



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias con Especialidad en
Instrumentación y Control Automático

DISEÑO DE UN SISTEMA DE ORIENTACIÓN AUTOMÁTICA HACIA EL SOL, DE UN
CALENTADOR SOLAR PLANO Y PANEL FOTOVOLTÁICO

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener grado de

Maestro en Ciencias

Presenta:

Pavel Vorobiev

Dirigido por:

Dr. Gilberto Herrera Ruiz

SINODALES

Dr. Gilberto Herrera Ruiz
Presidente

Firma

Dr. Rodrigo Castañeda Miranda
Secretario

Firma

M.C. Roberto Augusto Gómez Loenzo
Vocal

Firma

Dr. Efrén Gorrostieta Hurtado
Suplente

Firma

Dr. Rodrigo Mayén Mondragón
Suplente

Firma

Dr. Gilberto Herrera Ruiz
Director de la Facultad

Dr. Luis Hernández Sandoval
Director de Investigación y
Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
25 de Noviembre 2006
México

Resumen

La base de la investigación realizada fue el estudio de variaciones diarias de la intensidad de radiación solar en condiciones de Querétaro, México, con latitud del norte cercana a 23° . Estas variaciones fueron encontradas experimentalmente durante el tiempo del solsticio de verano (22 de Julio) cuando la posición del sol en la tarde a esta latitud es prácticamente vertical, en el tiempo del equinoccio y del solsticio del invierno. Para el estudio experimental, un panel solar fotovoltaico con el sistema original de orientación al sol de dos ejes fue usado, sin concentrador de radiación. Para estimar el efecto de orientación, fue realizada una comparación de datos obtenidos contra los registrados por el panel inmóvil, el ultimo siendo orientado de la manera mas provechosa. El panel usado fue ensamblado de celdas de Si cristalino, hecho por la planta rusa “Solar Wind” junto con otro panel experimentalmente construido con celdas individuales hechas por “Solar Wind”. Las conclusiones hechas fueron que durante el solsticio del verano, la orientación automática al Sol del panel solar da un aumento de energía de radiación acumulada de un 35%; durante el solsticio de invierno el efecto fue de 28% y de 31% durante el equinoccio. La otra parte de la investigación está relacionada al calentamiento de agua con el sistema de orientación solar de dos ejes, para probar la hipótesis: el uso de orientación en sistemas de calentamiento de agua con calentadores solares planos debería mostrar mayores aumentos de eficiencia en comparación con la orientación de sistemas puramente fotovoltaicos. El sistema se puede aplicar en la industria, en casas e invernaderos, la otra aplicación (que más que nada justifica el modelo de dos ejes contra el modelo de un eje) es en barcos, que constantemente cambian su dirección en el mar durante el día.

Palabras clave: energía solar, energía renovable, desarrollo sustentable, automatización, calentamiento, radiación, temperatura, panel fotovoltaico, calentador plano.

Abstract

The basis for the investigation made was the study of the daily variations of Solar radiation intensity in conditions of Querétaro, México, with the North latitude close to 23° . These variations were found experimentally at the time of summer solstice (around June 22) when the position of the Sun at noon at this latitude is practically vertical, at equinox time and at winter solstice. For experimental study, the photovoltaic solar panel with the original automatic two-axis solar tracking system was used, without the radiation concentration. To estimate the tracking effect, the comparison was made of the data obtained with those registered by the immobile panel, the latter being orientated in the most profitable way. The panel used was assembled from the crystalline Si solar cells made by the Russian plant "Solar Wind" along with other panel made experimentally from cells bought from "Solar Wind". The conclusions made were that at summer solstice, the Sun tracking by solar panel gives 35 % increase of the collected radiation energy; at winter solstice this effect was 28%, and at equinox – 31 %. The other part of the investigation was related to waterheating with a two-axes solar tracking system in order to prove the hypothesis: the use of orientation systems in waterheating with plane solar collectors should show greater increase of efficiency, compared to the orientation of purely photovoltaic system. The system can be applied in the industry, in houses and in greenhouses, the other application (which justifies mostly the two-axes versus one-axis model) is on ships, which constantly change their direction in the sea over the day.

Keywords: solar energy, renewable energy, automation, water heating, radiation, temperature, photovoltaic panel, plane collector.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por ser mi ejemplo en la vida, por la inspiración de ser profesionalista y por su insistencia en lograrlo.

A mi asesor, mis maestros y mis sinodales, por su apoyo y paciencia durante y antes de mis estudios de maestría.

A mi compañera Ana Gaby, por su amistad y su ayuda durante ya más de dos años.

A mis amigos Ivan, Vahe, Ania, Tania, Poncho Pantoja, Poncho Pérez, César, Arias, Anatoliy, Valeri, Alexei y otros por su apoyo moral, humor, pláticas y dinámicas de integración.

A Olga, que entró a mi vida poco después del comienzo de esta maestría y, aunque fue una luz distractora de la misma, a la vez fue la inspiración principal.

INDICE

	Página
Resumen	i
Summary	ii
Índice	iii
Índice de figuras	iv
I. INTRODUCCION	1
Justificación	1
Componentes principales	2
Objetivos e hipótesis de trabajo	3
Posibles aplicaciones y usos del proyecto	3
II. ANTECEDENTES Y REVISION DE LITERATURA	5
Investigación teórica previamente realizada	5
Producción de energía	9
Realidad técnica	13
Orientación	14
Antecedente de un sistema híbrido de orientación automática	16
III. METODOLOGÍA Y MARCO TEÓRICO	18
Colector solar plano	18
Eficiencia térmica de un colector solar plano	21
Panel fotovoltaico	23
Baterías	27
Controlador de carga	28
Sensores	30
Controlador de movimiento	31
Motores	32
Uso de sistemas híbridos	33
Experimento	38
IV. RESULTADOS Y CONCLUSIONES	40
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
APENDICE	47
Tabla de datos del experimento	47

Código MPASM de programación del PIC16F877

49

Publicación del artículo sobre el tema

57

INDICE DE FIGURAS

Figura		Página
2.1.1	Gráfica de Radiación Solar promedio de 4 años	6
2.1.2	Gráfica de Radiación Solar (horas pico)	7
2.1.3	Sistema de orientación de panel fotovoltaico a escala	8
2.1.4	Curvas de irradiación solar con y sin orientación. Los cuadros negros representan la irradiación teórica con efecto de orientación, los círculos rojos representan irradiación sin orientación y los triángulos verdes representan la irradiación real medida con efecto de orientación	8
2.2.1	Planta de calentamiento de agua de alta temperatura, Wisconsin, EE.UU	10
2.2.2	Sistema termo-sifónico de calentamiento de agua	11
2.2.3	Calentadores solares planos de orientación fija, para albercas	12
2.3.1	Calentador solar plano con orientación fija de 45 grados hacia el sur	14
2.3.2	Panel fotovoltaico con sistema de orientación de dos ejes	14
2.3.3	Arreglo de paneles fotovoltaicos con orientación de un eje	15
2.4.1	Sistema de orientación de calentador de agua, Universidad de Lleida	16
3.1.1	Calentadores solares planos flexibles del invernadero de la Facultad de Ingeniería de la UAQ	21
3.2.1	Panel fotovoltaico de 10 W de construcción propia	24
3.2.2	Panel FV Siemens de 10W con el acoplamiento térmico de cobre	26
3.3.1	Curvas de carga de baterías de ácido-plomo. En la etapa 1 la batería se carga con corriente constante, al saturarse (etapa 2) la corriente disminuye, en la etapa 3 una corriente muy baja compensa la autodescarga	27
3.3.2	Acumulador STEREN BR-1207	28
3.4.1	Controlador de carga Steca theta de 30 Amp	29
3.4.2	Esquemático de controlador de carga de 30 Amp aproximadamente	30
3.5.1	Arreglo de sensores en forma de “sombrija”.	31
3.7.1	Elevadores eléctricos. Motores de 12V con reductor	32
3.8.1	Ilustración del acoplamiento híbrido entre panel fotovoltaico y calentador solar plano	35
3.8.2	Gráfica de Voltaje versus Tiempo para la celda de CIS sin contacto térmico con el colector solar	36
3.8.3	Gráfica de Voltaje versus Tiempo para la celda de CIS con contacto térmico	36
3.8.4	Curvas de eficiencia eléctrica de la celda de Silicio con y sin contacto térmico con el colector solar	37
3.9.1	Diagrama de movimiento de calentador solar plano con sistema de orientación automática hacia el sol	39

4.1	Gráfica de temperaturas de salida, entrada y diferencia entre estas, del calentador plano con orientación	41
4.2	Gráfica de temperaturas de salida, entrada y diferencia entre estas, del calentador plano sin orientación	42
4.3	Gráfica de temperaturas de salida, entrada y diferencia entre estas, del calentador plano con y sin orientación	43
4.4	Gráfica de la eficiencia útil	44
4.5	Eficiencia pura del sistema de orientación	44

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación

Desde tiempos remotos, la energía ha sido una demanda constante de la humanidad, de cualquier actividad, transporte e industria. Por ejemplo, el hombre de las cavernas comenzó la ruta de la civilización al utilizar la energía del fuego para dar calor y luz, y con la energía de su cuerpo a través del arco y el garrote, para sobrevivir y alimentarse. En los siglos siguientes, la conquista de la Luna ha sido posible gracias a la obtención de la energía química para los cohetes.

Por tal motivo, si nosotros y las generaciones futuras, queremos gozar de un mundo sin contaminación, es necesario que conozcamos nuestro entorno y las nuevas formas de generar energía limpia. Con este propósito, debemos transformar la industria energética en un negocio sustentable. Además, es importante que México proporcione mecanismos que consoliden el uso de tecnologías de energía renovable. Y no hay mejor modo de comenzar que investigando las diferentes formas de producir energía.

La importancia del uso de las fuentes de energía renovables es bien reconocida en el mundo. En la actualidad existen tecnologías maduras para la elaboración de los sistemas fotovoltaicos de conversión de la energía solar a energía eléctrica, los generadores eléctricos eólicos, los colectores planos para calentar el agua, etc. El uso práctico de los dispositivos antes mencionados ha aumentado mucho en los últimos años (por ejemplo, en Europa la potencia eléctrica generada por generadores eólicos en el año 2000 fue 10 veces más que en 1990). En México, a pesar de que tenemos un territorio extenso, con fuertes corrientes de vientos y uno de los grados de insolación mayores del mundo, el uso de estas fuentes de energía renovable, es proporcionalmente mucho menor que en Europa o Estados Unidos. Se debe señalar que en México el uso ilimitado de las fuentes tradicionales de energía ha creado

serios problemas ecológicos, por lo que el uso de energías renovables es una necesidad objetiva.

En este trabajo pretendo hacer uso del sistema híbrido “calentador solar plano – panel fotovoltaico” (Fernández, 2001; CERN, 1978; Zakharchenko, 2003) y automatizar su orientación hacia el sol. El tema es relativamente nuevo, sobre todo considerando el perfil de orientación automática. Durante las últimas décadas se han desarrollado algunos sistemas de calentamiento de agua por calentadores solares planos, incluso se han visto algunos casos de acoplamiento de tales calentadores con paneles fotovoltaicos, formando un sistema híbrido, para mutuamente compensar las desventajas de cada dispositivo y de manera conjunta subir la eficiencia final del sistema híbrido. Sin embargo, para el caso de orientación automática, la atención de los investigadores se ha desviado casi por completo hacia la orientación de paneles fotovoltaicos. El área de orientación de calentadores planos prácticamente no ha sido tocada, probablemente por incomodidades de acoplamiento de mangueras o tubería a un sistema móvil; mientras cuando la orientación automática al sol de un calentador plano es potencialmente más provechosa que la orientación de un panel fotovoltaico, es decir, la eficiencia final del primer sistema es más grande que la del segundo, lo cual es debido a las propiedades termoeléctricas del material semiconductor en las celdas fotovoltaicas y propiedades del cuerpo negro.

1.2 Componentes principales

El sistema consiste de los siguientes componentes:

- Calentador solar plano de tipo flexible
- Panel fotovoltaico
- Acumulador de energía eléctrica
- Controlador de carga
- Sistema de senseo de luz
- Controlador de orientación automática
- Motores y acoplamientos

1.3 Objetivos e hipótesis de trabajo:

Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es el aumento de eficiencia de los colectores solares planos, por medio de construcción e investigación del desempeño del sistema propuesto, con la finalidad de contribuir a la resolución de problemas de generación de energía y su relación con la contaminación, por medio del uso de sistemas de energía renovable.

Las otras metas que se deben alcanzar para lograr el objetivo antes mencionado son:

- Determinar los porcentajes adicionales de eficiencia de calentadores solares planos al ser orientados al sol durante el tiempo de día.
- Construir un controlador de posición de orientación del calentador plano, probando algunas maneras de sensar el grado de orientación hacia el sol.
- Optimizar los elementos del sistema para garantizar su economía y autonomía.

Hipótesis

El estudio previamente realizado muestra que, durante el solsticio del verano, la orientación automática del panel solar da un aumento de energía de radiación acumulada de un 35%; durante el solsticio de invierno el efecto fue de 28% y de 31% durante el equinoccio. Desgraciadamente, para el caso de celdas fotovoltaicas, el porcentaje de ganancia obtenida no puede ser considerado en su totalidad debido al decremento de eficiencia de celdas fotovoltaicas con el aumento de temperatura, mientras que para un colector solar plano estas ganancias adicionales si se pueden aprovechar por completo, llevando a la posibilidad de encontrar un sistema muy eficiente de calentamiento de agua, para casas ecológicas, invernaderos y barcos u otros objetos en movimiento.

1.4 Posibles aplicaciones y usos del proyecto

Las aplicaciones del sistema son muy extensas y a escalas diferentes. El uso de energías renovables en si es una gran ayuda a la ecología mundial. La parte económica del este aspecto aún marca la preferencia del uso de energías tradicionales, pero probablemente en un futuro muy cercano el entendimiento del problema ecológico a nivel global aumentará y este tipo de investigaciones se volverán muy útiles y muy demandadas. Mientras tanto, el sistema se podrá probar en las instalaciones del invernadero de la Facultad de Ingeniería, esperando a eficientar el provecho, que ya se obtiene ahí, al estar utilizando un calentador solar de agua en vez de calentadores de gas.

Por otro lado, últimamente cada vez más se realizan proyectos de casa ecológicas. El sistema propuesto en este trabajo sería de gran uso para un proyecto de este estilo si uno así se presentara.

Otro uso particular del sistema de orientación de dos ejes es en barcos. Debido a que los barcos cambian su dirección en el mar o río durante el día, se aprovecha mas el uso del eje de orientación adicional, en comparación con sistemas fijamente instalados en la tierra, cuya posición solamente cambia con respecto al sol y no con respecto a su posición en el piso o techo donde estén instalados.

Capítulo 2

ANTECEDENTES Y REVISION DE LITERATURA

Antecedentes

Los antecedentes se presentan sobre cuatro subtemas diferentes correspondientes al tema principal:

- Investigación teórica previamente realizada
- Producción de energía térmica o termo-fotovoltaica con fuentes renovables de energía
- Orientación de algún sistema foto-termo-eléctrico
- Uso de sistemas híbridos (acoplamiento termo-fotoeléctrico)

2.1 Investigación teórica previamente realizada

La energía proveniente del sol puede servir para distintos propósitos. Uno de ellos es la generación de electricidad, conocida como 'electricidad solar'. Con la ayuda de paneles solares, la luz del sol es convertida directamente en energía eléctrica. Este proceso es denominado *efecto fotovoltaico o FV*.(Gómez, 1997).

El uso de electricidad solar presenta muchas ventajas, puesto que se trata de una fuente de energía limpia, silenciosa y confiable. En un principio, fue utilizada en satélites; en 1958, se lanzó el Vanguard I, primer satélite provisto de celdas solares para la generación de energía. Hoy en día, el uso de la electricidad solar se ha generalizado. En zonas remotas, donde no hay conexión a la red de distribución pública, esta forma de energía solar es empleada para satisfacer la demanda de electricidad de los hogares y para alimentar bombas de agua y refrigeradores para vacunas; con frecuencia, estos sistemas cuentan con baterías para almacenar electricidad. Sin embargo, la electricidad solar puede ser empleada, asimismo, para alimentar calculadoras, sistemas de comunicación o balizas en el mar. Otras aplicaciones de la electricidad solar son: la generación de energía para casas, oficinas, etc. o el suministro de energía auxiliar a la red de distribución, utilizando sistemas generadores de electricidad solar.

En las siguientes gráficas (CENAM, 2002) se muestran los datos de radiación solar para la ciudad de Querétaro, donde podemos ver el comportamiento anual de la misma. En la gráfica 2.1.1 podemos observar la radiación solar promedio de 4 años para la zona ubicada entre Juriquilla y Santa Rosa Jáuregui, dándonos un comportamiento aproximado de la radiación en la zona en que estamos ubicados.

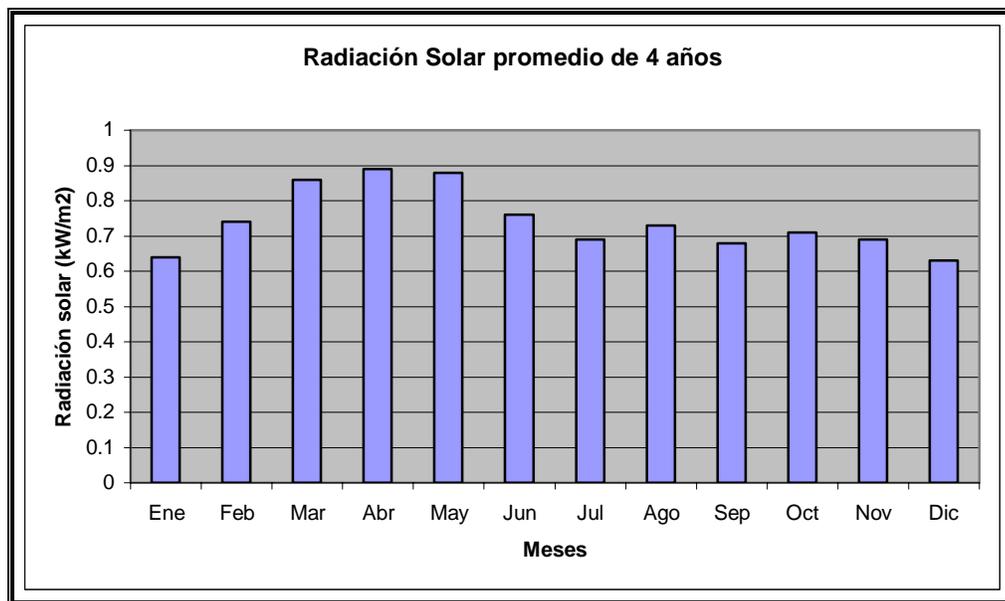


Fig. 2.1.1. Gráfica de Radiación Solar promedio de 4 años.

La figura 2.1.2 nos muestra el comportamiento promedio de la radiación solar durante el día en diferentes meses del año, para la ciudad de Querétaro.

En la gráfica podemos observar las tendencias de cada mes, y la variación que cada uno de ellos tiene durante el día. Notando que el eje vertical representa la irradiación y el eje horizontal – el tiempo, se deduce que el área debajo de las curvas es la energía irradiada hacia la tierra. Su porcentaje de energía útil depende de la eficiencia del sistema. En términos

de esta grafica, lo que se pretende en este trabajo en cuanto a aumento de eficiencia, es levantar las curvas y, por tanto, aumentar el área bajo ellas.

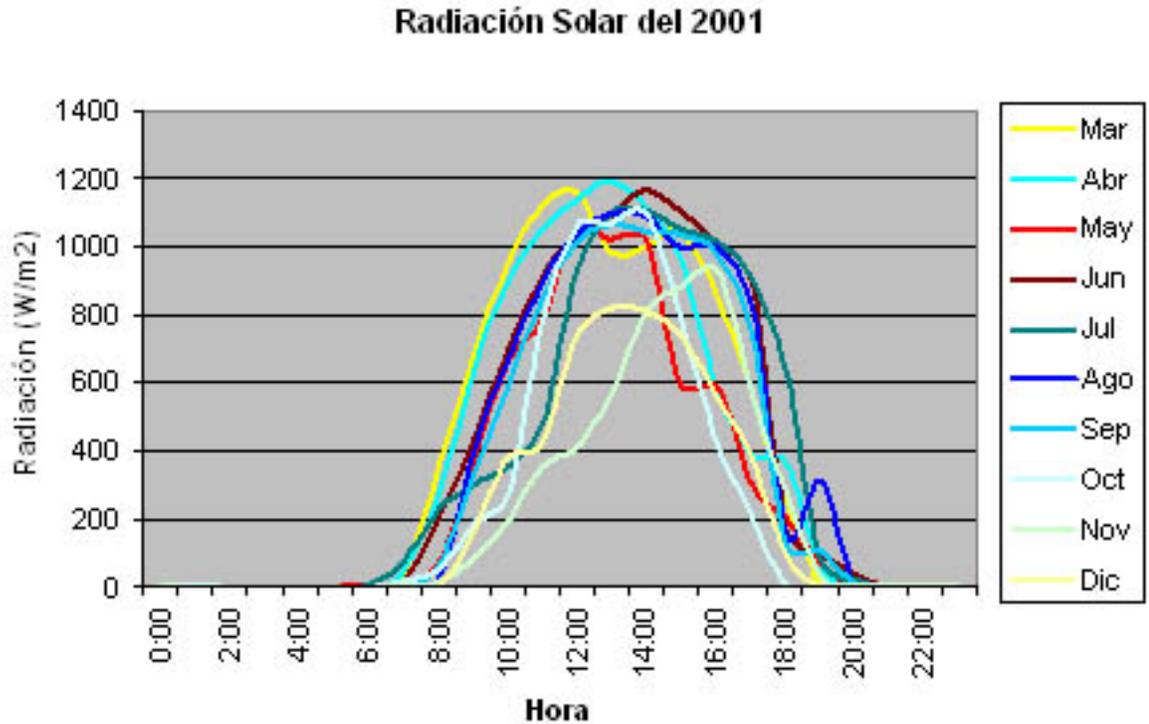


Fig. 2.1.2. Gráfica de Radiación Solar (horas pico).

Tomando estos datos como datos de referencia para colección de energía sin orientación, se realizó el experimento de medición con un panel fotovoltaico orientado de manera fija, pero la más provechosa (45 grados, hacia el sur), contra un panel fotovoltaico orientado con un sistema a escala (fig. 2.1.3). Las mediciones se realizaron con un intervalo de tiempo de 30 minutos a lo largo de varios días, para equalizar los promedios de insolación solar. La grafica de los resultados se ve en la figura 2.1.4.



Fig. 2.1.3. Sistema de orientación de panel fotovoltaico a escala

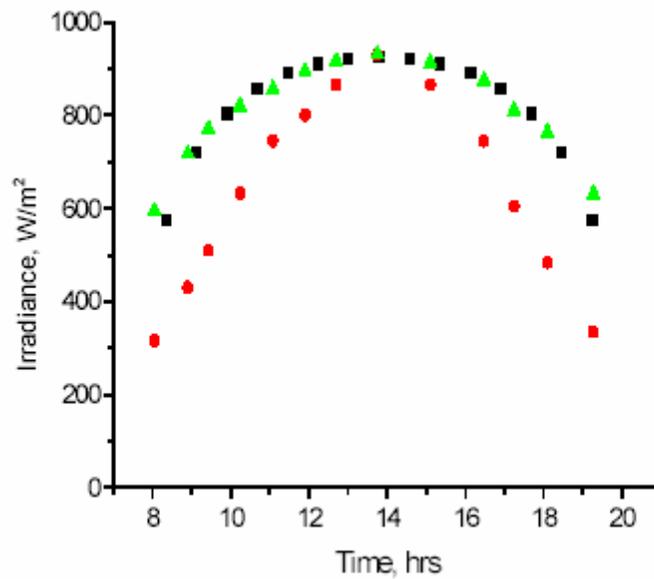


Fig. 2.1.4. Curvas de irradiación solar con y sin orientación. Los cuadros negros representan la irradiación teórica con efecto de orientación, los círculos rojos representan irradiación sin orientación y los triángulos verdes representan la irradiación real medida con efecto de orientación.

2.2 Producción de energía

Los sistemas solares térmicos presentan los siguientes antecedentes en la industria y en la investigación, y otras aplicaciones:

- Sistemas de temperatura alta , fig. 2.2.1, (para turbinas o procesos químicos, como la producción de hidrogeno)
 - Espejos parabólicos (1000 grados)
 - Espejos planos (350 grados)

- Sistemas de temperatura baja
 - Calentamiento de invernaderos, oficinas, casas
 - Agua caliente domestica e industria
 - Calentamiento de albercas
 - Cocción solar
 - Secado de cosechas



Fig. 2.2.1. Planta de calentamiento de agua de alta temperatura, Wisconsin, EE.UU.

Otra subclasificación es:

- Sistemas pasivos
 - Los que colectan la energía sin necesidad de bombas ni motores.
 - Normalmente azoteas o edificios enteros
 - Costos y mantenimiento mínimos
 - Ejemplo: calentamiento termo-sifónico:

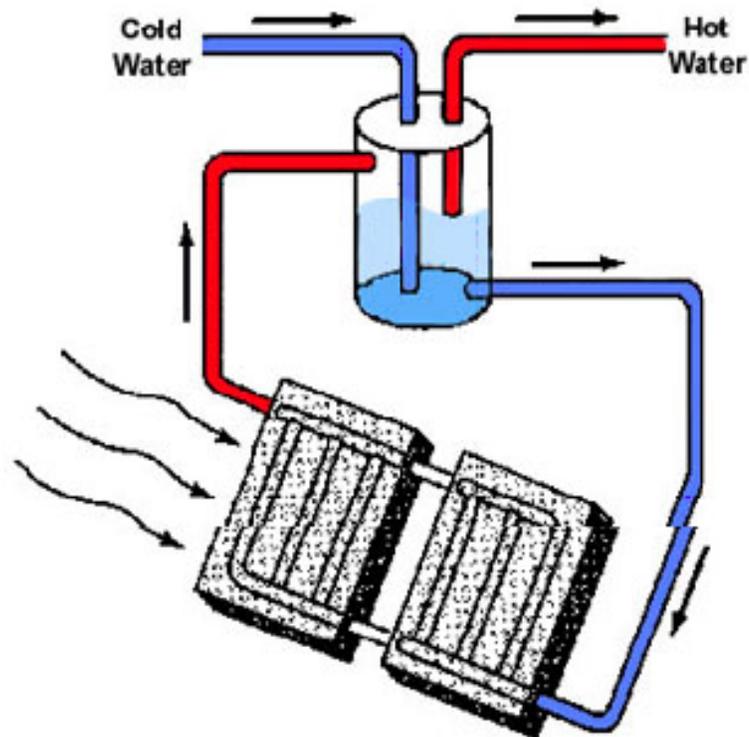


Fig. 2.2.2. Sistema termo-sifónico de calentamiento de agua

- Sistemas activos. Los sistemas activos usan agua o algún otro líquido o gas que se bombea a través del colector.
 - Para temperaturas altas (arriba de 40 grados) se utilizan tubos de cobre pintados de negro y cubiertos por una capa de cristal
 - Para temperaturas bajas es suficiente utilizar materiales sintéticos (tubos plásticos)





Fig. 2.2.3. Calentadores solares planos de orientación fija, para albercas.

Se considera que los sistemas activos en Europa cubren entre 50 y 65 por ciento de los requerimientos de agua caliente domestica, mientras que en climas subtropicales el número sube hasta 80 o hasta 100 por ciento.

En la cuestión de costos, se consiguió información estadística de estado de Wisconsin, EE.UU., aparentemente el estado con más desarrollo tecnológico en el área.

Domestic Solar Water Heating

- *Capital costs project: US\$1500 - \$3000*
- *Operating life: 15 – 40 years*
- *Payback period: 4 – 14 years*
- *Maintenance costs: \$25 - \$30/year*

Solar Thermal Electricity

- *Capital Cost US\$2500-3500/kW*
- *Operating Life 20 years*
- *Levelised Cost US\$ 0.8-15/kWh*

Nota: los costos representan precios comerciales, es decir, precios para consumidor. El costo de producción de un sistema experimental es incomparablemente mas bajo, debido a la reutilización de componentes eléctricos, etc., de la infraestructura de la universidad.

2.2.1 Realidad técnica

La realidad técnica mundial, sobre el asunto, se ve como la siguiente:

- Plantas de alta temperatura empiezan a operar en EE.UU..
- En cuanto a tecnologías de temperaturas bajas, existen mas de 180 compañías entre EE.UU.. y Europa.
- En países como Australia y los Países Bajos las políticas energéticas favoreces este tipo de tecnologías para bajar los costos.
- México se encuentra en un estado de confusión sobre el apoyo o rechazo de este tipo de tecnologías e investigaciones sobre el tema, pero la finalidad de este trabajo, en parte, es de provocar mayor interés del público en general, pero especialmente de órganos políticos.

2.3 Orientación

La orientación de sistemas termo-fotoeléctricos prácticamente no esta explorada, sin embargo la orientación de sistemas puramente fotoeléctricos existe de varios tipos (lo que este trabajo considera apropiado de llamarse orientación son los dos últimos puntos):

- Orientación fija
- Orientación según cambio de estación
- Orientación automática con un eje
- Orientación automática con dos ejes



Fig. 2.3.1. Calentador solar plano con orientación fija de 45 grados hacia el sur



Fig. 2.3.2. Panel fotovoltaico con sistema de orientación de dos ejes.



Fig. 2.3.3. Arreglo de paneles fotovoltaicos con orientación de un eje

Se consiguieron estadísticas del estado de Wisconsin, de su análisis de eficiencias de sistemas con y sin orientación, donde claramente se puede ver que la orientación de sistemas termoeléctricos o térmicos no esta explorada:

	Annual Insolation (KWh/ft2)	Thin Film PV System 8% effic.(KWh/ft2)	Crystalline PV System, 12% effic.(KWh/ft2)	SHW System,40% effic.(ft3 natural gas/ft2)
Fixed, horizontal	128	10.2	15.4	171
Fixed 25o tilt from south due	142	11.4	17.0	190
Fixed 50o tilt from south due	138	11.0	16.6	184
Tracking, single axis	176	14.1	21.1	---
Tracking, double axis	186	14.9	22.3	---

Tabla 2.3.1. Comparación de eficiencia entre sistemas con y sin orientación.

2.4 Antecedente de un sistema híbrido de orientación automática

Como el propósito de este proyecto es la construcción del sistema autónomo completo, se buscaron antecedentes de tales sistemas, encontrando el único que se muestra en las figura 2.4.1.

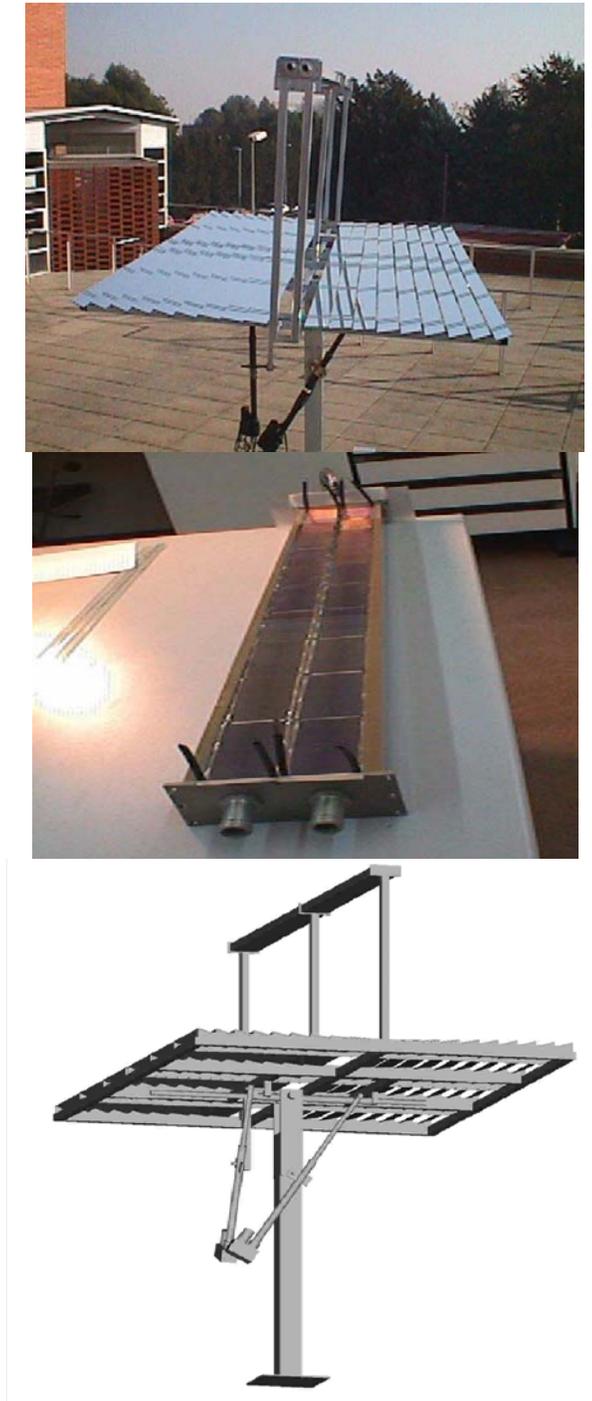


Fig. 2.4.1. Sistema de orientación de calentador de agua, Universidad de Lleida.

En la segunda foto de la figura 2.4.1 se ve el acoplamiento híbrido de la parte térmica y la parte fotovoltaica. El área de contacto es de 100% - la configuración menos eficiente (como será explicado detalladamente en el capítulo II de la tesis), además el volumen de líquido pasable por el intercambiador de calor es muy pequeño para darle uso siquiera doméstico. El mecanismo de orientación, sin embargo, sí presenta algún interés, debido a su originalidad, pero es aplicable únicamente en casos con diseño similar del intercambiador de calor, por lo tanto, en casos de manejo de un volumen muy pequeño del flujo.

Capítulo 3

METODOLOGÍA Y MARCO TEÓRICO

En base a componentes descritos en 1.2, el capítulo presente se dividirá en secciones correspondientes.

3.1 Colector solar plano

Cuando un objeto se expone a la radiación solar la temperatura se eleva hasta que las pérdidas de calor igualan a las ganancias. Las pérdidas se deben a la emisión del material caliente (radiación), al movimiento del aire frío que lo rodea (convección), y de la conductividad térmica de los objetos en contacto con él (conducción). Las ganancias dependen de la intensidad de radiación solar, de la capacidad emisiva del material, del poder absorbente de la superficie y del coeficiente de transferencia de convección. Los colectores solares se clasifican en colectores concentradores y colectores planos.

Los colectores solares planos tienen la capacidad de coleccionar tanto radiación difusa como radiación directa, dentro de estos se encuentran los colectores planos desnudos, colectores solares planos encapsulados y los colectores de tubo evacuado. Los colectores concentradores sólo coleccionan radiación directa, pero pueden coleccionar energía solar a altas temperaturas; dentro de este tipo de colectores está el de plato parabólico, canal parabólico, parabólico compuesto, canal parabólico compuesto y concentradores a partir de helióstatos.

En la tabla 3.1.1, se puede ver el rango de temperaturas que se usan (aproximadamente) y tipos de radiación que usa cada tipo de colector solar. Los colectores solares sin concentración también pueden considerarse como autocontenidos y de circulación de fluido. En los primeros se usa el colector como almacén de energía. En los segundos el colector sólo hace esa función y la energía se almacena en un contenedor aparte, para esto, es necesario mantener una circulación de agua en el colector.

Un colector solar es una especie de intercambiador de calor (Raghuraman, 1981) que transforma la energía radiante en calor. La transferencia de energía se hace desde una fuente radiante (sol), hacia un fluido (agua o aire, generalmente) que circula por los tubos o ductos del colector. El flujo de energía radiante que finalmente intercepta el colector, proviene básicamente del rango visible del espectro solar y es por naturaleza variable con el tiempo. En condiciones óptimas podemos esperar, como máximo, flujos de 1100 W/m^2 . De esta forma, un análisis de colectores solares presenta problemas relacionados con radiación y flujos de energía pequeños y variables. Dentro de los diversos tipos de colectores solares, los colectores solares planos son los más comunes. Estos pueden ser diseñados y utilizados en aplicaciones donde se requiere que la energía sea liberada a bajas temperaturas, debido a que la temperatura de operación de este tipo de colectores, difícilmente pasa los $100 \text{ }^\circ\text{C}$.

El principio del funcionamiento de un colector solar es captar la energía de los rayos solares en una placa absorbente expuesta a estos, y pasar esta energía en forma de calor al agua (o aire) que circula en contacto con la placa.

Existen dos principales diseños del colector solar plano (entre todos los mostrados en la tabla 3.1.1). Uno consiste en una capa de vidrio transparente que deja pasar la radiación solar, una placa absorbente (ennegrecida) metálica, una capa de aire (o agua) circulando en contacto con ella, otra placa paralela a la absorbente que sirva de tapa posterior a la cámara de agua (o aire) y finalmente una capa aislante posterior. Otro diseño consiste en dos placas flexibles de polímetro, cosidas entre ellas de tal manera que los ductos para aire o agua se forman a la manera de una víbora. La eficiencia de los colectores comerciales (o sea, la parte de la energía solar convertida a calor) es aproximadamente 60 - 70 % en ausencia del viento, el viento esta disminuyendo la eficiencia de manera lineal.

Tipo de Colector	Tmax, °C	T, °C	Radiación	Observación
Plano desnudo	40	25-30	Directa Difusa Gran rango de direcciones	Depende del clima
Plano encapsulado	100	50-60	Directa Difusa Gran rango de direcciones	
Plano evacuado	250	175-200	Directa Difusa Gran rango de direcciones	
Plano parabolico	3500		Directa	
Canal parabolico	300	250	Directa Bajo rango de direcciones	
Parabolico compuesto	Más de 1000		Directa Medio rango de direcciones	Es usado en super concentraciones
Canal parabolico compuesto	250	150-200	Directa Medio rango de direcciones	Puede abarcar el rango de temperatura de todos los anteriores
Heliostatos			Directa	

Tabla 3.3.1 Diferentes tipos de colectores solares



Fig. 3.1.1. Calentadores solares planos flexibles del invernadero de la Facultad de Ingeniería de la UAQ.

3.1.1. Eficiencia térmica de un colector solar plano

El análisis en régimen estacionario de la energía calorífica que es susceptible de ser transferida al fluido de trabajo, se calcula tomando la diferencia entre la radiación global incidente menos las pérdidas de calor en el colector a través de la siguiente relación:

$$(III.1) \quad Q_u = F_R A [G(\tau\alpha) - U(T_e - T_a)]$$

en donde:

Q_u = Calor útil en watts.

F_R = Factor de remoción.

A = Área del receptor en m^2 .

G = Radiación global incidente sobre el plano del colector en $watts/m^2$.

$(\tau\alpha)$ = Producto transmitancia absorbanza efectiva.

U_L = Coeficiente global de pérdidas de calor, $watt/m^2^\circ C$.

T_e = Temperatura de entrada del fluido $^\circ C$.

T_a = Temperatura ambiente °C.

En la ecuación anterior, el primer término representa la energía recibida en el colector. Este término depende esencialmente de la radiación global y de las características ópticas del receptor y la cubierta transparente. El segundo término, representa las pérdidas de calor y por lo tanto determina la máxima temperatura de operación del colector. La dependencia de este término con los diferentes parámetros necesita de un análisis de la forma explícita del coeficiente de pérdidas totales U_L que se expresa como:

$$(III.2) \quad U_L = U_T + U_B$$

en donde:

U_T = Coeficiente de pérdidas por la parte superior del colector.

U_B = Coeficiente de pérdidas por la parte inferior del colector.

Para obtener la eficiencia con la que está trabajando nuestro colector, es necesario calcular primeramente la eficiencia instantánea a través de la relación:

$$(III.3) \quad \eta = Qu / AG$$

en donde para obtener nuestros resultados es necesario utilizar la ecuación III.1 para el calor útil Qu .

Por lo tanto, la ecuación III.3 toma la forma:

$$(III.4) \quad \eta = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \frac{(T_e - T_a)}{G}$$

Dada la forma analítica de la ecuación anterior, la gráfica de la eficiencia contra $(T_e - T_a)/G$ nos permite conocer a través de la ordenada al origen las características ópticas del colector y por medio de la pendiente las pérdidas caloríficas. Variando las condiciones del colector solar pueden obtenerse diversos rendimientos, que al ser dibujados en un gráfico, determinan su curva de eficiencia. La compleja curva de eficiencia, se puede ajustar a una ecuación de segundo grado, e incluso a una de primer grado si las temperaturas de trabajo no son muy altas. La curva de eficiencia proporciona la eficiencia energética del colector en función de una diferencia de temperaturas reducida. Hay que tener en cuenta que ha medida que aumenta la temperatura de salida del líquido, la eficiencia disminuye.

La eficiencia instantánea se obtiene como:

$$(III.5) \quad \eta = \frac{\dot{m} C_p (T_s - T_e)}{GA}$$

donde $\dot{m} = \frac{dm}{dt}$ es la razón de flujo de la masa del fluido, de tal forma que:

$$\text{Eficiencia instantánea} = \text{Caudal volumétrico} * \text{Densidad} * \text{Calor específico} * (T_s - T_e) / G * A. [9]$$

Esta eficiencia instantánea es como la eficiencia “desde el punto de vista del calentador” y esta basada en la diferencia de temperaturas de entrada al calentador y salida de él. Pero en el presente trabajo se trata de optimizar la temperatura máxima de salida, ya que desde el punto de vista práctico (uso doméstico u otro uso) la temperatura máxima marca la utilidad para el usuario, sobre todo si se cuenta con un tanque térmico que puede mantener el agua (o lo que estemos calentando) a la temperatura cercana a la máxima durante algún tiempo del día. Desde este punto de vista la eficiencia se podría ver como

$$\text{Eficiencia útil} = \text{Diferencia de temperaturas} + \text{Temperatura máxima}$$

De esta manera se aprecia más el aumento de eficiencia útil en un sistema de orientación fija y la automática, como se va a poder apreciar en la discusión de los resultados.

3.2 Panel fotovoltaico

Las celdas solares son fabricadas a base de materiales que convierten directamente la luz solar en electricidad. Hoy en día, la mayor parte de celdas solares, utilizadas a nivel comercial, son de silicio (símbolo químico: Si). El silicio es lo que se conoce como un semiconductor. Este elemento químico se encuentra en todo el mundo bajo la forma de arena, que es dióxido de silicio (SiO₂), también llamado cuarcita. Otra aplicación del silicio semiconductor se encuentra en la industria de la microelectrónica, donde es empleado como material principal para los circuitos integrados.

Las celdas solares de silicio pueden ser de tipo monocristalinas, policristalinas o amorfas. La diferencia entre ellas radica en la forma de como los átomos de silicio están dispuestos, es decir, en la estructura cristalina. Existe, además, una diferencia en la eficiencia. Por eficiencia se entiende el porcentaje de luz solar que es transformado en electricidad. Las celdas solares de silicio monocristalino y policristalino, tienen casi el mismo y más alto nivel de eficiencia con respecto a las de silicio amorfo.

Durante la última década, se han estado desarrollando nuevos tipos de celdas solares de materiales diversos, entre las que encontramos, por ejemplo, a las celdas de película delgada y a las celdas de CIS (diseleniuro de indio de cobre) y CdTe (teluro de cadmio). Éstas están comenzando a ser comercializadas.

El panel fotovoltaico de este proyecto es de construcción propia, para abaratar costos, y poder experimentar con diferentes materiales, considerando que el acoplamiento en sistema híbrido con el calentador solar debe ser a través de un material con una buena transferencia de calor, mientras cuando los diseños comerciales pueden no ofrecer esta característica.



Fig. 3.2.1. Panel fotovoltaico de 10 W de construcción propia.

El panel es construido con celdas fotovoltaicas de marca rusa “Solar Wind” que ofrece los costos más baratos en el mercado internacional.

Otro panel fotovoltaico que se utilizó durante los experimentos fue un panel comercial Siemens adaptado con una base de cobre para su acoplamiento híbrido. El uso de panel comercial fue tanto para comparar su funcionamiento con el de construcción propia, como para probar el acoplamiento de cobre, en vez del de aluminio y por ultimo, este panel esta garantizado contra granizo y lluvias intensas, esta sellado herméticamente y probablemente tenga una vida mas larga y para uso continuo del sistema (y no solamente para el experimento) presentara una vida más larga.

A continuación se presentan las imágenes del panel Siemens sin y con acoplamiento térmico de cobre.





Fig. 3.2.2. Panel FV Siemens de 10W con el acoplamiento térmico de cobre.

3.3 Baterías

Los controladores de carga posteriormente mencionados trabajan con baterías de ácido-plomo. Estas baterías son las más difíciles de manejar, en cuestiones de ciclos de carga/descarga (curvas mostradas en la figura 3.3.1), por lo cual se deben utilizar los controladores de carga, aumentando drásticamente el tiempo de vida de las baterías. Las baterías, a su vez, son las más baratas en el mercado, considerando sus capacidades altas. Otras de las ventajas de este tipo de baterías son: temperatura ambiente puede exceder los 30 grados centígrados, la batería en si se mantiene fría durante la carga, la batería pierde un 40% de carga en un periodo de un año, mientras cuando las de níquel cadmio lo alcanzan en tres o cuatro meses, la batería no tiene efecto de memoria.

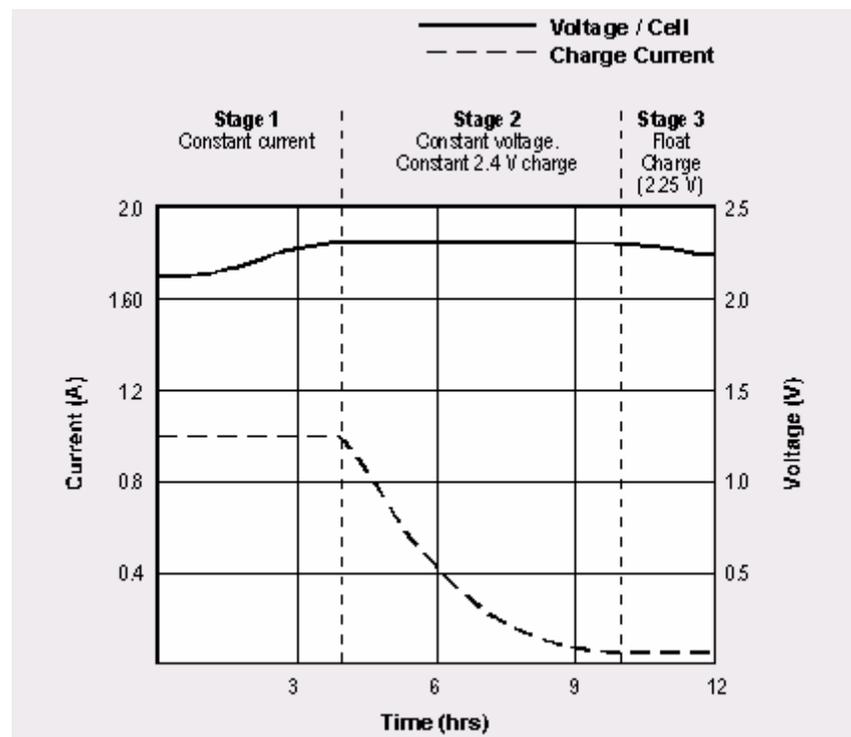


Fig. 3.3.1. Curvas de carga de baterías de ácido-plomo. En la etapa 1 la batería se carga con corriente constante, al saturarse (etapa 2) la corriente disminuye, en la etapa 3 una corriente muy baja compensa la autodescarga.

El tiempo de vida útil de este tipo de baterías es aproximadamente de 3 a 5 años, aunque este tiempo depende mucho de la temperatura ambiente a la que se realiza la carga/descarga. Por ejemplo, una batería que aguanta entre 3 y 5 años a temperatura menor a 30 grados centígrados, puede solamente aguantar 1 año en temperaturas desiertitas alrededor de 42 grados centígrados. El número de ciclos de carga/descarga completa varían entre 200 y 300 aproximadamente.

A continuación se presenta una imagen de la batería que se va a utilizar en el proyecto.



Fig. 3.3.2. Acumulador STEREN BR-1207.

Es una batería sellada marca STEREN modelo BR-1207 de 12V y 7Ah y tiene un costo de 250 pesos. En caso de que la capacidad de almacenamiento no sea suficiente para el horario de movimiento, se utilizan 2 o mas baterías en paralelo. El horario de movimiento se refiere a la frecuencia con que se van a mover los motores (es decir, tiempo de descarga) contra el tiempo de descanso del sistema (y por lo tanto – tiempo de carga). Un ejemplo es 30 segundos de movimiento por 30 minutos de descanso.

3.4 Controlador de carga

Los controladores de carga se encargan de lo siguiente:

- regulación de corriente de carga, para una eficiencia mayor de las baterías
- conexión/desconexión del panel fotovoltaico en la noche para que este no se convierta en carga para las baterías
- ajustes de ciclo de carga con la temperatura ambiente

Ejemplo de un controlador de carga comercial:



Fig. 3.4.1. Controlador de carga Steca theta de 30 Amp.

Este controlador puede manejar tanto baterías de plomo y electrolito líquido, como de electrolito sólido y la potencia de módulos fotovoltaicos se define por la corriente máxima, en este caso de 30A. El controlador cuenta con un sistema de aprendizaje de la curva característica del acumulador. Una vez aprendida, el estado de carga SOC (State Of Charge) se indica con una precisión media de un 10%. El controlador también cuenta con una protección contra sobrecarga. Las sobrecargas pueden dañar seriamente el acumulador. Como las baterías disminuyen un poco su eficiencia con el tiempo, el controlador compensa una parte de esta aumentando la tensión de carga mensualmente.

Los controladores de carga comercialmente disponibles (como el mencionado) cuestan alrededor de 200 dólares. Como una de las finalidades del proyecto es hacerlo económico, otra posible opción es construir nuestro propio controlador de carga.

El siguiente diagrama (fig. 3.4.2) es un esquemático de un controlador de carga muy completo, que hace todas las funciones anteriormente descritas y tiene un costo aproximado de 500 pesos, por los componentes.

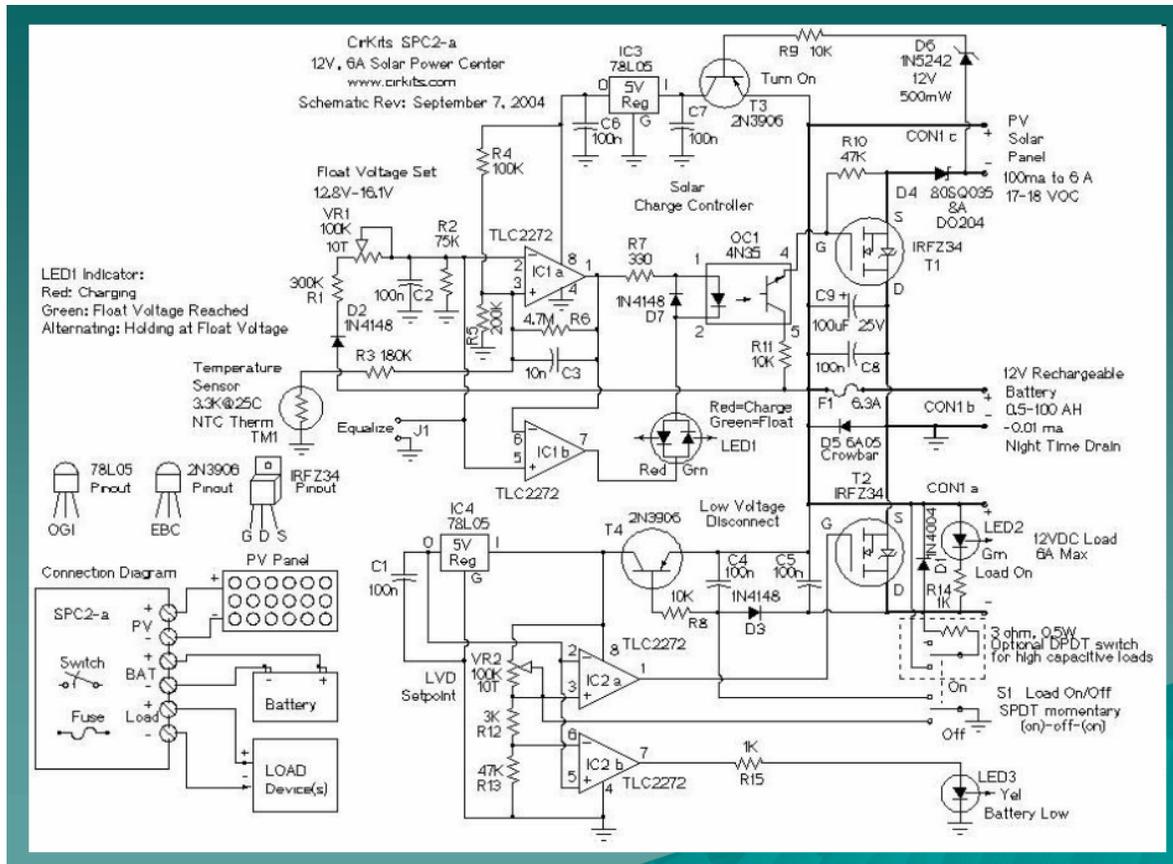


Fig. 3.4.2. Esquemático de controlador de carga de 30 Amp aproximadamente.

3.5 Sensores

Se puede aplicar una de 3 opciones de sensar la luz para la orientación: arreglo de fotorresistencias o fototransistores en “sombriilla”, arreglo en “tubo”, uso de pequeño panel fotovoltaico bifacial perpendicular a la superficie a orientar.

Explicación: Cada una de las sombrillas, o “T”, tiene dos fotorresistencias en la base, de modo que ambas estarán en la sombra solamente siendo la sombrilla orientada directamente hacia la fuente de luz, cualquier declinación provocaría una diferencia de señal en cada par de fotorresistencias.

De manera similar se puede utilizar el arreglo “Tubo”, donde los elementos fotosensibles se colocan dentro de pequeños tubos, de manera que están totalmente iluminados solo cuando se encuentran orientados de la mejor manera. Esta es la opción que se utiliza en pruebas ahora, debido a su implementación más elemental.

El ultimo método es el más laborioso (tanto por el costo del material como por el arreglo para sensar corriente en vez de voltaje), pero no presenta ninguna ventaja aparente.

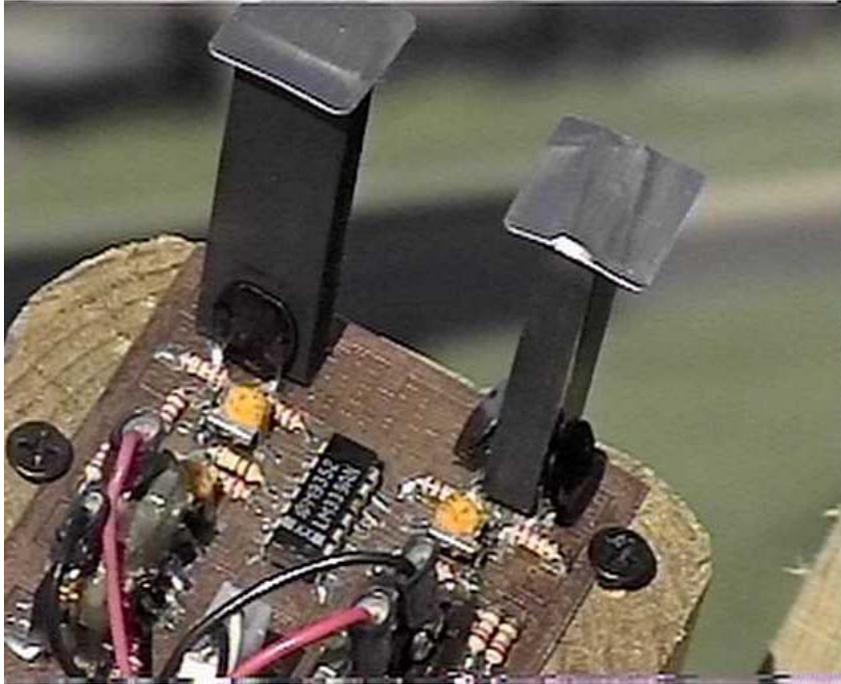


Fig. 3.5.1. Arreglo de sensores en forma de “sombra”.

3.6 Controlador de movimiento

El sistema de orientación automática del panel fotovoltaico (FV) hacia el sol, de 2 ejes, esta basado en un microcontrolador PIC16f877 que cuenta, entre otras cosas, con entradas analógicas y salidas PWM para dos motores.

Cuatro sensores (fototransistores) están acomodados mecánicamente de tal manera que entre un par de sensores (par horizontal o vertical) se detecta la mejor orientación en el eje respectivo. Ambos sensores del mismo par no estarán en la sombra creada por los bordes del mismo panel FV cuando estén en posición de la mejor orientación. Sus señales se leen en el modulo ADC (convertidor analógico a digital) del microcontrolador en cuatro canales diferentes, con una resolución de 8 bits.

Con los valores adquiridos por el ADC se emplea un control proporcional para controlar los 2 motores (uno por cada eje), para mover el panel FV en dirección correspondiente. Los motores cuentan con reductor de revoluciones integrado y se alimentan con una señal PWM (modulación de anchura de pulsos) para reducir el consumo de energía y evitar el calentamiento excesivo de los motores.

Una vez posicionado el panel, el sistema entra al estado de hibernación por un periodo de tiempo X programable y luego se “despierta” cada X tiempo para hacer corrección de posición.

La programación del controlador de movimiento en ensamblador de MICROCHIP se incluye en el anexo II.

3.7 Motores

Recordando que el proyecto pretende ser muy económico, los motores que se utilizarán no se van a comprar, sino se van a utilizar motores previamente cancelados de otros proyectos, probablemente de mecatrónica.

Otra propuesta es utilizar motores de elevadores eléctricos de una camioneta o un coche con vidrios pesados (como el Ford Grand Marquis), estos motores tienen un par elevado, aunque no mucha precisión, pero como la precisión no es un punto crítico en este problema, es probable que hagan un buen desempeño.

Se consiguieron los siguientes dos motores en un deshuesadero de carros. Uno es de una camioneta Ford, otro es de un Grand Marquis.

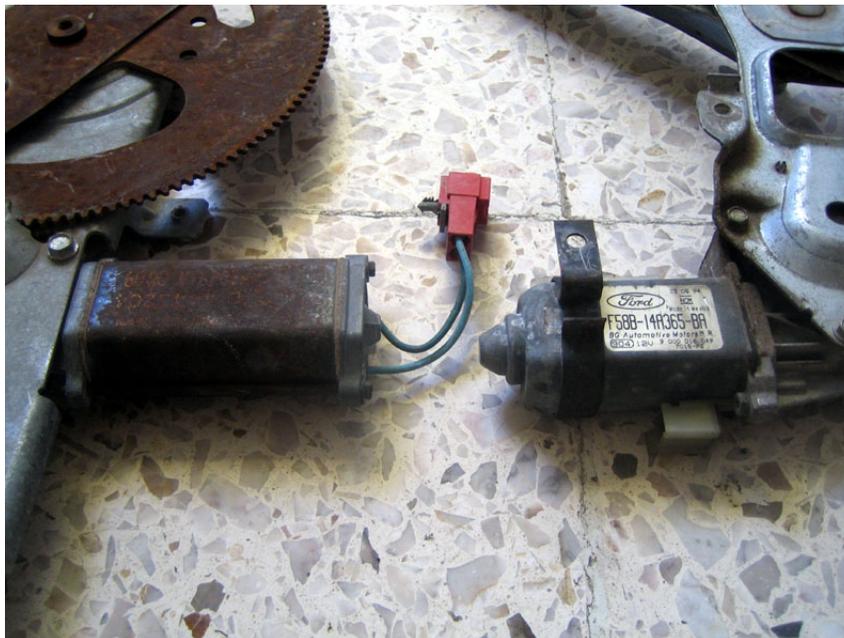


Fig. 3.7.1. Elevadores eléctricos. Motores de 12V con reductor.

- Se utilizaron motores con reductor, en cada eje.
- Debido a movimientos cortos y el manejo de PWM desde el controlador de movimiento, el requerimiento de potencia es bajo.
- El acoplamiento del eje del motor (reductor) con el eje de rotación del sistema puede ser directo o a través de cadenas de transmisión de movimiento.

Después de unas pruebas se determinó que los motores de los elevadores eléctricos aunque pueden mover el armazón del sistema en posiciones medias (sería una posición horizontal – paralelo al plano de la tierra, en la figura 3.8.1), cuando el peso está uniformemente distribuido, pero no podrán mover el armazón desde su posición inicial. Entonces se tienen que instalar motores más potentes para garantizar un buen funcionamiento del sistema.

3.8 Uso de sistemas híbridos

La combinación del panel fotovoltaico y colector solar plano, llamada combi-panel, tiene ventajas en comparación con sus componentes por separado: produce mas energía por unidad de área que el puro panel FV o colector plano.

Existen muchas publicaciones en relación a los sistemas híbridos, sin orientación (como, por ejemplo, (Fernández, 2001; CERN 1978)), tratando los aspectos diferentes de su desempeño. Todos estos trabajos se refieren a los sistemas que incluyen el panel fotovoltaico con un colector solar plano (con aire o agua), considerando las áreas de los dos dispositivos siempre iguales. Pero es evidente que la presencia del panel fotovoltaico arriba del colector reduce un flujo de calor a este colector y también reduce su eficiencia. Por otro lado, la habilidad del colector, de sacar el calor del panel fotovoltaico, será menor cuando el agua (aire) dentro de el esté caliente. Entonces, el caso óptimo será correspondiente a un sistema que consta del panel fotovoltaico con el área menor que el área del colector solar, y la posición del panel tiene que ser arriba de la parte inicial del colector (entrada del agua fría), no considerando aquí los problemas del intercambio de calor entre el panel y el colector solar.

Los acoplamientos comerciales (y el utilizado en el sistema mencionado en antecedentes) usa un acoplamiento total de la parte térmica y la parte fotovoltaica del sistema. Es decir, si una parte tiene área X, la otra va a tener un área X también. Los cálculos de [6] demuestran que el acoplamiento más eficiente para ambas partes del sistema híbrido es cuando la parte fotovoltaica cubre alrededor de 25% del área del colector solar, siendo colocado en la entrada de agua fría.

Esto se demuestra matemáticamente en (Zakharchenko, 2003), pero el resumen del calculo es el siguiente: la potencia total generada por el panel fotovoltaico se puede escribir como

$$P_p = G(1 - R)(1 - \eta)$$

Donde:

G – irradiación solar total

R – coeficiente reflexivo del panel

η – eficiencia de conversión de luz a energía

Este calor se transfiere al colector plano con una eficiencia η_c , que normalmente es entre 50 y 70%. Entonces, considerando que el área del panel fotovoltaico es A_p , y el de colector plano es A_c (ver figura 3.8.1), la energía total obtenida por el colector será de:

$$Wh = G \eta_c [(1 - R)(1 - \eta)A_p + (A_c - A_p)] = G \eta_c A_c [1 - A_p/A_c(R + \eta + R\eta)]$$

Para simplificar la formula, asumimos que la eficiencia del colector solar es igual en todo el área, entonces la eficiencia térmica efectiva será de:

$$\eta_c^* = \eta_c [1 - A_p/A_c(R - \eta - R\eta)]$$

Ahora, la eficiencia del panel FV es normalmente entre 10 y 20% (utilizando silicio cristalino, como en nuestro caso), y el coeficiente de reflexión es de 30-35% (sería menos si el panel FV fuese recubierto con capa antireflejante). Eso nos da que el término $(R - \eta - R\eta)$ está entre 0.2 y 0.6, lo cual puede causar una reducción seria en la transferencia térmica entre el panel FV y el colector si la relación de sus áreas es cercana a 1. Por lo tanto, esta relación debe ser mucho menor que uno. Podemos tomar como consideración que el área del panel FV debe ser no mayor a 25% del área del colector plano.

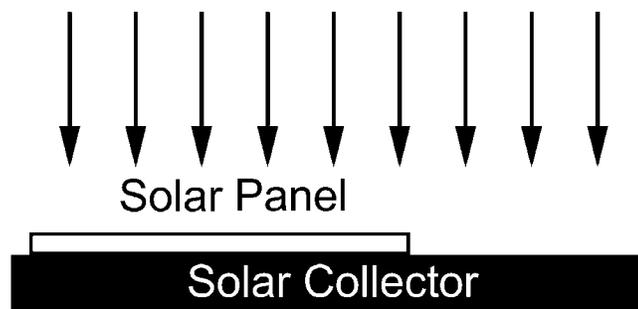


Fig. 3.8.1. Ilustración del acoplamiento híbrido entre panel fotovoltaico y calentador solar plano.

Lo mencionado se puede ejemplificar con las graficas obtenidas de (Gómez, 1997).

En las siguientes graficas (fig. 3.8.2 y 3.8.3) se puede observar el evidente mejoramiento en el funcionamiento tanto del colector solar plano como del panel fotovoltaico acoplados.

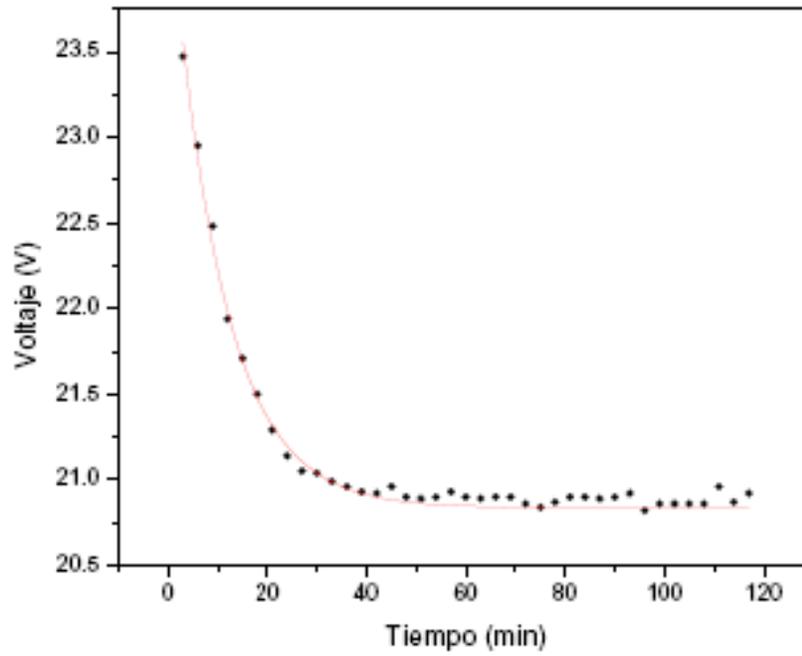


Fig. 3.8.2. Gráfica de Voltaje versus Tiempo para la celda de CIS sin contacto térmico con el colector solar.

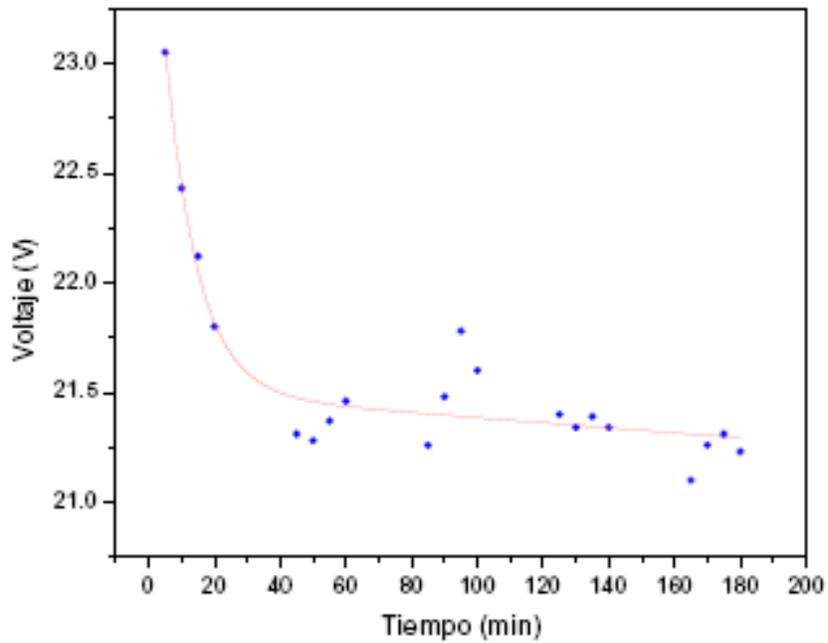


Fig. 3.8.3. Gráfica de Voltaje versus Tiempo para la celda de CIS con contacto térmico.

Se puede observar que el voltaje entregado por la celda en caso acoplado, es ligeramente mayor que en el caso no acoplado. El cálculo de eficiencia muestra las siguientes graficas de comparación (fig. 3.8.4).

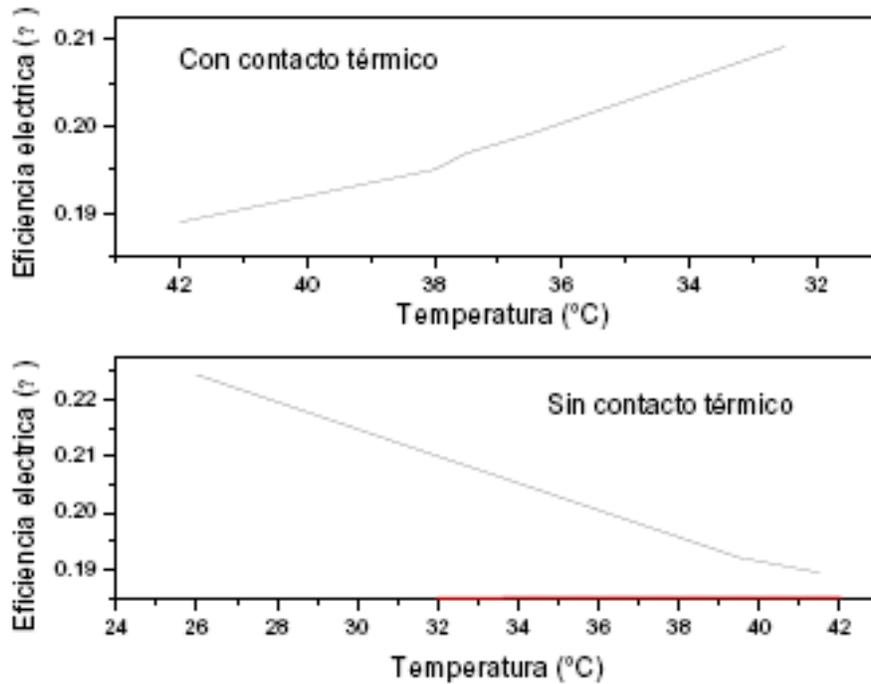


Fig. 3.8.4. Curvas de eficiencia eléctrica de la celda de Silicio con y sin contacto térmico con el colector solar.

El panel utilizado fue el comercial Siemens, hecho de material CuInSe_2 (CIS) durante 120 minutos. La dependencia observada es la clara disminución de eficiencia con el tiempo, durante el cual el panel no acoplado térmicamente con el colector plano, se calienta naturalmente por el sol.

El panel fotovoltaico, así utilizado de su manera más eficiente, proporcionara la energía para cargar las baterías y mover los motores del sistema.

3.9 Experimento

El experimento consiste en la comparación de las mediciones de temperaturas de entrada y salida del calentador solar (ver fig. 3.1.1) a un flujo lento mientras el calentador se está o no se está orientando hacia el sol. Para el experimento se utilizó el pequeño criadero de peces ubicado al lado del invernadero de la Facultad de Ingeniería de la UAQ. El criadero consiste de una alberca pequeña, que, al estar cubierta por una construcción térmica a manera de un invernadero chico, presenta algunas propiedades de un tanque térmico, pero estas son muy bajas, porque el agua esta rodeado de paredes de tierra, a la cual se le transmite el calor de agua y por ende la capacidad de almacenamiento de calor tiene un periodo de tiempo corto. El volumen de agua utilizado en el experimento fue de 2 metros cúbicos aproximadamente. El tanque originalmente tenía una bomba centrífuga que entregaba un flujo de 20 litros por minuto, pero se descomposo. Entonces se instaló otra bomba, mucho mas potente, que entrega 240 litros por minuto. La necesitas para el experimento marca flujos mucho mas pequeños que se lograron con una válvula en la salida de la bomba. El flujo óptimo para mayores eficiencias del calentador solar, es de 1 litro por minuto aproximadamente.

La capacidad de un calentador, de los calentadores del invernadero, es de diez litros. Cada uno de los tres calentadores (con uno de los cuales se hizo el experimento) esta combinado de 2 colectores solares planos de 5 litros de capacidad, cada uno. Con el flujo mencionado de un litro por minuto, el calentador se llena al máximo de su capacidad en 10 minutos. Este es el tiempo óptimo para calentar el agua que esta circulando dentro del calentador. La temperatura máxima de salida de este tipo de calentadores dificilmente sobrepasa los 60 grados (ver tabla 3.3.1), y durante el tiempo de 10 minutos se logra calentar a esta temperatura. Un flujo más lento no presentaría ventajas en temperatura de salida de calentador, un flujo mas rápido disminuiría el tiempo de circulación del agua dentro del calentador y bajaría su temperatura de salida.

El tanque de almacenamiento se conecta por una manguera a la entrada (el extremo bajo) del calentador, luego el agua va llenando el calentador hasta su capacidad total y sale (en un extremo alto del calentador) por otra manguera, que regresa el agua al tanque de almacenamiento. Hay que considerar que el agua que estaba recirculando en el experimento es agua altamente contaminada de algas, las cuales han tapado algunas de las líneas de circulación del calentador a lo largo de tiempo de usos pasados y la capacidad real del calentador se vió afectada. Por otro lado la temporada del año en curso se caracteriza por un sol bajo, en comparación, por ejemplo, con el solsticio de verano. Por estas causas la temperatura máxima alcanzada durante el experimento fue de 53 grados centígrados, contra los 60 posibles (ver tabla 3.3.1).

Entonces, el diagrama de movimiento (del calentador de la fig. 3.1.1) se puede ver en la fig. 3.9.1. Aunque en el diagrama se ilustra un solo eje de movimiento (horizontal), el sistema tiene otro eje de orientación – vertical. Es decir, el sistema además se mueve respecto a su base vertical, que en el diagrama se representa como el poste gris.

Las dos diagonales (negra i gris, perpendiculares) con dos posiciones extremas del calentador plano sobre el armazón del sistema. En el extremo izquierdo del calentador en la posición marcada en negro, se posiciona el modulo de sensores de luz descritos anteriormente. Conforme el sol cambia de posición, los sensores detectan este cambio y le comunican una señal de diferencia al controlador de movimiento. Para cada eje de orientación hay dos sensores. Cuando entre un par de sensores no hay diferencia de señal, entonces el panel está orientado perpendicularmente al vector de los rayos solares, es decir, orientado directamente el sol, sobre el eje en cuestión. Cuando el sol cambia de posición, surge una diferencia de señal entre el par de sensores y el controlador de movimiento manda una señal PWM al motor asignado a mover el respectivo eje de orientación, hasta que esta diferencia en señal se haga cero y el panel otra vez esté bien orientado. El ciclo de ajuste de posición es de 30 minutos de espera por 30 segundos de movimiento. De esta manera los acumuladores juntan suficiente energía para mover los motores durante un corto periodo de tiempo.

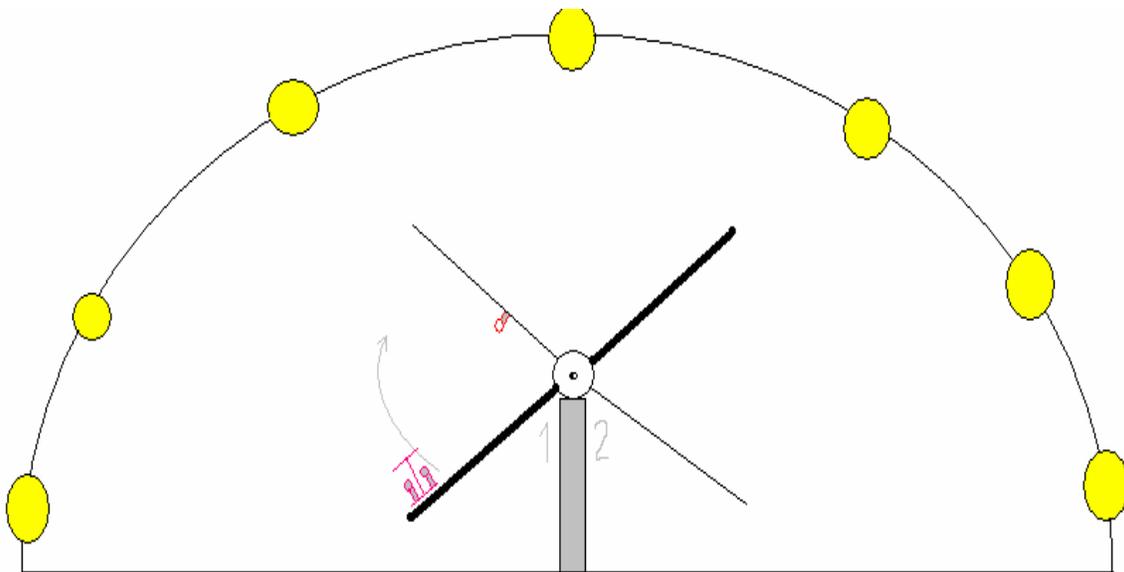


Fig. 3.9.1. Diagrama de movimiento de calentador solar plano con sistema de orientación automática hacia el sol.

Al finalizar el día, el calentador plano acaba en la posición mostrada como segunda (gris) en el diagrama. Durante la noche el controlador de carga desconecta los motores y el circuito de controlador de movimiento, de la batería acumuladora, para que estos no se conviertan en carga y la batería no se descargue durante la noche, así dejando energía suficiente para regresar el calentador a la posición inicial con el amanecer. El arreglo de sensores puede quedar en una posición oculta para el sol, cuando este salga, entonces debajo de la superficie del calentador se coloca otro sensor especialmente para detectar el sol mañanero. Durante el día y con el sistema correctamente orientado, este sensor se quedará siempre en la sombra, y solamente en la mañana detectara a los rayos solares, junto con el

momento cuando el controlador de carga habilite otra vez los circuitos y el sistema se moverá hacia su posición inicial y continuará el ciclo de movimiento diurno.

Capítulo 4

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Las mediciones se hicieron durante el día 29 de Octubre de 2006 y fue repetido el día 19 de Noviembre. Ambos fueron días asoleados, sin una sola nube en el cielo, lo cual brindó un ambiente casi perfecto para el experimento, a excepción de un ligero viento cambiante, un poco mas fuerte en la segunda medición, que afectó un poco la homogeneidad de los resultados. De acuerdo al horario de invierno, el sol salió a las 7:00 horas, aunque la propia sombra del invernadero no permitió que el calentador se asoleara por completo hasta las 7:40 horas. Las mediciones se hicieron cada quince minutos hasta el atardecer. Los resultados detallados se pueden ver en el apéndice I. Las mediciones del segundo experimento fueron afectados más por los vientos fríos de la mitad de noviembre, por lo que van a utilizarse los resultados del primer experimento. Los vientos fríos excesivos fueron causados por el aumento de humedad en el Océano Pacífico y los choques con las frentes frías provenientes de Estados Unidos, lo cual no representa una situación común, por lo que se considerará como una excepción.

A continuación, en la fig. 4.1, se puede observar la gráfica de temperaturas de entrada y salida del calentador con orientación automática. La curva rosa (marcada con cuadros) es la temperatura de salida del calentador. La curva azul (marcada con rombos) es la temperatura de entrada, es decir, temperatura del tanque de almacenamiento. La curva amarilla (marcada con triángulos) es la diferencia de estas temperaturas. Se puede observar que las crestas de la subida son más pronunciadas que las de la bajada, lo cual no se observaba con las mediciones del panel fotovoltaico en el experimento previo (cap. 2, fig. 2.1.4). Esto se explica de la manera siguiente: las celdas fotovoltaicas no tienen un efecto de almacenamiento de energía, y su entrega a lo largo del día es directamente proporcional a la radiación que recibe. Entonces, como el movimiento del sol en el cielo y su radiación es directamente proporcional a su momento del día, el máximo se alcanza a la una de la tarde, aproximadamente, y desde este punto hacia el amanecer como hacia el atardecer, la disminución es simétrica, por ende

la entrega de energía eléctrica es simétrica. Para el caso del calentador de agua la situación cambia. Se tiene un tanque de almacenamiento de agua, que, aunque no es un tanque térmico ideal, presenta tales características que la temperatura en él tiende a conservarse durante periodos cortos de tiempo. Por lo tanto después de las temperaturas máximas durante el día, el agua en el tanque se mantiene caliente y la cresta de disminución en la grafica se ve menos pronunciada que la cresta de crecimiento de temperatura.

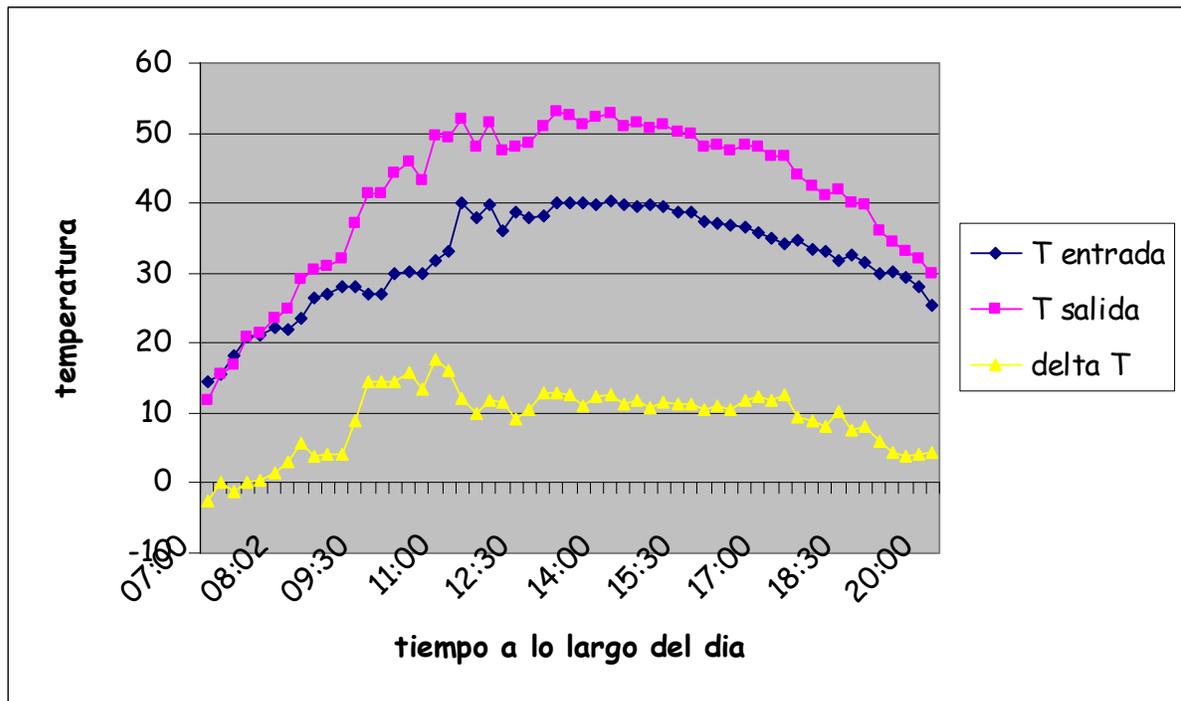


Fig. 4.1. Gráfica de temperaturas de salida, entrada y diferencia entre estas, del calentador plano **con** orientación.

La primera medición, en la misma gráfica, muestra una diferencia negativa entre temperaturas. Esto se debe a que durante la noche el calentador, siendo un cuerpo negro, irradia al máximo toda su energía y, entonces, en la mañana su temperatura es menor que la temperatura del agua en el tanque de almacenamiento y durante el primer ciclo de pasada del agua y por ende el calentador en vez de calentar esa primera porción de agua, la enfría. Luego el agua ligeramente tibia pasa por el calentador, elevando un poco su temperatura, mientras el calentador va recibiendo poco a poco los primeros rayos del sol (aunque sea indirectas, ya que, como se mencionó antes, el calentador no se asoleaba directamente hasta las 7:40 horas) y la segunda medición muestra una diferencia de temperaturas igual a cero. Desde ahí, la diferencia va creciendo.

En algunos momentos la suavidad de las curvas se ve afectada por causas del viento. El área del calentador es grande, y contra direcciones específicas de viento, el calentador puede encontrarse en cualidad de vela, de esta manera recibiendo un flujo grande de viento que por supuesto disminuye rápidamente su eficiencia instantánea. Se sugeriría el uso de un tanque térmico para evadir este efecto un poco.

En la siguiente gráfica (fig. 4.2) se muestran las mismas mediciones (primera curva marcada con x – temperatura de entrada, segunda curva marcada con asteriscos – temperatura de salida, tercera curva marcada con círculos – diferencia de temperaturas), pero con el calentador sin orientación automática, siendo orientado fijamente hacia el sur a 45 grados (inclinación fija recomendada para temporadas invernales).

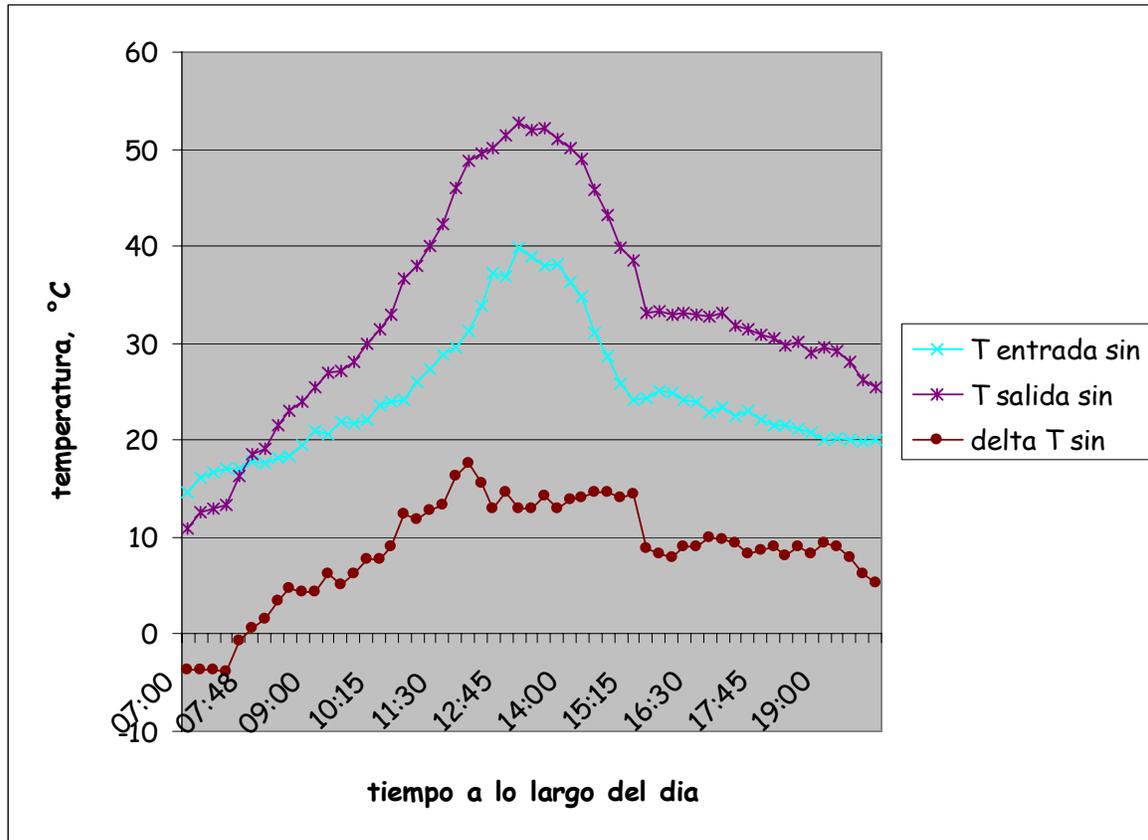


Fig. 4.2. Gráfica de temperaturas de salida, entrada y diferencia entre estas, del calentador plano **sin** orientación.

En la grafica se puede observar la misma tendencia de las crestas y la misma dependencia de horas tempranas de la mañana, pero lo que se observa desde el primer momento es que el área bajo las curvas de temperatura, tanto de entrada como de salida, es mucho menor, es decir, la energía de entrega es menor que en caso de orientación.

En la siguiente gráfica (fig. 4.3) se podrá ver la comparación de las dos anteriores. El orden y la marcación de las curvas es el mismo que en las dos gráficas anteriores. Se puede observar que el máximo de temperatura ocurre a la una de la tarde y que en este momento las temperaturas tanto de entrada como de salida del colector solar coinciden en los casos con y sin orientación. Esto concuerda con lo anteriormente obtenido para la celda fotovoltaica (cap. 2, fig. 4.1.4), pero las diferencias antes y después de este momento en el día marcan la eficiencia del sistema. Se puede notar que la diferencia entre las temperaturas de entrada y salida con y sin orientación es prácticamente igual. La eficiencia instantánea,

como fue mencionado en cap. 3.8, es directamente proporcional a esa diferencia de temperaturas, pero como se mencionó en el mismo capítulo, la eficiencia útil que presenta el interés, debe ser en función a la temperatura máxima obtenida, ya que en un sistema con un buen tanque térmico, esa temperatura es la que se va a mantener durante una buena parte del día.

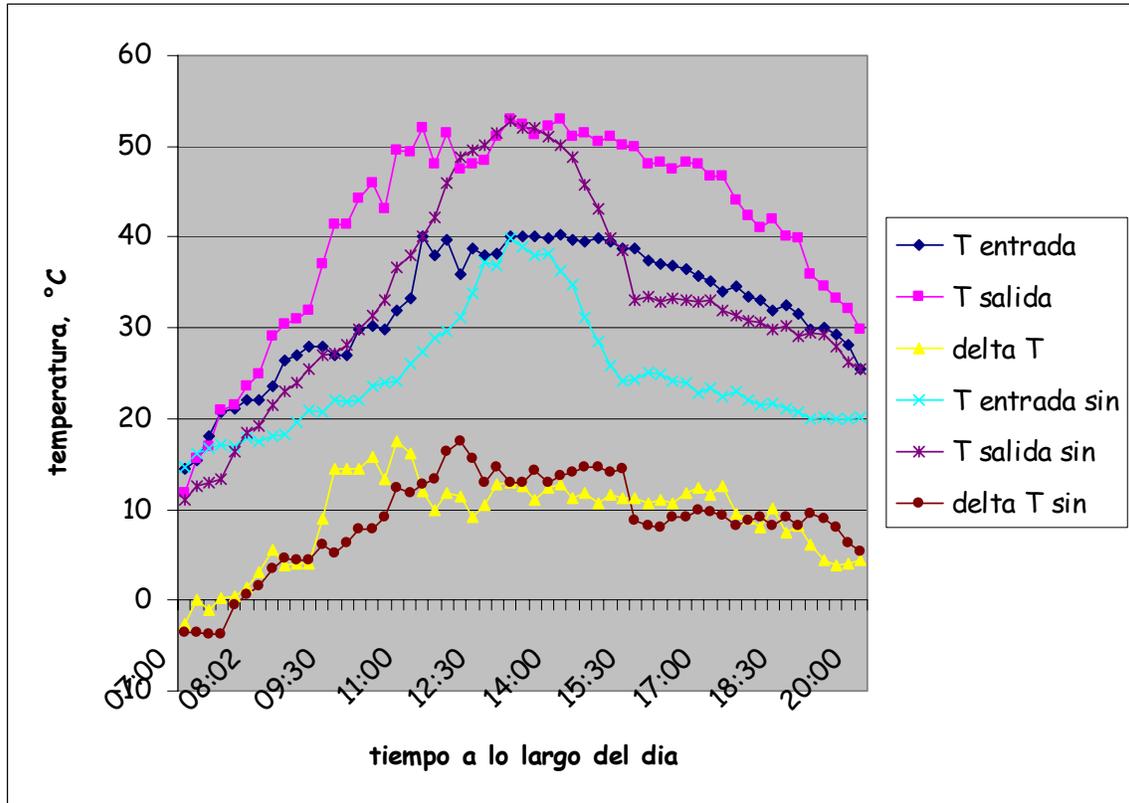


Fig. 4.3. Gráfica de temperaturas de salida, entrada y diferencia entre estas, del calentador plano **con** y **sin** orientación.

En base a la eficiencia útil se construyó la siguiente grafica (fig. 4.4). El área mayor es la eficiencia con orientación, el área menor es la eficiencia sin orientación. La diferencia de estas dos áreas marca la eficiencia pura del sistema de orientación (es decir, el aumento de eficiencia de un sistema en comparación con el otro). Esta diferencia se puede ver en la fig. 4.5. Se ve que en el medio día la eficiencia pura llega tener valores negativos, eso se debe a las condiciones del viento al hacer las mediciones de temperatura con y sin orientación, en momentos cuando esa temperatura casualmente llegó a ser mayor en caso sin orientación respecto al caso con orientación. Pero donde se esperaba más el aumento de la eficiencia, fue en las crestas de subida y bajada. Y tal como se esperó, hubo mayores aumentos durante el crecimiento, que durante el decrecimiento debido a las propiedades térmicas del estanque del agua. Calculando el porcentaje de aumento de eficiencia mostrada en la fig. 4.5 en comparación con sistema sin orientación, obtenemos el valor de 27%. Es ligeramente menor que el esperado, aun considerando la temporada de la medición. Pero discutiendo este resultado se puede proponer otro concepto de eficiencia para nuestro caso.

Si se considera, por ejemplo, un sistema de uso domestico, se puede ver que lo que le importa al usuario, es la temperatura final con la que sale el agua y no la diferencia entre las temperaturas del sistema con o sin orientación. Teniendo un tanque térmico esa temperatura máxima obtenida durante todo el día se conserva hasta tardes horas de la noche.

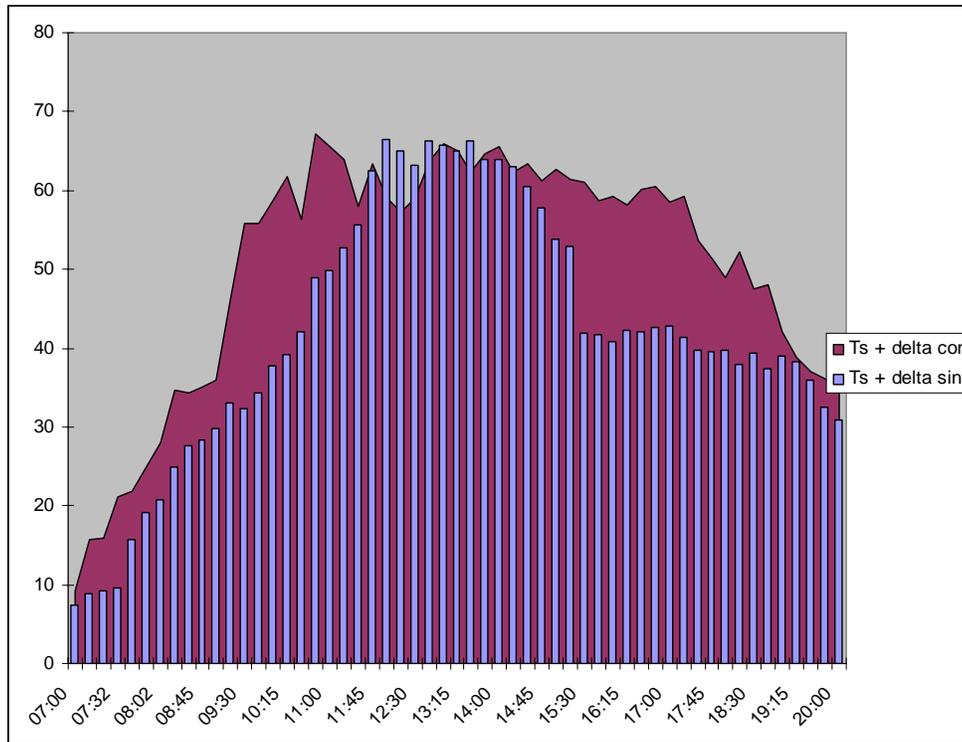


Fig. 4.4. Gráfica de la eficiencia útil

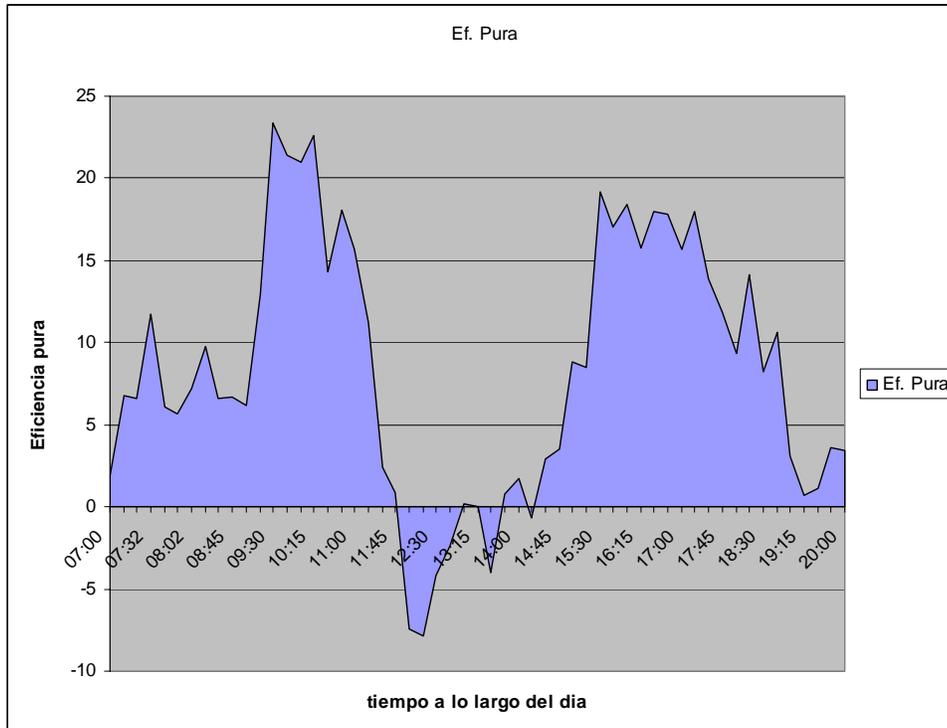


Fig. 4.5 Eficiencia pura del sistema de orientación.

Desde este punto de vista práctico se puede recalculer el aumento de eficiencia en base solamente a temperaturas de salida del calentador del sistema con y sin orientación. Es decir, ya no calculamos la eficiencia del colector plano en sí, sino el puro aumento de temperatura final, debido a la orientación. Y el valor obtenido es de 49%. Este valor no tiene en cuenta la diferencia de temperaturas de entrada y salida del calentador, en base a la cual se calcula la eficiencia instantánea (formula III.5), pero para el usuario final este valor es el que da la mayor importancia. Lo que mide el usuario es la temperatura de la regadera y se nota claramente que con el sistema orientado se obtiene un porcentaje de aumento de temperatura (a lo largo de todo el día) mucho más alto que en el caso de orientación de un sistema puramente fotovoltaico, en el cual se le media la eficiencia de la pura celda fotovoltaica, como fue supuesto en la hipótesis. Cabe recordar que las mediciones fueron hechas durante una temporada relativamente fría del año y para la totalidad de los resultados se recomendaría repetir el experimento en otras temporadas, y por otro lado, los calentadores de agua que se utilizaron no estaban en sus condiciones óptimas y por ende seguramente mostraron un desempeño menor al garantizado con los equipos nuevos.

Observación: durante el experimento se notó que el viento afectaba notablemente el trabajo del calentador. Se sugiere que para experimentos posteriores se utilice un modelo de colector con capa de vidrio o acrílico que protegerá la tubería interna del colector contra las ráfagas.

Bibliografía

Tripanagnostopoulos Y., Nousia Th., Souliotis M. and Yanoulis P. Hybrid photovoltaic/thermal solar systems. *Solar Energy* 72 (2002), 217-234.

Fernández A.M., R. N. Bathachayra and J. A. Turner, Proceedings XXV Semana Nacional de Energía Solar, I (2001) 273-276.

Gómez L., “Aplicaciones de la Tecnología Fotovoltaica”. II Panel de Energía Solar '97, (1997).

Kern Jr. E. C. and Russel M.C. Combined photovoltaic and thermal hybrid collector systems. *Proceedings 13th ISES Photovoltaic Specialists*, Washington D.C., USA, (1978), pp. 1153-1157.

Raghuraman P. Analytical predictions of liquid and air photovoltaic/thermal flat plate collector performance. *J. Solar Energy Engineering* 103 (1981), pp. 291-298.

Zakharchenko R., L. Licea-Jiménez, S.A. Pérez-García, P. Vorobiev, U. Dehesa-Carrasco, J.F. Pérez-Robles, J. González-Hernández, Yu. Vorobiev. “Photovoltaic solar panel for the hybrid pv/thermal system”. 2003 International Material Research Congress in Cancún.

Material proporcionado por CENAM (Centro Nacional de Metrología), 2002.

Vorobiev Pavel, Gilberto Herrera Ruiz, Yuri V. Vorobiev, “Evaluación Teórica Y Experimental De Recaudación De Energía Solar Con Y Sin Orientación Automática Del Panel Fotovoltaico Y Del Colector Solar Plano”, Primer Congreso Internacional de Ingeniería, UAQ, 2005

Martínez R., Strevel, J.J. Flores Prieto, "Notas del Curso Especializado de Colectores Solares Planos". XXV Semana Nacional de Energía Solar. San Luis Potosí, S.L.P. 1 al 5 de Octubre 2001

Licea Jiménez Liliana, “Investigación de un sistema acoplado de calentadores planos y un sistema fotovoltaico haciendo uso de energía solar”, tesis de maestría, CINVESTAV Querétaro, 2003

ANEXO I

Tiempo	T entrada	T salida	delta T	T entrada sin	T salida sin	delta T sin
07:00	14.5	11.9	-2.6	14.6	11	-3.6
07:15	15.5	15.6	0.1	16.1	12.5	-3.6
07:25	18.1	17	-1.1	16.7	13	-3.7
07:32	20.8	21	0.2	17.1	13.3	-3.8
07:40	21.1	21.5	0.4	17	16.4	-0.6
07:48	22.1	23.5	1.4	17.8	18.5	0.7
08:02	22	25	3	17.6	19.2	1.6
08:15	23.5	29.1	5.6	18.1	21.5	3.4
08:30	26.5	30.4	3.9	18.3	23	4.7
08:45	27	31	4	19.5	23.9	4.4
09:00	28	32	4	21	25.4	4.4
09:15	28	37	9	20.7	26.9	6.2
09:30	27	41.4	14.4	22	27.2	5.2
09:45	27	41.4	14.4	21.8	28.1	6.3
10:00	29.9	44.3	14.4	22.1	29.9	7.8
10:15	30.2	46	15.8	23.6	31.4	7.8
10:30	29.8	43.1	13.3	23.9	33	9.1
10:45	31.9	49.5	17.6	24.2	36.6	12.4
11:00	33.2	49.4	16.2	26.1	38	11.9
11:15	40	52	12	27.4	40.1	12.7
11:30	38	48	10	28.8	42.2	13.4
11:45	39.7	51.5	11.8	29.6	46	16.4
12:00	36	47.5	11.5	31.2	48.8	17.6
12:15	38.8	48	9.2	33.9	49.5	15.6
12:30	38	48.5	10.5	37.2	50.2	13
12:45	38.2	51	12.8	36.8	51.5	14.7
13:00	40.1	53	12.9	39.9	52.8	12.9
13:15	40	52.5	12.5	39	52	13
13:30	40.1	51.2	11.1	37.9	52.1	14.2

13:45	39.9	52.3	12.4	38.1	51	12.9
14:00	40.2	52.9	12.7	36.3	50.1	13.8
14:15	39.7	51	11.3	34.8	48.9	14.1
14:30	39.6	51.5	11.9	31.1	45.8	14.7
14:45	39.9	50.6	10.7	28.6	43.2	14.6
15:00	39.5	51.1	11.6	25.9	39.9	14
15:15	38.8	50.1	11.3	24.1	38.5	14.4
15:30	38.7	49.9	11.2	24.3	33.1	8.8
15:45	37.5	48.1	10.6	25.1	33.4	8.3
16:00	37.1	48.2	11.1	24.9	32.9	8
16:15	36.9	47.5	10.6	24.1	33.2	9.1
16:30	36.5	48.3	11.8	23.9	33	9.1
16:45	35.7	48.1	12.4	22.9	32.8	9.9
17:00	35.1	46.8	11.7	23.4	33.1	9.7
17:15	34.1	46.7	12.6	22.5	31.9	9.4
17:30	34.6	44.1	9.5	23.1	31.4	8.3
17:45	33.5	42.4	8.9	22.1	30.8	8.7
18:00	33	41	8	21.5	30.6	9.1
18:15	31.9	42	10.1	21.6	29.8	8.2
18:30	32.5	40	7.5	21.1	30.2	9.1
18:45	31.6	39.8	8.2	20.8	29.1	8.3
19:00	29.9	36	6.1	20	29.5	9.5
19:15	30.1	34.5	4.4	20.2	29.2	9
19:30	29.3	33.2	3.9	20	28	8
19:45	28.1	32.1	4	19.9	26.2	6.3
20:00	25.5	29.9	4.4	20.1	25.5	5.4

ANEXO II

```
include "P16f877.INC"
LIST P=PIC16f877

aux equ 0x20
i equ 0x21
j equ 0x22
k equ 0x23
adq0 equ 0x24
adq1 equ 0x25
adq2 equ 0x26
w_tem equ 0x27
sta_tem equ 0x28
pcl_tem equ 0x29
CCPR3L equ 0x2A
error1 equ 0x2B
aux01 equ 0x2C
contbif equ 0x2D
regbif equ 0x2E
espbif equ 0x30
errorA equ 0x31
erraux equ 0x3D
kd equ 0x3E
errorD equ 0x3F
kp equ 0x40
errorp equ 0x41

org 0x00 ;vector reset
goto main

;/** rutina de interrupciyn **/
org 0x04 ;vector y subrutina de interrupciyn
movwf w_tem ;salva entorno, acumulador y
status
swapf STATUS,w
clrf STATUS
movwf sta_tem ;salvamos entorno, acumulador y
status
movf PCLATH,w
movwf pcl_tem ;salvamos entorno, acumulador y
status
; /** algoritmo de control **/ el adq01 es a la
derecha si el valor es bajo

call ctrID
```

```

        clrwdt

;   ///*** se reestablece entorno ***///
sinter:  movlw    0xF5
        movwf    TMR0
        bcf     INTCON,T0IF
        movf    pcl_tem,w ;reestablece el entorno, acumulador y
status
        movwf    PCLATH
        swapf    sta_tem,w ;salavmos el entorno, acumulador
        movwf    STATUS
        swapf    w_tem,f      ;salavmos el entorno, acumulador
        swapf    w_tem,w      ;salavmos el entorno, acumulador
        retfie

conf:    macro
        nop
        bcf     STATUS,RP0
        clrf   PORTA
        clrf   PORTB
        clrf   PORTC
        clrf   PORTD
        clrf   PORTD
        clrf   PORTE

;   ****///CONFIGURACION DE LOS CONVERTIDORES
PWM'S PUERTOS Y TMR0 ///****
        bsf     STATUS,RP0
        movlw   0xE0
        movwf   INTCON
        movlw   0x00
        movwf   OPTION_REG-80h
        clrf   ADCON1-80h
        movlw   0xEF      ;B'11101111' RA4 como salida y las
demas como entradas analogicas
        movwf   TRISA-80h
        movlw   0x83      ;B'10000011'
        movwf   TRISB-80h ;los seis bits altos como salida
        movlw   0xF0      ;11110000
        movwf   TRISC-80h ;los cuatro bits altos como entradas
        movlw   0xFE
        movwf   PR2-80h   ;tiempo del timer 2 para la
duraciyn del PWM
        movlw   0xFF      ;B'11111111'
        movwf   TRISD-80h ;los 8 bits como entrada
        movlw   0xFF      ;B'11111111'
        movwf   TRISE-80h ;los tres convertidores como entradas
        bcf     STATUS,RP0

```

```

movlw      0x01
movwf      TMR0
bcf  INTCON,T0IF
clrf  CCPR1L
clrf  CCPR2L
clrf  CCPR3L
clrf  PORTA
clrf  PORTB
clrf  PORTC
clrf  PORTD
clrf  PORTE
clrf  aux01
movlw      0x0C
movwf      CCP1CON      ;configuracion como PWM
movlw      0x0C
movwf      CCP2CON      ;configuracion como PWM
movlw      0x06
movwf      T2CON        ;conf. del timer 2 con pstcaler
1:1 y prescaler 1:4
movlw      0x41          ;b'01000001'
movwf      ADCON0        ;FOSK/8,CH0,GO/ DONE=0,ADON=1
clrf  CCPR1L
clrf  CCPR2L
clrf  CCPR3L
movlw      0xF0
movwf      PORTB
; call retar
; call retar
; call retar
endm

```

```

main:      conf
          clrf  CCPR2L
          clrf  CCPR1L
          call re
          call re
          call re
          movlw 0x00
          movwf PORTB
min01:    call conv
; movf adq0,w ;la rutina ctrvel se encarga de esto
          movwf CCPR2L
          bsf  PORTB,5
          goto min01

```

```

ctrID:    movlw 0x00

```

```

    movwf    aux01
    movlw   0x08
    movwf   kd
    movlw   0x02
    movwf   kp
    call    cvel
    call    wino
    btfsc   aux01,0
    goto    s01
    movf    adq2,w
    subwf   adq1,w
    btfss   STATUS,C
    goto    erne
    movwf   error1
    bcf     PORTB,3
    bsf     PORTB,4
    GOTO    salmot
erne:     movf    adq1,w
          subwf   adq2,w
          movwf   error1
          bcf     PORTB,4
          bsf     PORTB,3
salmot:   call    deriva
          call    gananc
          movf    error1,w
          movwf   errorp
          call    prop
          call    suma
salctr:   movf    errorp,w
          movwf   CCP1L
s01:     return

suma:     movf    errord,w
          addwf   errorp,1
;         btfss   STATUS,C
sals:     return

prop:     movf    errorp,w
          addwf   errorp,1
          decfsz  kp,1
          goto    prop
;         movlw   0xA0
;         subwf   errorp,w
;         btfsc   STATUS,C
;         goto    salp
;         movlw   0xA0
;         movwf   errorp

```

```

salp:      return

gananc:   movf errord      ,w
          addwf      errord,1
          decfsz     kd,1
          goto      gananc
;         movlw      0xA0
;         subwf      errord,w
;         btfsc      STATUS,C
;         goto      salp
;         movlw      0xA0
;         movwf      errord
salsmt:   return

cvel:     movf error1,w
          movwf      erraux
;         rlf      erraux,f
          movlw      0x35
          subwf      erraux,w
          btfss      STATUS,C
          goto      cvell
          movlw      0x40
          subwf      adq0,w
          movwf      CCPR2L
          goto      velsal
cvell:    movf erraux,w
          subwf      adq0,w
          movwf      CCPR2L
velsal:   return

wino:     movf adq2,w
          subwf      adq1,w
          btfss      STATUS,C
          goto      win00
          movf adq2,w
          subwf      adq1,w
          movwf      error1
          movlw      0x04      ;banda muerta de accion del
controlador para lado izquierdo
          subwf      error1,w
          btfsc      STATUS,C
          goto      winout
          movlw      0x00
          movwf      CCPR1L
          bsf      aux01,0
          goto      winout

```

```

win00:    movf adq1,w           ;ventana para lado derecho
          subwf adq2,w
          movwf error1
          movlw 0x05           ;banda muerta de accion del
controlador
          subwf error1,w
          btfsc STATUS,C
          goto winout
          movlw 0x00
          movwf CCPR1L
          bsf aux01,0
winout:   return

deriva:   movf error1,w
          movwf errorord
          subwf errorA,w
          btfss STATUS,C
          goto derneg
          addwf errorord,f
          goto dersal
derneg:   movf errorA,w
          subwf errorord,w
          addwf errorord,f
dersal:   movf errorord,w
          movwf errorA
          return

;sal_pb   btfsc PORTC,7
;         goto sal01
;         movf contbif,w       ;nuevo puerto alto C a alto B
;         movwf aux
;         goto sal02
;         sal01: swapf contbif,w ;nuevo puero alto C a alto
B
;         movwf aux
;sal02:   movlw 0xF0
;         andwf aux,f
;         movf PORTB,w
;         andlw 0x0F
;         iorwf aux,w
;         movwf PORTB
;         return

```

;hace la conversion de los 8 canales A/D

```

conv:    movlw    0x81        ;seleccionamos convertidos 0
        movwf    ADCON0
        call     re
        bsf     ADCON0,GO_DONE
c0:    btfsc     ADCON0,GO_DONE ;indica si la conversion esta
lista
        goto     c0
        movf    ADRESH,w
        movwf    adq0
        movlw   0x89        ;seleccionamos convertidor1
        movwf    ADCON0
        call     re
        bsf     ADCON0,GO_DONE
c1:    BTFSC     ADCON0,GO_DONE
        goto     c1
        movf    ADRESH,w
        movwf    adq1

        movlw   0x91        ;seleccionamos convertidor 2
        movwf    ADCON0
        call     re
        bsf     ADCON0,GO_DONE
c2:    btfsc     ADCON0,GO_DONE
        goto     c2
        movf    ADRESH,w
        movwf    adq2

;    movlw    0x99        ;selccionamos convertidor 3
;    movwfd   ADCON0
;    call     re
;    bsf     ADCON0,GO_DONE
;c3:    btfsc     ADCON0,GO_DONE
;    goto     c3
;    movf    ADRESH,w
;    movwf    adq3

;    movlw    0xA1        ;seleccionamos convertidor 4
;    movwf    ADCON0
;    call     re
;    bsf     ADCON0,GO_DONE
;c4:    btfsc     ADCON0,GO_DONE
;    goto     c4
;    movf    ADRESH,w
;    movwf    adq4

;    movlw    0xA9        ;seleccionamos convertidor 5
;    movwf    ADCON0

```

```

;   call re
;   bsf  ADCON0,GO_DONE
;c5: btfsc      ADCON0,GO_DONE
;   goto c5
;   movf ADRESH,w
;   movwf      adq5

;   movlw      0xB1      ;seleccionamos convertidor 6
;   movwf      ADCON0
;   call re
;   bsf  ADCON0,GO_DONE
;c6: btfsc      ADCON0,GO_DONE
;   goto c6
;   movf ADRESH,w
;   movwf      adq6

;   movlw      0xB9      ;seleccionamos convertidor 7
;   movwf      ADCON0
;   call re
;   bsf  ADCON0,GO_DONE
;c7: btfsc      ADCON0,GO_DONE
;   goto c7
;   movf ADRESH,w
;   movwf      adq7

      return

re:  movlw      0x04
      movwf      k
rel: nop
      decfsz     k,f
      goto rel
      return

      end

```

Evaluación teórica y experimental de recaudación de energía solar con y sin orientación automática del panel fotovoltaico & colector solar plano

Experimental and theoretical evaluation of the solar energy
Collection by tracking and non-tracking photovoltaic panel & plane solar collector

P. Vorobiev¹, G. Herrera Ruiz¹, Y. Vasilievitch Vorobiev²

¹Universidad Autónoma de Querétaro

²Unidad Querétaro del CINVESTAV

Resumen. La base de la investigación realizada fue el estudio de variaciones diarias de la intensidad de radiación solar en condiciones de Querétaro, México, con latitud del norte cercana a 23°. Estas variaciones fueron encontradas experimentalmente durante el tiempo del solsticio de verano (22 de Julio) cuando la posición del sol en la tarde a esta latitud es prácticamente vertical, en el tiempo del equinoccio y del solsticio del invierno. Para el estudio experimental, un panel solar fotovoltaico con el sistema original de orientación al sol de dos ejes fue usado, sin concentrador de radiación. Para estimar el efecto de orientación, fue realizada una comparación de datos obtenidos contra los registrados por el panel inmóvil, el ultimo siendo orientado de la manera mas provechosa. El panel usado fue ensamblado de celdas de Si cristalino, hecho por la planta rusa "Solar Wind" junto con otro panel experimentalmente construido con celdas individuales hechas por "Solar Wind". Las conclusiones hechas fueron que durante el solsticio del verano, la orientación automática al Sol del panel solar da un aumento de energía de radiación acumulada de un 35%; durante el solsticio de invierno el efecto fue de 28% y de 31% durante el equinoccio. Desgraciadamente, para el caso de celdas fotovoltaicas, el porcentaje de ganancia obtenido no puede ser considerado en su totalidad debido al decremento de eficiencia de celdas fotovoltaicas con el aumento de temperatura, mientras que para un colector solar plano estas ganancias adicionales si se pueden aprovechar por completo, llevando a la posibilidad de encontrar un sistema muy eficiente de calentamiento de agua para casas o invernaderos.

Palabras clave: energía solar, renovable, desarrollo sustentable, automatización, calentamiento, radiación, temperatura, panel, celda

1. Introducción

Este trabajo describe un posible sistema híbrido "calentador solar plano – panel fotovoltaico" y la automatización de su orientación hacia el sol. El tema es relativamente nuevo, sobre todo considerando el perfil de orientación automática. Durante las ultimas décadas se han desarrollado algunos sistemas de calentamiento de agua por calentadores solares planos, incluso se han visto algunos casos de acoplamiento de tales calentadores con paneles fotovoltaicos, formando un sistema híbrido, para mutuamente compensar las desventajas de cada dispositivo y de manera conjunta subir la eficiencia final del sistema híbrido. Sin embargo, para el caso de orientación automática, la atención de los

investigadores se ha desviado casi por completo hacia la orientación de paneles fotovoltaicos. El área de orientación de calentadores planos prácticamente no ha sido tocada, probablemente por incomodidades de acoplamiento de mangueras o tubería a un sistema móvil. Mientras cuando la orientación automática al sol de un calentador plano es potencialmente mas provechosa que la orientación de un panel fotovoltaico, es decir, la eficiencia final del primer sistema es mas grande que la del segundo, lo cual es debido a las propiedades termoeléctricas del material semiconductor en las celdas fotovoltaicas y a las propiedades del cuerpo negro.

2. Fundamentación Teórica Y Experimental

2.1 Justificación del sistema de orientación automática

En las siguientes gráficas se muestran los datos de radiación solar para la ciudad de Querétaro, donde se muestra el comportamiento anual de la misma.

En la figura 1 podemos observar la radiación solar promedio de 4 años para la zona ubicada entre Juriquilla y Santa Rosa Jáuregui, dándonos un comportamiento aproximado de la radiación en la zona en que estamos ubicados.

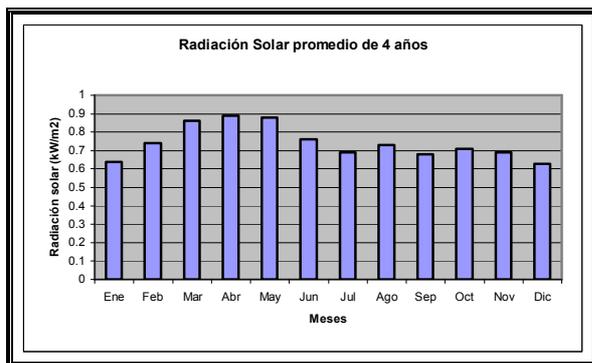


Fig. 1. Gráfica de Radiación Solar promedio de 4 años.

La figura 2 nos muestra el comportamiento promedio de la radiación solar durante el día en diferentes meses del año para la ciudad de Querétaro.

En la gráfica podemos observar las tendencias de cada mes, y la variación que cada uno de ellos tiene durante el día.

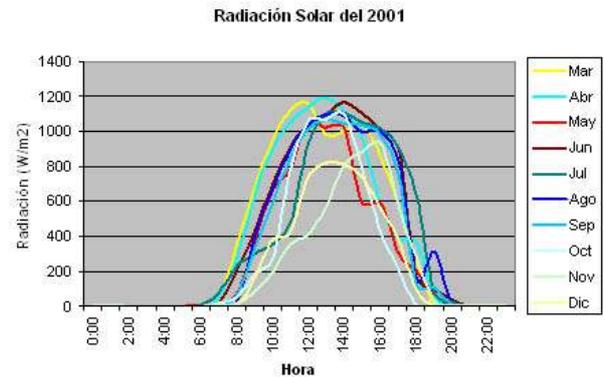


Fig. 2. Gráfica de Radiación Solar (horas pico).

Como se puede observar en la figura 2, el área bajo las curvas es la energía (el producto de la radiación por tiempo). Con el sistema de orientación automática se trata de incrementar dicha área lo mas posible, principalmente haciendo mas verticales las pendientes relacionadas al amanecer y al atardecer, también levantando el nivel promedio de las curvas relacionadas a las temporadas frías del año.

2.2 Justificación del uso de sistemas híbridos

El sistema propuesto tiene elementos que necesitan energía eléctrica para funcionar, como los motores y la electrónica de control. Para hacer el sistema mas atractivo, se propone hacerlo autónomo, por lo tanto generar energía eléctrica además de la térmica sobre la misma estructura. El uso de conocimientos sobre sistemas híbridos permitirá construir el sistema de la manera más provechosa para ambos elementos de generación.

Hay muchas publicaciones en relación a los sistemas de híbridos, sin orientación (como, por ejemplo, [3]), tratando los aspectos diferentes de su desempeño. Todos estos trabajos se refieren a los sistemas que incluyen el panel fotovoltaico con un colector solar plano (con aire o agua), considerando las áreas de los dos dispositivos siempre a ser igual. Pero es evidente que la presencia del panel

fotovoltaico arriba del colector reduce un flujo de calor a este colector y también reduce su eficiencia. Por otro lado, la habilidad del colector de sacar el calor del panel fotovoltaico será menor cuando el agua (aire) dentro de él esté caliente. Entonces, el caso óptimo será correspondiente a un sistema que consta del panel fotovoltaico con el área menor que el área del colector solar, y la posición del panel tiene que ser arriba de la parte inicial del colector (entrada del agua fría), no considerando aquí los problemas del intercambio de calor entre el panel y el colector solar.

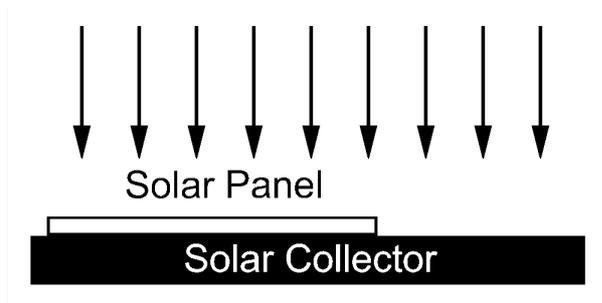


Fig. 3. Acoplamiento térmico "Panel-Colector"



Fig. 4. Este es el ejemplo de colocación del panel FV sobre el colector plano

Tal acoplamiento beneficiará a ambos elementos del sistema y el panel fotovoltaico proveerá de la suficiente energía para la movilización del sistema. El panel fotovoltaico, así como la mayoría de los demás elementos del sistema, es uno de construcción propia a

base de celdas fotovoltaicas individuales de la marca rusa "Solar Wind"



Fig. 5. Celdas FV para construcción del panel FV

El panel fotovoltaico mostrado en la fig. 6 es de construcción propia con celdas fotovoltaicas mostradas en la fig. 5, placas de acrílico y cristal. El uso de aluminio en la base aumentaría la eficiencia de acoplamiento híbrido con el colector plano.



Fig. 6. Panel FV de construcción propia

3. Resultados Experimentales Sobre Sistema De Panel FV

Antes de proponer el presente sistema, fue investigado el comportamiento de un sistema orientado puramente fotovoltaico.



Fig. 7. Sistema FV con orientación automática

Los estudios de variaciones diarias de la intensidad de radiación solar se realizaron en condiciones de Querétaro, México, con latitud del norte cercana a 23° . Estas variaciones fueron encontradas experimentalmente durante el tiempo del solsticio de verano (cerca de 22 de Julio) cuando la posición del sol en la tarde a esta latitud es prácticamente vertical, en el tiempo del equinoccio y del solsticio del invierno. Para estimar el efecto de orientación, fue realizada una comparación de datos obtenidos contra los registrados por el panel inmóvil, el ultimo siendo orientado de la manera mas provechosa. El panel usado fue ensamblado de celdas de Si cristalino, hecho por la planta rusa "Solar Wind" junto con otro panel experimentalmente construido con celdas individuales hechas por "Solar Wind".

Los resultados obtenidos junto con los precalculados teóricamente se pueden ver en la fig. 8 (cuadros negros representan la curva teórica, los triángulos verdes la experimental con orientación y los círculos rojos la experimental sin orientación):

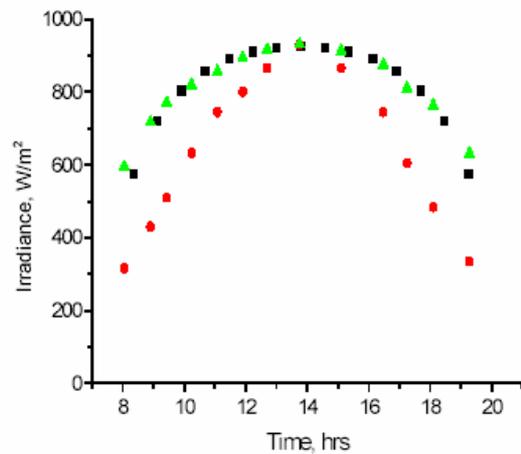


Fig. 8. Curvas de irradiación con y sin orientación

Se puede apreciar el significativo aumento de área debajo de la curva que representa los resultados con orientación. Se lograron levantar las crestas de la curva inicial, sin orientación.

Los resultados numéricos mostraron que durante el solsticio de verano la eficiencia del sistema aumento en un 35%, durante el solsticio de invierno en un 28% y durante el equinoccio en un 31% sobre la entrega nominal teórica sobre un área determinado de recolección de energía solar, es decir, sin tener en cuenta la eficiencia propia del elemento de conversión de energía.

4. Conclusiones

Mostramos que la orientación produce buenos aumentos de eficiencia teórica del sistema de conversión de energía que se va a orientar.

Desgraciadamente, para el caso de celdas fotovoltaicas, el porcentaje de ganancia obtenido no puede ser considerado en su totalidad debido al decremento de eficiencia de celdas fotovoltaicas con el aumento de

temperatura, Por ejemplo, si la celda en estado fijo conserva su temperatura promedio de 30 grados Celsius durante el día, y de 50 grados estando siempre orientada al sol, perderá aproximadamente un por ciento de su eficiencia de conversión de energía en estado orientado.

Mientras que para un colector solar plano que no es más que un cuerpo negro que obtiene la mayor eficiencia de su temperatura elevada, estas ganancias adicionales si se pueden aprovechar por completo.

Vimos que la orientación de un colector solar plano es potencialmente mas provechosa que de un panel solar fotovoltaico. Los resultados prácticos de estas conclusiones están por confirmarse.

Siendo autónomo, este sistema puede ser una solución muy práctica para calentamiento de agua eficiente para pequeños hogares o invernaderos.

5. Bibliografía

- 1) A.M. Fernández, R. N. Bathtachayra and J. A. Turner, Proceedings XXV Semana Nacional de Energía Solar, I (2001) 273-276.
- 2) L. Gómez, "Aplicaciones de la Tecnología Fotovoltaica". II Panel de Energía Solar '97, (1997).
- 3) Kern Jr. E. C. and Russel M.C. Combined photovoltaic and thermal hybrid collector systems. *Proceedings 13th ISES Photovoltaic Specialists*, Washington D.C., USA, (1978), pp. 1153-1157.
- 4) Raghuraman P. Analytical predictions of liquid and air photovoltaic/thermal flat plate collector performance. *J. Solar Energy Engineering* 103 (1981), pp. 291-298.
- 5) R. Zakharchenko, L. Licea-Jiménez, S.A. Pérez-García, P. Vorobiev, U. Dehesa-Carrasco, J.F. Pérez-Robles, J. González-Hernández, Yu. Vorobiev. "Photovoltaic solar panel for the hybrid pv/thermal system". 2003 International Material Research Congreso in Cancún.