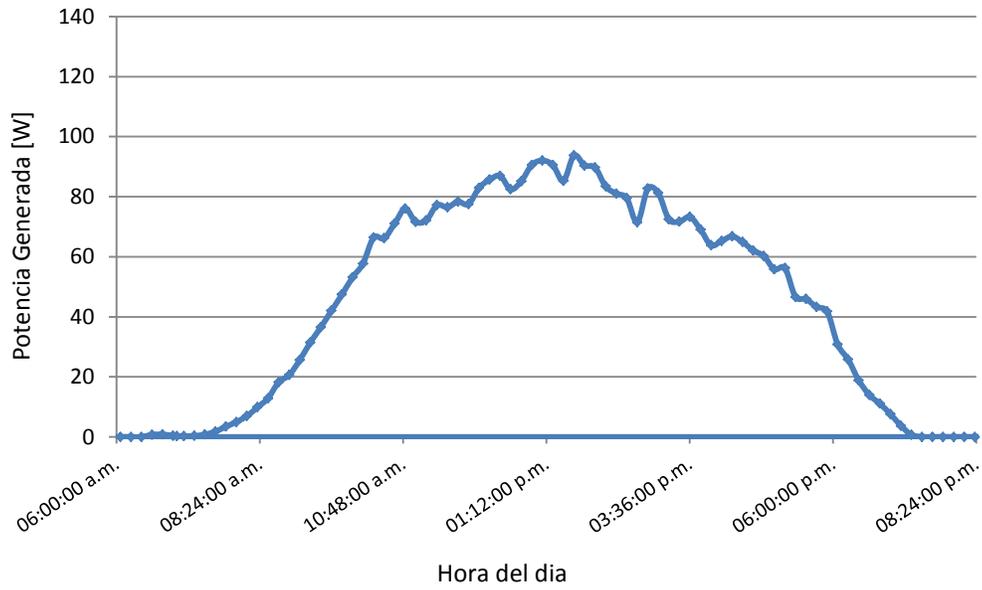
**Figura C6.** Producción promedio mensual de energía fotovoltaica para el mes de Junio.



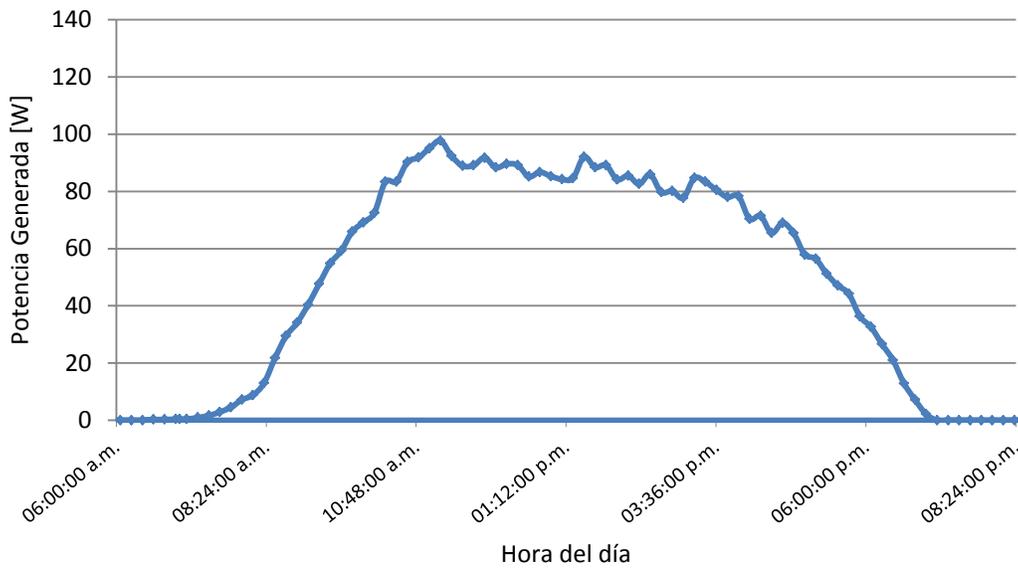
**Figura C7.** Producción promedio mensual de energía fotovoltaica para el mes de Julio.



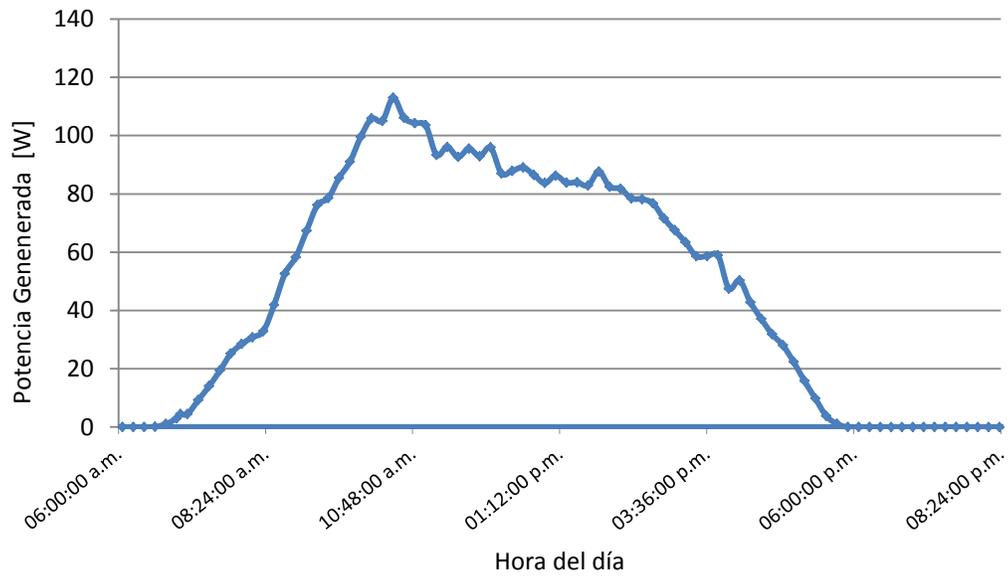
**Figura C8.** Producción promedio mensual de energía fotovoltaica para el mes de Agosto.



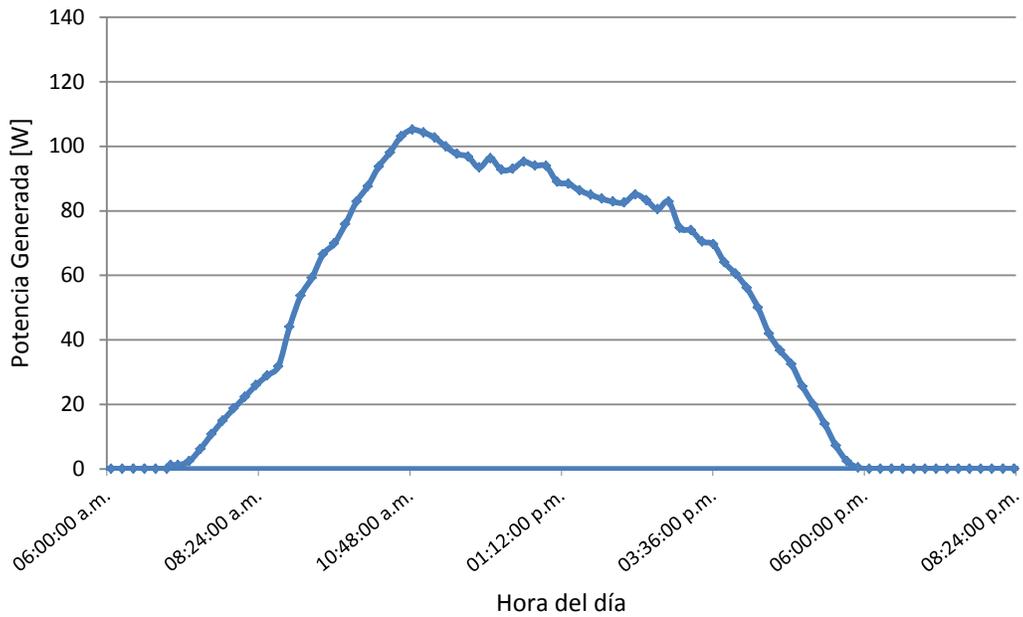
**Figura C9.** Producción promedio mensual de energía fotovoltaica para el mes de Septiembre.



**Figura C10.** Producción promedio mensual de energía fotovoltaica para el mes de Octubre.



**Figura C11.** Producción promedio mensual de energía fotovoltaica para el mes de Noviembre.



**Figura C12.** Producción promedio mensual de energía fotovoltaica para el mes de Diciembre.