

DISEÑO, CONSTRUCCION Y EVALUACION DE UN SISTEMA SOLAR HIBRIDO FOTOVOLTAICO/ TÉRMICO PARA AUMENTAR LA EFICIENCIA DE UN PANEL SOLAR

Oswaldo E. Hanco Apaza *, Raúl Luque Alvarez¹, Alberto Montoya Portugal², Ernesto Palo Tejada³, Miguel Vizcardo Cornejo⁴.

waldo.1203@gmail.com
Laboratorio de Energía Solar
Escuela Profesional de Física
Universidad Nacional de San Agustín

RESUMEN

El presente proyecto de investigación trata sobre formulaciones teóricas, diseño, construcción y evaluación de un sistema solar híbrido fotovoltaico / térmico (SSH FV/T) para aumentar la eficiencia de un panel fotovoltaico (FV).

La razón es aprovechar la energía térmica, la motivación aparte de incrementar la eficiencia del panel FV, es aprovechar la energía térmica para uso domestico, teniendo en cuenta el sistema de refrigeración incorporado al panel FV.

Este proyecto trata sobre el diseño, construcción y funcionamiento del SSH FV/, se formularon modelos matemáticos de todo SSH FV/T, se describen también los métodos e instrumentos para determinar experimentalmente la medición de parámetros en el proceso de funcionamiento del SSH FV/T.

Análizando los datos y curvas de las temperaturas en función del tiempo se observo que mientras se tenga un fluido de agua constante en el SSH FV/T, tendremos buena refrigeración en el panel FV y hemos obtenido un incremento en la eficiencia del panel FV de: , al mismo tiempo se pudo aprovechar la energía térmica; llegando a una temperatura máxima de 32° C que es lo suficiente para usos sanitarios, a pesar de no teniendo un buen aislamiento térmico.

INTRODUCCIÓN

La eficiencia de los paneles fotovoltaicos (FV) que existen en el mercado están comprendidos entre un 10 % a 25 %, que comparada con la energía solar total solo se aprovecha la cuarta parte de esta en forma de electricidad, aun mas esta eficiencia se reduce cuando hay un aumento de temperatura en las celdas FV.

El objetivo general de este proyecto es aumentar la eficiencia del panel FV, para esto se diseño y construyo un sistema de refrigeración que utilizara un flujo de agua. Una evaluación experimental nos permitirá saber cuánto es la energía térmica entregada por el panel FV bajo condiciones ambientales y con aislamiento. Un análisis teórico matemático de la parte térmica de todo el sistema solar híbrido FV / T, nos permitirá obtener el rendimiento térmico de todo el sistema.

Una forma de poder resolver el problema de la eficiencia en los paneles FV sería ubicarlos en lugares bien ventilados con una buena velocidad de viento, otra sería acoplarle un radiador de aluminio con aletas de refrigeración al panel FV; el propio viento disminuirá la temperatura en las celdas FV. En ambos casos se estaría desaprovechando la energía térmica. La idea sería construir un sistema de refrigeración que nos permita aumentar la eficiencia y a la vez aprovechar

la energía térmica; dichos paneles FV estarían montados con un absorbedor integrado similar al que es utilizado en un

Sistema para calentamiento de agua con radiación solar directa.

Cualquier sistema basado con la electricidad está sometido a los efectos negativos del incremento de temperatura, un sistema son los paneles FV debido a que tienen relación directa entre la temperatura y la eficiencia energética. Si buscamos en libros especializados sobre paneles FV para dar solución al problema de la temperatura, no se encontró ninguna solución técnica, que por otra parte es inherente a la propia energía solar. Lo que si recomiendan las bibliografías es ubicar los paneles FV en lugares bien ventilados, esto para prevenir los efectos negativos de la temperatura, por otra parte se está desaprovechando esta energía térmica.

Construir y diseñar un sistema solar Fotovoltaico / térmico en un solo panel es una solución viable que nos permitirá resolver problemas de eficiencia eléctrica del panel FV y poder aprovechar la energía térmica.

I. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA SOLAR HÍBRIDO FOTOVOLTAICO / TÉRMICO (SSH FV/T)

1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

Un sistema solar híbrido fotovoltaico / térmico tiene dos aplicaciones; una fundamental que es de incrementar la eficiencia eléctrica del panel FV y la otra es aprovechar la energía térmica para usos domésticos a través de un sistema de refrigeración.

Un Sistema Solar Híbrido Fotovoltaico / Térmico consiste de una celda solar "s", un absorbedor (sistema de refrigeración) "A"; este sistema de refrigeración es básicamente constituido por una placa absorbadora con tubos impregnados por donde circulara agua, un fluido "f".

Este sistema también consta de un tanque de almacenamiento de agua y una bomba para distribuir el agua.

La energía solar es recibida por el área del panel fotovoltaico en donde una parte de esta energía solar es aprovechada en energía eléctrica y otra atraviesa el panel FV para ser absorbido por el sistema de refrigeración, se han utilizado material aislante en la parte inferior y los lados, similar a un sistema para calentamiento de agua de radiación solar directa, esto para disminuir las pérdidas de calor en el sistema hacia el ambiente.

Muchos parámetros han sido utilizados en el diseño del sistema FV/T: el tipo de panel FV, tipo de materiales utilizados en el sistema de refrigeración, el medio de trabajo (aire, agua, etc), la inclinación del colector con respecto a la horizontal, etc.

1.2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN (SSH FV/T)

1.2.1 Construcción del prototipo

Se ha utilizado una placa absorbidora de calor que está unido a una tubería de cobre tipo parilla, esta tubería de cobre tiene una entrada y salida por donde circulara el fluido, se utilizó una pasta térmica para unir la placa con la tubería; esto para tener un buen contacto térmico entre los dos materiales. En la parte posterior del panel fotovoltaico también se ha impregnado pasta térmica luego se procedió a unir con el sistema de refrigeración, como vemos en la figura 1.1



Figura 1.1 Disposición de las tuberías de cobre y la placa de aluminio, incorporada en el panel FV.



Figura 1.2 Aislamiento en la parte posterior del todo el sistema de refrigeración.

El aislante térmico utilizado es una caja térmica similar al que utilizan para calentamiento de agua de radiación directa.

En la entrada y salida para el fluido se han instalado sensores de temperatura, luego se procedió a unir las tuberías de tal forma que se tenga un circuito cerrado, antes de la entrada del fluido se ha intercalado un pequeña bomba de circulación para el agua, tomada de un tanque de agua. Dicho tanque está colocada a una altura determinada con lo cual recibe el flujo de salida del absorbedor (figura 1.3). El tanque de almacenamiento y los tubos de entrada y salida del absorbedor han sido aislados del medio ambiente y de la radiación solar esto para evitar variaciones de temperatura, y que puedan falsear los resultados obtenidos en el ensayo.

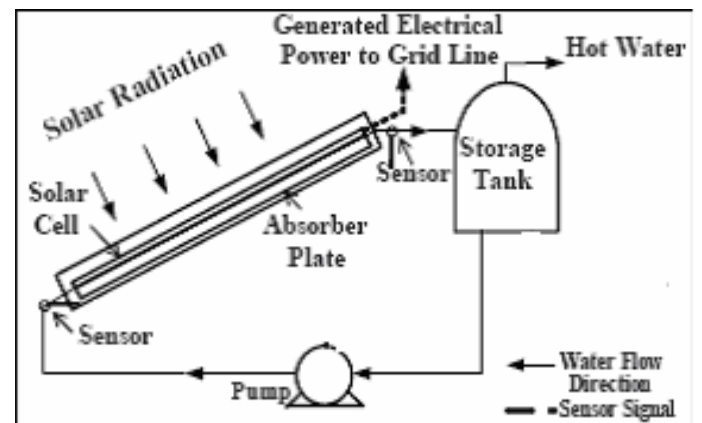


Figura 1.3 Disposición del SSH FV/T, tanque de almacenamiento, la bomba de circulación de agua y los sensores de entrada y salida del flujo.

1.3 Materiales empleados en la construcción del prototipo

- Plancha de aluminio para la placa absorbedora
- Tubería de cobre para la construcción del absorbedor tipo parrilla
- Soldadura de plata para soldar los tubos de cobre
- Tecnopor y esponja para el aislamiento
- Tubos hidro 3 para las conexiones de entrada y salida de agua
- Plancha de madera tipo melamine para la construcción de la caja aisladora
- Otros

Nota: se han utilizado los paneles fotovoltaicos existentes en el área de energía solar, el tanque de almacenamiento ha sido confeccionado con los materiales existentes en el área.

1.4 Especificaciones técnicas de los materiales en la construcción del prototipo

- Dimensiones de la placa de aluminio
0.95 m de largo, 0.42 m de ancho, 1 mm de espesor
- Dimensiones del absorbedor de cobre tipo parrilla
0.92 m de largo, 0.34 m de ancho
- La separación entre cada tubo es de 0.09 m
- El diámetro del tubo de cobre es de 0.012 m
- Para el soldado de los tubos de cobre se utilizo soldadura de plata
- Dimensiones de la caja aisladora
1.07 m de largo, 0.478 m de largo, 0.005 m de espesor

1.5 Balance de energía del SSH FV/T

Las ecuaciones matemáticas de estos componentes individuales son desarrollados basados sobre el análisis del balance de energía, conversiones fotoeléctricas, conductividad térmica, convección y radiación. La siguiente figura es un corte transversal de todo el sistema solar hibrido fotovoltaico térmico.

Modelo físico

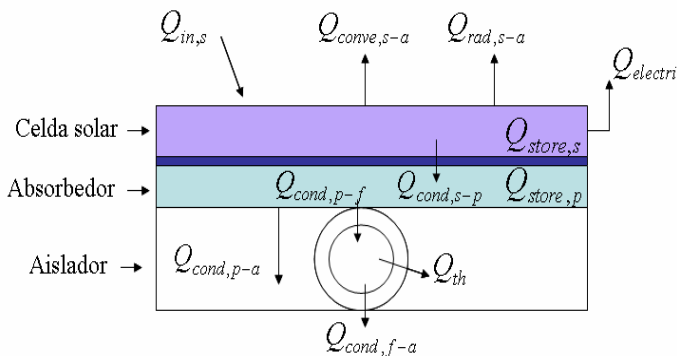


Figura 1.4: Sección transversal del SSH FV/T con la transferencia de energía para cada componente

Circuito térmico

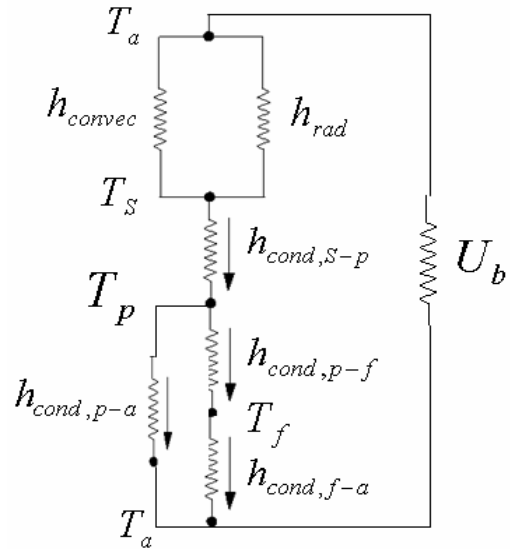


Figura 1.5: Resistencias térmicas y los coeficientes de transferencia de calor de todo el SSH FV/T.

Balance de energía para la celda solar

$$Q_{store,s} = Q_{in,s} - Q_{rad,s-a} - Q_{conve,s-a} - Q_{cond,s-a} - Q_{electr} \quad (1)$$

$$(mc)_s \frac{dT_s}{dt} = \alpha_s A_s G - A_s h_{rad} (T_s - T_a) - A_s h_{convec} (T_s - T_a) - A_s h_{condu} (T_s - T_p) - \eta_s \alpha_s G A_s \quad (2)$$

Donde

Q : Energía [W]

$(mc)_s$: Constante entre el producto de la masa y el calor específico [J/K]

T_s : Temperatura del panel fotovoltaico [K]

T_a : Temperatura ambiente [K]

T_p : Temperatura de la placa [K]

α_s : Absortancia del panel FV

A_s : Área del panel FV [m²]

G : Radiación solar [W/m²]

h_{rad} : Coeficiente de transferencia de calor por radiación [W/m²K]

h_{convec} : Coeficiente de transferencia de calor por convección [W/m²K]

h_{condu} : Coeficiente de transferencia de calor por radiación [W/m²K]

η_s : Eficiencia del panel FV

Balance de energía de la placa absorbidora

Según la figura 1.4 realizamos el balance de energía para la placa absorbidora

$$Q_{store,p} = Q_{cond,s-p} - Q_{cond,p-a} - Q_{cond,p-f} \quad (3)$$

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = A_s h_{cond} (T_s - T_p) - A_s h_{cond} (T_p - T_a) - q_f L \quad (4)$$

Donde

m_p : Masa de la placa de Aluminio [Kg]

c_p : Calor específico del Aluminio [J/Kg.K]

q_f : Calor por longitud en la dirección del fluido, o calor útil entregado por la placa al tubo en la interfase [W/m]

L : Longitud del tubo en la dirección del fluido [m]

Balance de energía para el fluido

Según la figura 1.4 se realizó el balance de energía del fluido

$$Q_{cond,p-f} = Q_{cond,f-a} + Q_{th} \quad (5)$$

$$q_f L = A_f h_{cond} (T_f - T_a) + \dot{m}_f c_f (T_{fo} - T_{fi}) \quad (6)$$

Donde

A_f

T_f : Temperatura del fluido [K]

\dot{m}_f : Taza de masa del fluido [Kg/s]

c_f : Calor Específico [J/Kg.K]

T_{fo} : Temperatura de salida del fluido

T_{fi} : Temperatura de entrada del fluido

1.6 EFICIENCIAS ELÉCTRICAS Y TÉRMICAS DEL SSH FV/ T

Las eficiencias eléctricas de un panel fotovoltaico esta dado por la expresión:

$$\eta_{elec} = \frac{Q_{elec}}{A_s G} \quad (7)$$

En el numerador esta la energía eléctrica de salida y en el denominador esta la energía eléctrica de entrada. La energía eléctrica se salida tiene la siguiente expresión:

$$Q_{elec} = \eta_s \alpha_s G A_s \quad (8)$$

En forma similar tenemos la expresión para la eficiencia térmica:

$$\eta_{th} = \frac{Q_{th}}{A_s G} \quad (9)$$

Donde

Q_{th} : es la energía térmica de salida

Este valor de energía térmica de salida se obtiene con la expresión:

$$Q_{th} = \dot{m}_f C_f (T_{fo} - T_{fi}) \quad (10)$$

La eficiencia total de todo el sistema viene a ser la suma de las ecuaciones (7) y (9)

$$\eta_{FV/T} = \eta_{th} + \eta_{elec}$$

$$\eta_{FV/T} = \frac{\dot{m}_f C_f (T_{fo} - T_{fi}) + \eta_s \alpha_s G A_s}{A_s G} \quad (11)$$

II. FUNCIONAMIENTO DEL SSH FV/T Y MEDICIÓN DE PARÁMETROS

Para las primeras mediciones se ha utilizado un panel FV híbrido con un tanque sin aislamiento. Desde el momento en que la radiación solar incide sobre el panel FV híbrido, se anoto los valores de voltaje de circuito abierto, corriente del corto circuito y temperatura del panel FV en la parte posterior.

Una vez alcanzada la temperatura máxima se encendió la bomba de circulación de agua, pasado un lapso de tiempo realizar mediciones de la parte eléctrica de corriente y voltaje.

Para la parte térmica se utilizo 4 sensores de temperatura tipo K que son distribuidos en la entrada y salida del fluido, en la placa absorbidora y en el tanque de almacenamiento, estas temperaturas están registradas por un data logger.

Para la siguiente medición se utilizo dos paneles de las mismas características eléctricas, pero con la diferencia de que uno es con el sistema de refrigeración incorporado, esta vez se utilizo un tanque de almacenamiento aislado, para luego hacer el mismo procedimiento anterior, la toma de datos de corriente y voltaje fueron simultáneos en ambos paneles, lo mismo se hizo con la parte térmica.

Se logro medir el caudal de la bomba de circulación de agua. A través de una Estación Meteorológica se logro obtener datos de Radiación Solar, Velocidad de Viento, Temperatura Ambiente; esta estación meteorológica está instalada en la parte superior del área de Energía Solar de Física.

Aparatos de medida

Parte eléctrica:

- 4 Multímetros digitales
- 2 Reostatos variables de 100 ohmios
- Cables de conexión

Parte térmica:

- 4 Sensores de temperatura tipo k
- 1 Data Logger GL 800
- 1 Estación metereologica
- 1 Medidor de flujo

III. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Determinación experimental de la curva I-V y temperatura de enfriamiento del sistema solar híbrido FV/T (17/01/09).

A partir de 10:45 am monitoreamos la temperatura en la placa hasta que alcance un máximo de temperatura en equilibrio, que es de 40.7 °C, esto es hasta las 12:30 pm, Luego con esa temperatura en equilibrio tomamos datos de corriente y voltaje hasta las 12:50 pm.

A partir de las 12:57 pm encendemos el sistema de refrigeración y simultáneamente tomamos datos de corriente y voltaje, hasta las 13:07 pm. Esto debido a la aparición de nubes. Pero el sistema seguía funcionando hasta las 13:30 pm.



Figura 3.1: Esta figura muestra la disposición de los equipos de medida para la parte térmica y parte eléctrica.

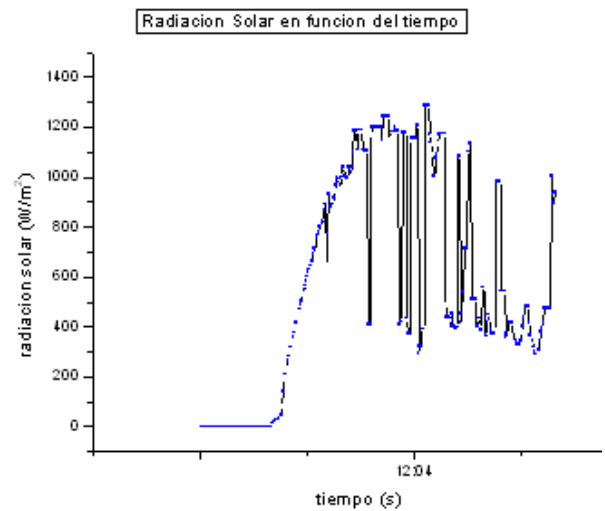
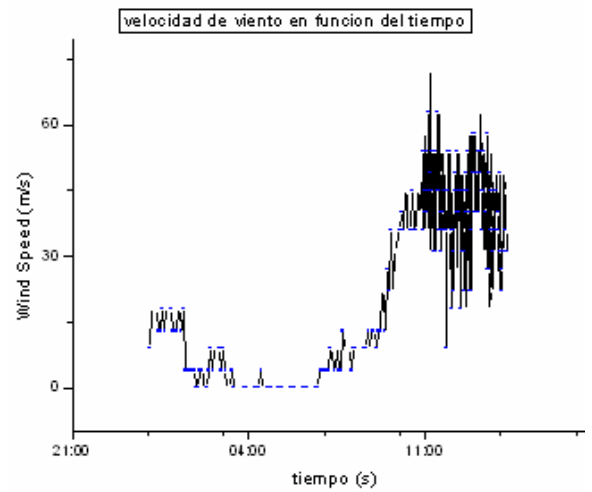


Figura 3.2: condiciones ambientales de trabajo de radiación solar, velocidad de viento (17/01/09).

Análisis de la parte térmica del SSH FV/T.

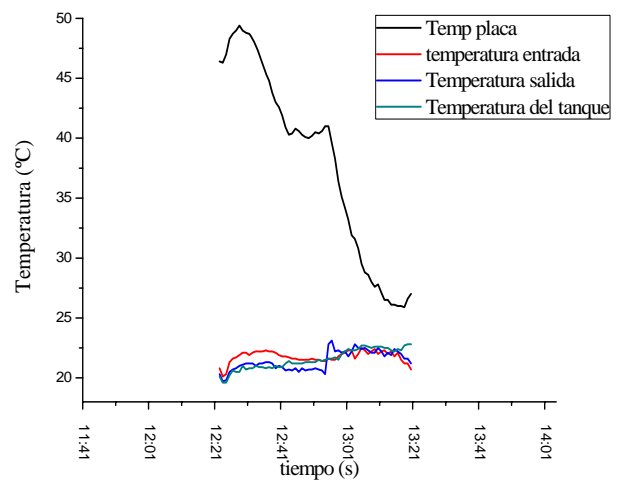


Figura 3.3: Esta figura muestra la parte térmica de todo el SSH FV/T.

De la figura 3.3 vemos que la temperatura de la placa decae cuando encendemos el sistema de refrigeración; a partir de 40.7 °C vemos que esta temperatura decae hasta 26.5 °C, a partir de ese entonces si no fuera por la aparición de nubes esta se hubiera equilibrado con las demás temperaturas, pero si extrapolamos se aproxima que si estuvieran en equilibrio. A pesar de que el tanque de almacenamiento no está aislado; de la grafica 3.3 vemos que esta temperatura aumentaba.

Análisis de la parte eléctrica del SSH FV/T.

Los datos para la curva IV sin refrigeración son tomadas a partir de las 12:35 hasta las 12:50 pm con una temperatura aproximada constante de 40.2 °C. Antes del encendido del sistema de refrigeración. A partir de las 12:57 justos en el instante que se prende el sistema de refrigeración, hasta las 13:07 pm, en ese intervalo de tiempo la temperatura de la placa descendió de 40,6°C hasta 31.6°C. la figura 3.4 muestra una comparación de esta experiencia.

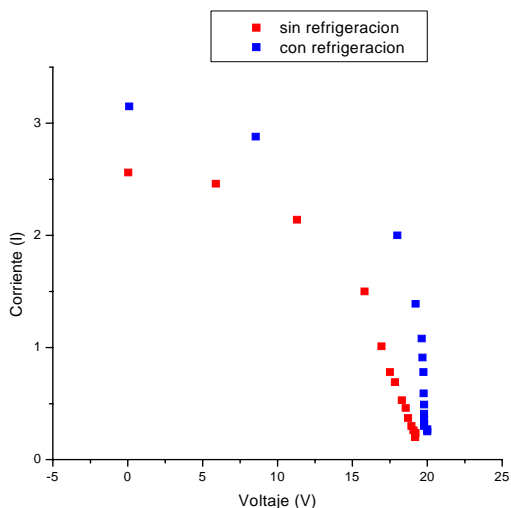


Figura 3.4: La comparación de las curvas IV; con refrigeración y sin refrigeración. Vemos que el voltaje aumenta en 1 voltio aproximadamente.

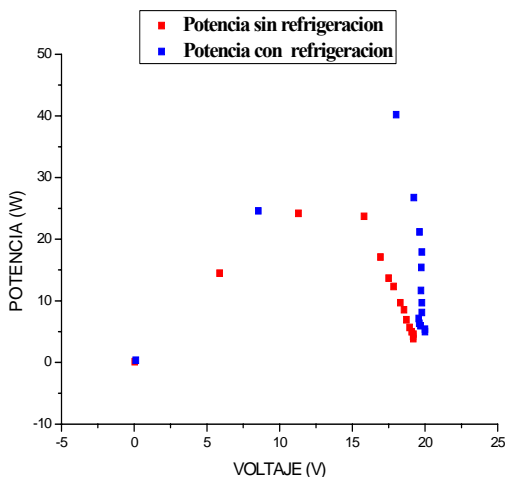


Figura 3.5: La comparación de las potencias en función del voltaje, cuando el sistema es refrigerado la potencia aumenta. La potencia máxima sin refrigeración es 24.18 W, mientras la potencia máxima con refrigeración es 40.18 W.

Con los valores obtenidos de potencia máxima con refrigeración y sin refrigeración podemos encontrar la eficiencia para cada caso.

Primeramente medimos el voltaje de circuito abierto que es $V_{oc} = 19.8 \text{ V}$, y la corriente de corto circuito que es $I_{sc} = 3.20 \text{ A}$.

Sin refrigeración:

$t = 12:35 \dots 12:50 \text{ pm}$
 $T = 40.2^\circ\text{C}$ (aproximadamente.)
 Potencia salida = 24.18 W
 Potencia entrada = 266.83 W
 $\epsilon = 0.0906$
 $\epsilon = 9.06 \%$

Con refrigeración:

$t = 12:55 \dots 13:07 \text{ pm}$
 $T = 40.2^\circ\text{C} \dots 31.6^\circ\text{C}$
 Potencia salida = 40.18 W
 Potencia entrada = 278.053 W
 $\epsilon = 0.144$
 $\epsilon = 14.4 \%$

Con estos valores eficiencia calculados vemos que el aumento de eficiencia es notorio; aumentando de 9.06 % hasta 14.4 %, el aumento es de 5.34 %.

3.2 Determinación experimental de la curva I-V, temperatura de enfriamiento del sistema híbrido, utilizando un panel FV normal de referencia. (24/01/09)

A partir de 10:34 monitoreamos las temperaturas (Temperatura de la placa, entrada, salida, tanque y Temperatura del panel FV normal); hasta que la placa alcance un máximo de temperatura en equilibrio de 57°C, esto es hasta las 12:14 pm, a partir de ese instante comienza el encendido de la bomba con un caudal máximo de 0.204 L/s



Figura 3.5: disposición de los paneles FV híbrido y normal. Con la bomba en funcionamiento y visto que la temperatura de la placa alcanzó un equilibrio de 35°C, a partir de 12:59 pm se procedió a tomar datos de corriente y voltaje para los dos sistemas (híbrido y normal) simultáneamente hasta la 13:10 pm. El sistema seguía funcionando hasta las 13:44 pm.

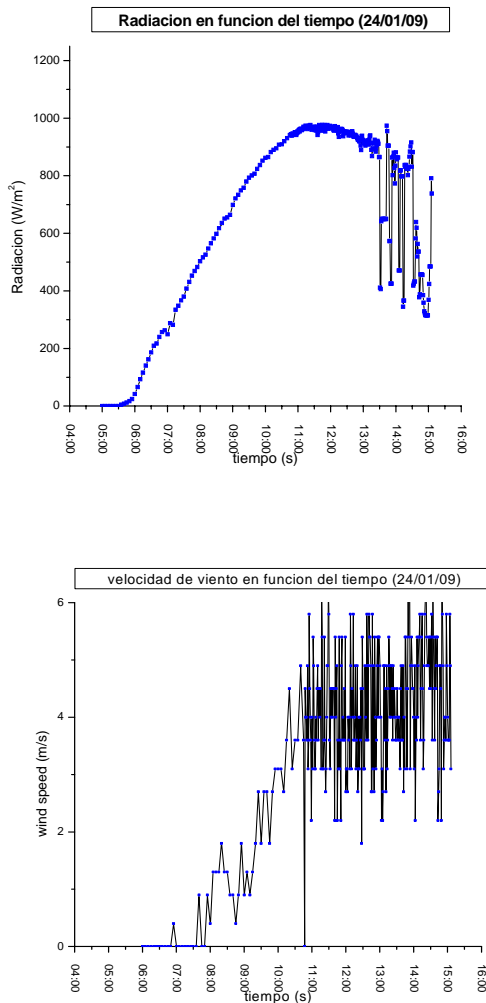


Figura 3.6: condiciones de trabajo del comportamiento de la radiación solar y velocidad de viento para la fecha (24/01/09)

Análisis experimental del sistema térmico

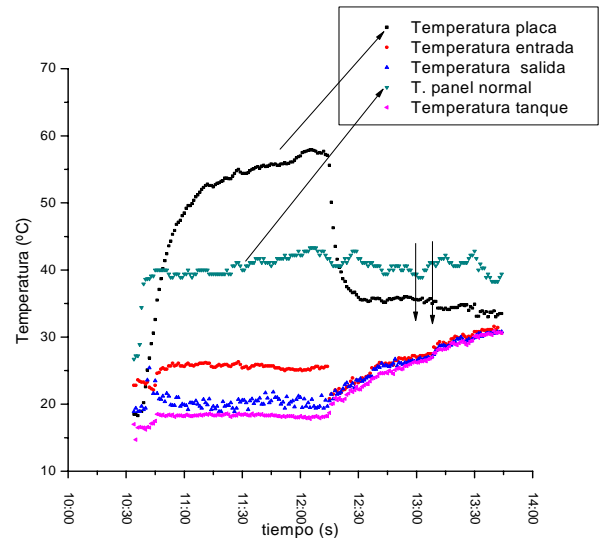


Figura 3.7: comportamiento de las temperaturas de todo el sistema térmico.

Según la figura 3.7; vemos como la temperatura de la placa decae cuando se enciende el sistema de refrigeración, la temperatura de entrada, salida y del tanque se ponen en equilibrio después del encendido llegando a una temperatura máxima de 32°C aproximadamente; esto debido a que el sistema de refrigeración es un circuito cerrado y de flujo forzado.

Utilizando el valor caudal máximo de 0.204 L/s, las temperaturas de entrada y salida, con las ecuaciones (38) y (39) calculamos la eficiencia térmica, llegando a una eficiencia térmica de 37 %.

Análisis experimental del sistema eléctrico (curvas I-V)

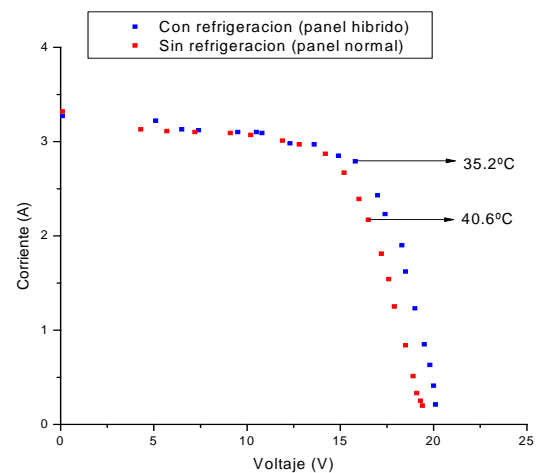


Figura 3.8: comparación de las curvas IV de los sistemas híbrido y normal.

Las curvas I-V de la figura 3.8 están muy próximas debido a que en la zona de toma de datos I-V hay una diferencia de aproximada de 5.4°C. el valor de radiación y temperaturas son promedios para un intervalo de tiempo (12:59 – 13:10)pm.

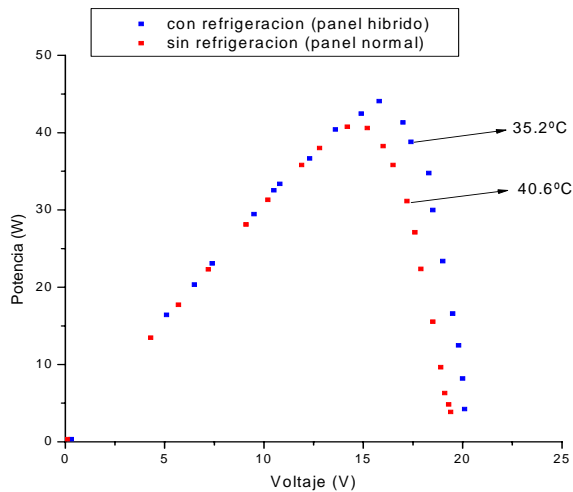


Figura 3.17: esta figura muestra la diferencia de potencias y como afecta la temperatura a cada panel FV.

De esta grafica vemos que las potencias máximas de salida están en un intervalo de 44,082 W con refrigeración y 40,754 W sin refrigeración.

Con los valores obtenidos de potencia máxima con refrigeración y sin refrigeración podemos encontrar la eficiencia para cada caso.

Sin refrigeración:

t= 12:59.....13:10 pm.

T = 40.6°C (promedio)

Potencia máxima salida = 40.75 W

Potencia entrada = $A_s * G$

$$= (0.39m^2)(970W/m^2)$$

$$= 3870.3 W$$

$$\epsilon = 0.1025$$

$$\epsilon = 10.25 \%$$

Con refrigeración:

t= 12:59.....13:10 pm.

T (placa) = 35.2°C (promedio)

Potencia máxima salida = 44.58 W

Potencia entrada = $A_s * G$

$$= 3870.3 W$$

$$\epsilon = 0.1214$$

$$\epsilon = 12.14 \%$$

En este caso vemos que si utilizamos un panel FV de referencia, podemos observar que también hay un incremento en la eficiencia del panel híbrido.

Utilizando la ecuación (11) La eficiencia total de todo el sistema es 49.14 %

IV. CONCLUSIONES

- Con el sistema de refrigeración diseñada, construida y evaluada se logro aumentar la eficiencia del panel FV;

para el caso de un panel híbrido y un panel de referencia, se obtuvo un incremento de eficiencia de 10% a 12%, mientras que para un panel híbrido y otro panel de referencia se obtuvo una diferencia mayor de eficiencia de 9% a 14%; en este último caso es muy notable la eficiencia.

- En las mediciones experimentales de los voltajes y corriente se observo que si no hay buena radiación solar constante, los análisis hechos para la curva IV serán distorsionados y esto afecta directamente a los valores reales de la eficiencia.
- Con el sistema de refrigeración incorporado al panel FV se pudo aprovechar la energía térmica en el tanque de almacenamiento aislado, llegando a una temperatura máxima de 32 °C. Llegando a una eficiencia de 37% de energía térmica.
- En la evaluación experimental de la temperatura alcanzada por el panel FV en la parte posterior con aislamiento, esta llego a 57 °C, de esta manera con el sistema de refrigeración incorporado al panel FV se logro aprovechar en el tanque de almacenamiento una temperatura máxima de 32 °C, a pesar de no tener un buen aislamiento bien sofisticado.
- Finalmente según las experiencias realizadas se vio que los paneles FV son buenos colectores de energía térmica.

V. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Frank, Krath, Mark S. Boh, "Principios de transferencia de calor ", Thomson Learning, 6 Edición, México, 2001.
- [2] John A. Duffie and W. A. Beckman, "Solar engineering of thermal processes", second edition, wiley, New York 1991.
- [3] Y.Sukamongkol, S. Chungpaibulpatana, and W. Ongsakul, "A Simulation Model for Predicting the Performance of a Solar Photovoltaic System with Alternating Current Loads," *Renewable Energy Journal*, 27 (2002), P 237-258.
- [4] Yod Sukamongkol A simulation model for predicting the transient performance of a hybrid pv/t forced-circulation solar water-heating system, Sirindhorn International Institute of Technonlgy, Thammasat University, P.O.Box 22, 12121, Thailand, Phone:+662 9869006 ext 2505
- [5] Satinder Pal Singh and S. Ashok, The Development of a portable hybrid system simulation model, *Department of Mechanical Engineering*.
- [6] Panel Solar Híbrido Fotovoltaico/ Térmico Con Incremento De Eficiencia En Sistema Fotovoltaico, luis@panelsolarhibrido.es