



PROYECTO ENDEV/GIZ PERU

**Validación del calentador solar de agua de la empresa
Eco Perú**

Informe Final

Mayo 2013

Elaborado Por:

**LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES Y DEL
AMBIENTE
ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA DE LA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTIN -
AREQUIPA**



Validación del calentador solar de agua de la empresa Eco Perú

Tabla de Contenido

1. Introducción	4
2. Objetivos.....	4
2.1. Objetivo general.....	4
2.2. Objetivos específicos.....	4
3. Conceptos generales.....	5
3.1. La energía solar.....	5
3.2. Posición del sol.....	5
3.2.1 Coordenadas horizontales.....	5
3.2.2 Angulo de incidencia.....	6
3.3. El colector solar.....	6
3.3.1 Tipos de colectores solares.....	7
4. Ubicación y delimitación geográfica.....	9
4.1 Provincia de Arequipa.....	9
4.2 Cuenca atmosférica de la ciudad de Arequipa.....	9
5. Metodología y descripción del monitoreo.....	10
5.1 Descripción del sistema de medición.....	10
5.2 Descripción de la terma solar.....	12
5.3 Procedimiento.....	14
6. Resultado y evaluación.....	16
6.1. Determinación del rendimiento diario del sistema y pronóstico de rendimiento a largo plazo.....	16
6.2 Determinación de pérdidas de calor del dispositivo de almacenamiento.....	26
6.3 Determinación de la velocidad de calentamiento y enfriamiento.....	26
7. Conclusiones.....	29
8. Recomendaciones.....	29
9. Bibliografía.....	30
10. Anexos.....	31





Validación del calentador solar de agua de la empresa Eco Perú

1. Introducción

Existen en el mercado de Arequipa distintos tipos de calentadores solares de los cuales los colectores de placa plana son los más usados y comercializados, estos colectores funcionan bastante bien en climas como las que presenta la ciudad de Arequipa, pero en zonas de altura donde la temperatura es muy baja, la rejilla de los colectores colapsan por el congelamiento del fluido caloportador.

Actualmente se venden en el mercado los colectores de tubos de vacío, aparentemente más apropiados para climas desfavorables por tener como aislante térmico el vacío, sin embargo aun no se conoce su comportamiento térmico y eficiencia de estos colectores de tubos de vacío de manera que nos permita proponer su uso para zonas de altura.

El comportamiento térmico de los tubos de vacío depende de la velocidad de calentamiento del fluido el cual se puede determinar analizando la evolución de la temperatura en un tanque acumulador

Debido a los diferentes problemas que se presentan en los colectores solares de placa plana cuando operan en zonas de altura y existiendo una nueva tecnología en colectores solares para calentamiento de agua que podría solucionar este problema, es que se hace necesario un método de evaluación para conocer su comportamiento térmico y poder proponer su uso para los distintos climas de la región.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Validar un calentador solar de agua de la empresa Eco Perú

2.2 Objetivos específicos

- Elaboración de planos de diseño a escala en AutoCad de la terma a evaluar.
- Instalación de la terma solar a evaluar proporcionada por el Proveedor.
- Calibración e instalación de instrumentos de medida en la terma solar.
- Registro de datos de temperatura, radiación solar, velocidad de viento, flujo de fluido de acuerdo a norma establecida.
- Procesamiento y análisis de datos (evaluación de la energía útil, pérdidas de energía y eficiencia energética).
- Presentación de informe técnico con el siguiente contenido básico: Introducción; Resumen ejecutivo; Descripción de la metodología; Análisis de los resultados; Conclusiones. Anexos: planos, datos registrados y procesados, normas técnicas peruanas e internacionales utilizadas.



3. Conceptos Generales

3.1 La energía solar

La energía emitida por el Sol viaja en forma de ondas electromagnéticas (o.e.m). Las o.e.m emitidas por la superficie solar están fundamentalmente en la banda visible e infrarroja, comprendiendo longitudes de onda entre 0,2 y 5 μm . La irradiación espectral es la intensidad de la radiación recibida en cada longitud de onda, su unidad de medida es el $\text{W}/\text{m}^2\mu\text{m}$. Cabe mencionar también que debido a la variación de la distancia Tierra-Sol, la radiación recibida en la Tierra sería diferente para cada día del año. (Figura 3.1)

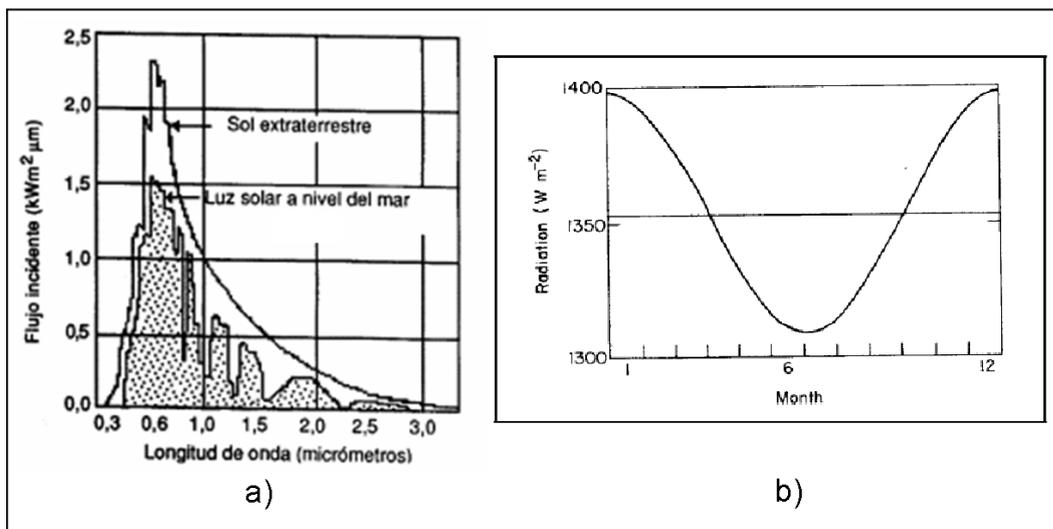


Figura 3.1: a) Irradiancia solar espectral. b) Variación de la irradiancia solar extraterrestre en el año.

La radiación solar se mide comúnmente sobre un plano horizontal en algún lugar determinado de la Tierra sobre su superficie. Para ello se distinguen dos componentes de la radiación global o total, la componente llamada directa y difusa. La radiación directa es aquella que proviene directamente del disco solar atenuada en parte por la atmosfera. La radiación difusa es la radiación que llega a un plano horizontal, en todas las direcciones excepto la que corresponde al ángulo solido subtendido por el disco solar. La radiación difusa está integrada por la radiación que es desviada por las moléculas y partículas en suspensión y por la reflejada debida a la interacción de la radiación directa y las nubes. El aparato para medir la radiación total se denomina piranometro.

3.2 Posición del Sol

3.2.1 Coordenadas horizontales

Las coordenadas horizontales del Sol son: ángulo azimutal y altura sobre el horizonte. El ángulo azimutal, Az es el formado por la proyección sobre el plano horizontal de la



línea Sol- Tierra, con la línea norte-sur. En el hemisferio sur se mide desde la dirección norte y es positivo hacia el este.

La altura solar, α , es el ángulo formado por la dirección Sol-Tierra con el plano horizontal del lugar.

3.2.2 Angulo de incidencia

La figura 3.2 representa una superficie plana respecto a la superficie terrestre.

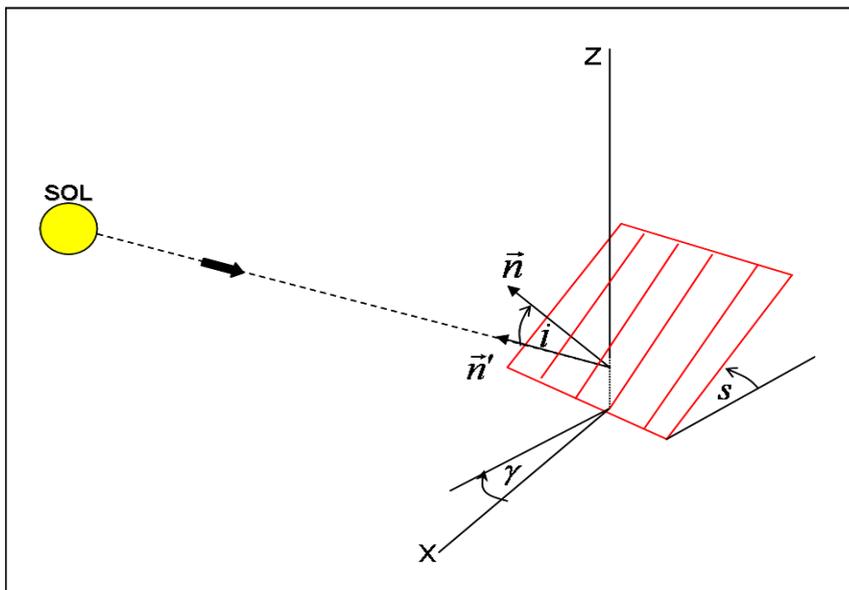


Figura 3.2: Angulo de incidencia de la radiación directa.

De acuerdo a este sistema, una superficie plana queda orientada de acuerdo a dos ángulos: el de inclinación s y el azimutal γ . El ángulo de inclinación es aquel formado por la superficie y el plano horizontal. El ángulo azimutal (para el hemisferio sur) es el que forma, con la dirección norte, la proyección sobre el plano horizontal de la normal a la superficie, el cual se considera positivo hacia el este.

El ángulo de incidencia de la radiación directa, i , es aquel formado por la dirección desde el centro del Sol a un punto sobre la superficie irradiada, con la normal a esta superficie. De acuerdo a la figura 2.2 matemáticamente este ángulo cumple la relación $\cos(i) = \vec{n}_0 \cdot \vec{n}$.

3.3 El colector solar

La energía solar puede ser convertida en energía química, eléctrica y térmica. Interesa en especial explicar cómo se realiza la transformación de la radiación solar en energía térmica disponible.

El colector puede considerarse un intercambiador que transforma en calor la energía que transporta la radiación solar.

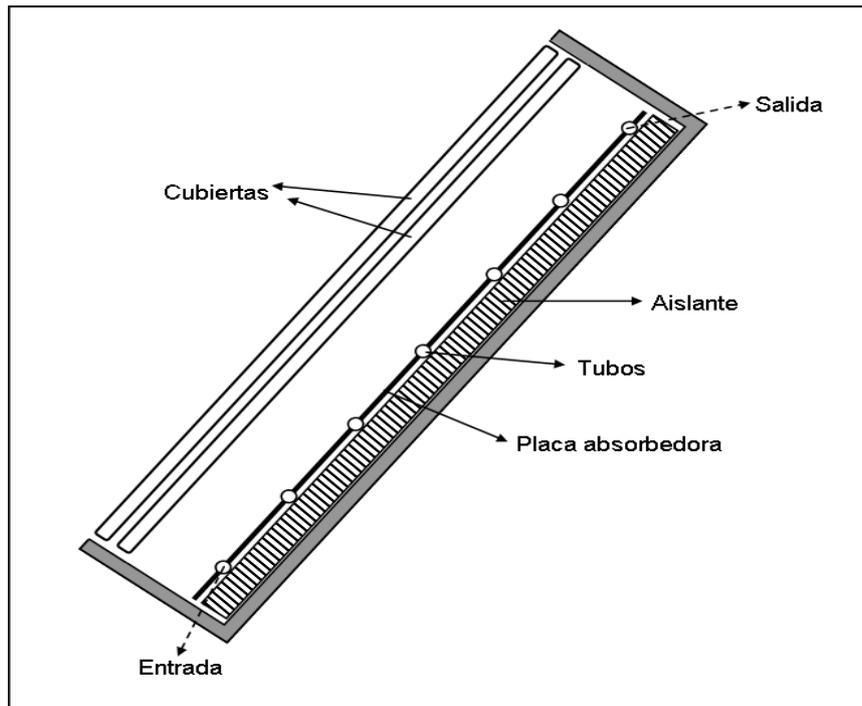


Figura 3.3: Esquema del colector solar plano.

La figura 3.3 muestra los componentes básicos que integran un colector, que son los siguientes:

- Las cubiertas (una o más) transparentes a la radiación solar.
- La placa o superficie absorbente de color negro, donde se transfiere la energía al fluido que circula por su interior.
- El aislamiento posterior que reduce las pérdidas de calor.

La radiación que atraviesa las cubiertas transparentes es absorbida por el absorbedor y de este pasa por convección al fluido que circula por el interior.

Existen muchos diseños de colectores de placa plana, con una gran variedad de materiales diferentes. Son usados para calentar fluidos como agua, agua con aditivos de anticongelante, aire y otros fluidos. Su principal función es recolectar la máxima energía solar disponible al costo más bajo.

3.3.1 Tipos de colectores solares

Los principales tipos de colectores utilizados comúnmente son:

Colectores planos con cubierta de vidrio: Son los más comunes en el uso de sistemas de calentamiento de agua.



Colectores planos sin cubierta de vidrio: Consisten en colectores planos sin la cubierta de vidrio. Son utilizados para aplicaciones donde la temperatura demandada no sea muy alta (unos 30_C). Uno de sus usos típicos corresponde al calentamiento de piscinas.

Colector de tubos al vacío: Consiste en filas paralelas de tubos de vidrio. A cada tubo se le elimina el aire en su interior para evitar pérdidas de calor por convección. El absorbedor y los tubos de conducción de fluido van por el interior de los tubos de vidrio. En general son mucho más caros que los colectores planos y pueden alcanzar temperaturas muy grandes (entre 77 y 177_C).

Colectores con unidad de almacenamiento integral: Son aquellos que combinan el tanque de almacenamiento con el absorbedor en una sola unidad. La ventaja de estos sistemas de calentamiento es que no requieren otros componentes.

Colectores de calentamiento de aire: Son aquellos en que se utiliza aire como medio de transferencia de calor en vez de líquido. Pueden ser utilizados para calentamiento de espacios cerrados, por ejemplo.

En la siguiente figura se puede observar un esquema de colector de tubos al vacío:

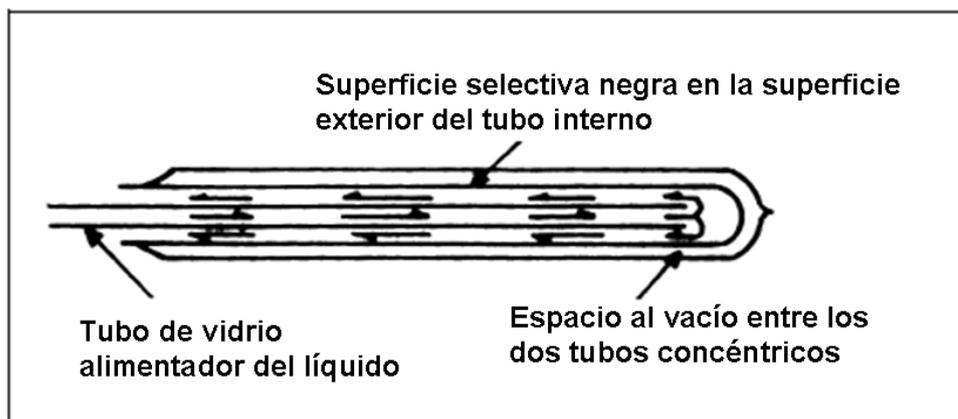


Figura 3.4: Colector de tubos al vacío.

En la tabla 3.1 se muestran valores típicos de los parámetros característicos eficiencia óptica (η_0) y coeficiente global de pérdidas (U_L) y rango normal de temperaturas de trabajo para distintos tipos de colectores [7]:

Tipo de Colector	Factor de Conversión (η_0)	Factor de Pérdidas Térmicas U_L (W/m ² °C)	Rango de Temperatura (°C)
Sin Cubierta	0.9	15-25	10 - 40
Cubierta Simple	0.8	7	10 - 60
Cubierta Doble	0.65	5	10 - 80
Superficie Selectiva	0.8	5	10 - 80
Tubos de Vacío	0.7	2	10 -130

Fuente: CENSOLAR (Centro de Estudios de la Energía Solar)

Tabla 3.1: Parámetros Característicos de los distintos tipos de colectores solares



4. Ubicación y Delimitación Geográfica

4.1 Provincia de Arequipa

La ciudad de Arequipa es la capital y provincia del departamento del mismo nombre y la segunda ciudad más importante del país ubicada al sur del Perú a 2 335 m de altitud en las faldas del volcán Misti y muy cercana a los volcanes Chachani y Pichupichu. Tiene un clima seco de sierra, con temperaturas que oscilan entre los 24° C durante el día y 10° C en la noche y entre enero y marzo con moderadas precipitaciones pluviales. Está constituida por 23 distritos con una población rural de 25 893 habitantes y una población urbana de 835,853 habitantes. Es el más importante centro comercial e industrial del sur del Perú y por ella transitan trenes, aviones y todo tipo de vehículos motorizados. Las principales actividades económicas son el turismo, la agricultura, ganadería y la minería (X Censo Nacional de Población y V de Vivienda 2005).

4.2 Cuenca atmosférica de la ciudad de Arequipa

Una cuenca atmosférica es el espacio geográfico, delimitado por los obstáculos de origen natural (montañas, líneas costeras, etc.), de tal manera que dentro de ésta se modifica la circulación general de la atmósfera sobre la superficie, dando lugar a la formación de vientos locales donde ocurren los procesos de dispersión y traslado de sustancias o partículas. La delimitación de la Cuenca Atmosférica de Arequipa ha sido realizada por la Dirección Regional del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), y determinó los límites de la cuenca atmosférica utilizando la información de vientos dominantes en la superficie. La Cuenca Atmosférica de Arequipa tiene un área de 605.93 km² cuyos límites son:

- Norte: Cota de 3 000 m de altitud (faldas de los volcanes Chachani y Misti)
- Este: Distritos de Chiguata, Characato y Socabaya
- Sur: Batolito de la Caldera
- Noroeste: Cuenca del río Yura
- Oeste: Plenillanura de Tiabaya, Uchumayo

La presencia de la cadena volcánica al norte y noreste de Arequipa y la topografía de cerros y colinas al sureste de la ciudad, definen una especie de corredor que en parte definen la circulación de vientos superficiales de la ciudad.

En la Figura 4.1 se muestra la delimitación de la cuenca atmosférica de Arequipa, así como las subcuencas de Yura, Characato y Ciudad de Arequipa.

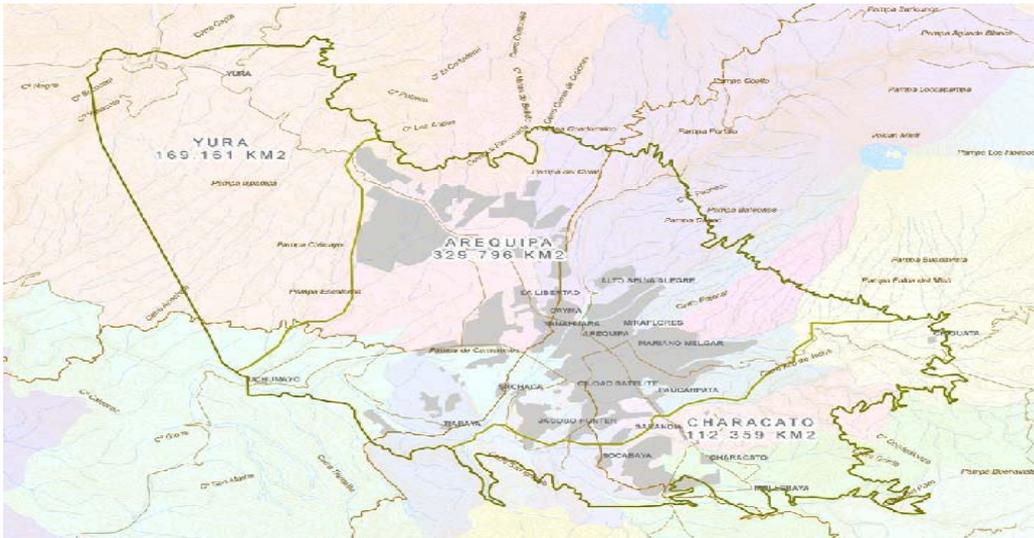


Figura 4.1 Cuenca atmosférica de Arequipa

5. Metodología y Descripción del Monitoreo

5.1 Descripción del sistema de medición

Para la evaluación del calentador solar se usaron los sensores y un dataloger que se describen a continuación



- Piranometro kipp zone para medir la radiación global incidente en el plano del colector con una precisión de $\pm 0.5 \text{ W/m}^2$



- Anemómetro entre 0 – 40 m/s con integrador 1 .100 minutos , medidor de dirección de viento 0 – 360°



- Sensores de temperatura PT-100 para medir la temperatura ambiente , temperatura de entrada y salida al colector , temperatura de tanque de almacenamiento °C, precisión 0.1°C



- Flujómetro tipo magnetico inductivo marca Kobold modelo MID, de rango de medida 0.00 – 3,3 m³/h con una precisión de 0.3% de la lectura





- Dataloger marca Midi Logger GL-800 para registrar las medidas de temperaturas, flujo, radiación solar, velocidad de viento, sistema de control de temperatura.

Figura 5.1 Fotografía de los sensores de prueba y dataloger

5.2 Descripción de la terma solar

DATOS DE LOS TUBOS	$\Phi 47 \times 150$
<i>Peso</i>	<i>kg</i>
<i>Estructura</i>	<i>tubos de vidrio coaxiales de doble capa</i>
<i>Diámetro exterior del tubo</i>	$\Phi 48 \pm 0.7 \text{mm}$
<i>Diámetro del tubo interno</i>	$\Phi 38 \pm 0.7 \text{mm}$
<i>Espesor del tubo exterior</i>	$1.6 \pm 0.15 \text{mm}$
<i>Espesor del tubo interno</i>	$1.6 \pm 0.15 \text{mm}$
<i>Longitud de tubo</i>	$1562 \pm 4 \text{mm}$
<i>Capacidad del tubo</i>	<i>1,3 l</i>
<i>Numero de tubos</i>	<i>15</i>
<i>Material de recubrimiento</i>	<i>AIN/AIN-SS/CU</i>

Tabla 5.1 Especificaciones técnicas de los tubos al vacío

DATOS DE TANQUE DE ALMACENAMIENTO	
<i>Volumen de tanque interno (L)</i>	120.00
<i>Longitud del tanque (m)</i>	0.9
<i>Diámetro(m)</i>	0.38
<i>Material de tanque</i>	Acero inoxidable
<i>Material de aislamiento</i>	Poliuretano expandido
<i>Espesor de aislamiento (mm.)</i>	50.00
<i>material de protector externo</i>	Aluminio

Tabla 5.2 Especificaciones técnicas del tanque de almacenamiento



Figura 5.2 Fotografía del calentador solar



Figura 5.3 Fotografía del sistema de refrigeracion



5.3 procedimiento de ensayo

5.3.1 Determinación del rendimiento diario del sistema y pronóstico de rendimiento a largo plazo

El ensayo implica una serie de ensayos en exterior de un día sobre el calentador solar, para determinar el rendimiento diario del sistema y el pronóstico de rendimiento a largo plazo.

- Al inicio de cada día de ensayo, antes de empezar el mismo, se protege el colector del sol directo y se acondiciona el sistema mediante la circulación de agua fría a temperatura de red a través de él a un caudal de 600 l/h de manera que el sistema completo alcance una temperatura uniforme. ($T_{red} = 14^{\circ}\text{C}$)
- Una vez que el sistema alcanza el equilibrio térmico, se destapa el colector y se deja que este reciba la radiación solar hasta que el sistema reciba una determinada cantidad de energía del sol, para este ensayo se escogió (día 5 de mayo 10.29 MJ/m^2 , día 6 de mayo 17.16 MJ/m^2 , día 7 de mayo 22.23 MJ/m^2 , día 8 de mayo 25.25 MJ/m^2)
- Cuando el sistema recibe una de las cantidades de de energía establecidas para cada día, se proteger el colector del sol directo y se procede a extraer el agua desde el dispositivo de almacenamiento a un flujo constante de 600 l/h, el agua fría que ingresa al sistema mientras este se descarga debe tener la temperatura de red definida durante el acondicionamiento del sistema
- Se mide la temperatura del agua de descarga cada 15s y se registra el valor promedio cada vez que se descarga un decimo del volumen del dispositivo de almacenamiento, se realiza la descarga hasta que la diferencia de temperatura entre el agua de descarga y el agua de la red que ingresa al sistema sea menor que 1K. Estos valores de temperatura se usa para construir el perfil de temperatura de descarga y hallar la energía acumulada por el sistema con la ecuación:

$$Q_i = \Delta V_i \rho_f c_{p,f} [t_{di}(V) - t_{red}] \quad (1)$$

luego se grafica el diagrama de entrada salida de energía, a partir de la cual se puede hallar el rendimiento del sistema y realizar el pronóstico del comportamiento del sistema en distintas épocas del año.

$$Q = a_1 H + a_2 (t_{amb} - t_{red}) + a_3 \quad (2)$$



5.3.2 Determinación de pérdidas de calor del dispositivo de almacenamiento

- Se acondiciona previamente el agua del dispositivo de almacenamiento mediante el calentamiento uniforme a una temperatura de 63°C , para lograr esto se hace circular agua caliente ingresando este desde un dispositivo auxiliar de calentamiento, el dispositivo queda acondicionado cuando la diferencia de temperatura de ingreso y salida sea menor que 1K. (sistema en equilibrio térmico).
- El sistema se deja expuesto a cielo despejado durante toda la noche, durante el periodo de enfriamiento se registra la temperatura del agua almacenada en el dispositivo de almacenamiento, la temperatura ambiente y la velocidad del viento.
- Al término del periodo de ensayo, se hace circular el agua en el dispositivo de almacenamiento de manera que este alcance una temperatura uniforme. Se asume que el agua en el dispositivo de almacenamiento esta a una temperatura uniforme, cuando la temperatura del agua en la salida del mismo varía menos de 1K durante un periodo de 15 minutos.
- Con los datos registrados se calcula el coeficiente de pérdida de calor del dispositivo de almacenamiento con la ecuación:

$$U_s = \frac{V_i \rho_f c_{p,f}}{\Delta T} \ln\left(\frac{t_i - t_{amb}}{t_f - t_{amb}}\right) \quad (3)$$

y las pérdidas de calor del dispositivo de almacenamiento con la ecuación:

$$Q_{perd} = V_i \rho_f c_{p,f} [t_i - t_{amb(noches)}] \left[1 - \exp\left(-\frac{U_s \Delta t_i}{V_i \rho_f c_{p,f}}\right) \right] \quad (4)$$

5.3.3 Determinación de la velocidad de calentamiento y enfriamiento

Se monitorea las temperaturas del interior del tanque (parte media), la temperatura ambiente, la radiación solar y la velocidad de viento.

A partir de la evolución de la temperatura en el tanque de almacenamiento de agua se determina la pendiente en las zonas de incremento de temperatura la cual representa la velocidad de calentamiento del agua del calentador solar.

A partir de la evolución de la temperatura en el tanque de almacenamiento de agua se determina la pendiente en las zonas de decremento de temperatura la cual representa la velocidad de enfriamiento del tanque acumulador.

La energía térmica útil ganada por la term, se calcula a partir de la ecuación:

$$E_T = mC\Delta T \quad (5)$$

m: masa del fluido almacenada en el tanque



C: calor específico del agua
 ΔT : Incremento de la temperatura en el tanque

Luego, la energía solar por unidad de área recibida se calcula con la ecuación:

$$E_S = G A \quad (6)$$

G: energía de la radiación solar acumulada en un día
A: área de absorción

6. Resultados

6.1 Determinación del rendimiento diario del sistema y pronóstico de rendimiento a largo plazo

Se muestran los resultados de los cuatro días de ensayo.

DIA 5 DE MAYO

Energía solar

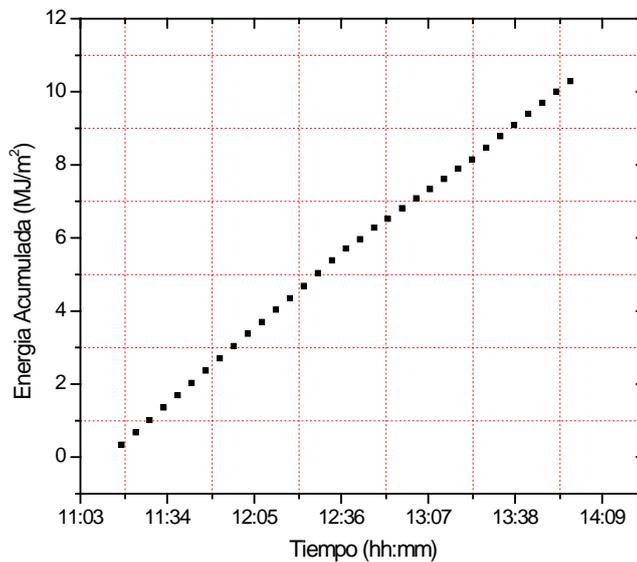


Gráfico 6.1. Comportamiento de la energía solar

En la gráfica 6.1 se muestra la energía por metro cuadrado que se recibe del sol entre las 11 y 14 horas y la energía acumulada entre esas horas es 10.29 MJ/m^2



Radiación Solar

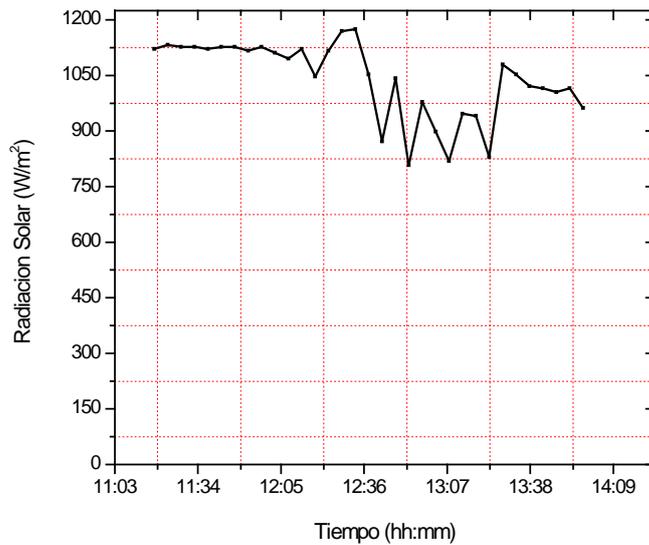


Grafico 6.2. Radiación solar

El grafico 6.2 muestra la intensidad de radiación solar entre las 11 y 14 horas, se observa que entre las 12:15 y 13:45 horas estaba parcialmente nublado

Perfil de temperatura de descarga

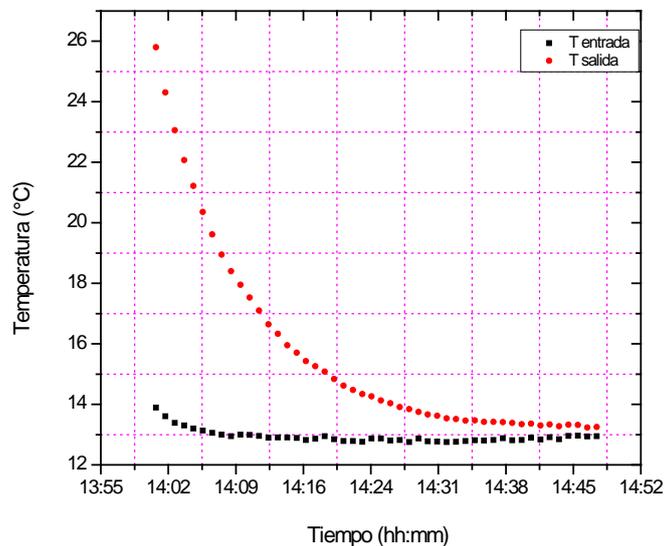


Grafico 6.3. Perfil de temperatura de descarga

En la figura 6.3 se tiene el perfil de temperatura de descarga del agua, la curva roja representa la temperatura de salida del agua y la curva negra representa la temperatura de ingreso de la red, se observa que la descarga se ha realizado hasta que la diferencia



de temperatura entre el agua de descarga y el agua de la red que ingresa al sistema es menor que 1K, con estos datos y usando la ecuación (1) se obtiene la energía acumulada por el sistema, la cual es: 5.62 MJ

Flujo

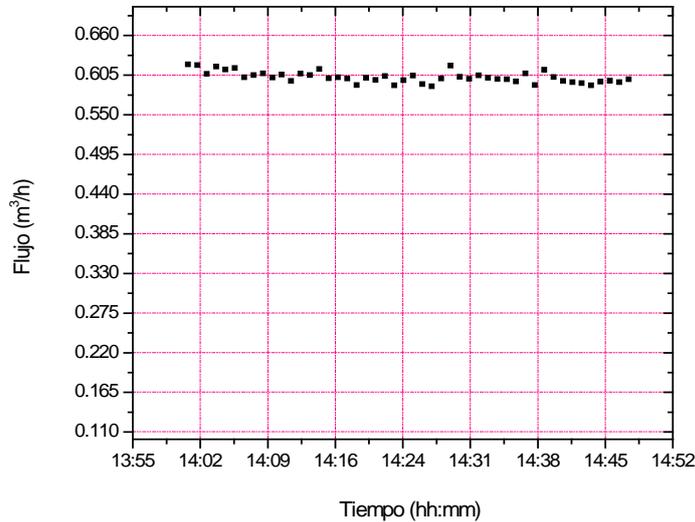


Gráfico 6.4. Flujo del fluido durante la descarga

En la grafica 6.4 se observa que el flujo del fluido durante la descarga se ha mantenido constante en $0,600 \text{ m}^3/\text{h}$

6 de mayo

Energía solar

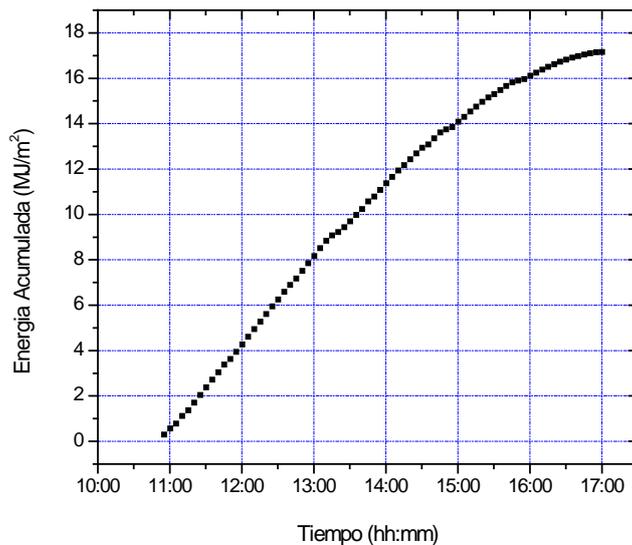


Gráfico 6.5. Comportamiento de la energía solar



En la grafica 6.5 se muestra la energía por metro cuadrado que se recibe del sol entre las 11 y 17 horas y la energía acumulada entre esas horas es 17.16 MJ/m^2

Radiación Solar

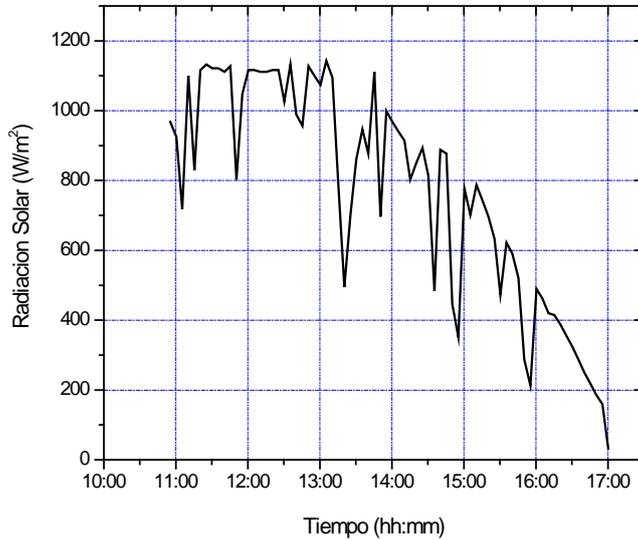


Grafico 6.6. Radiación solar

El grafico 6.6 muestra la intensidad de radiación solar entre las 11 y 17 horas, se observa que entre esas horas estaba parcialmente nublado

Perfil de temperatura de descarga

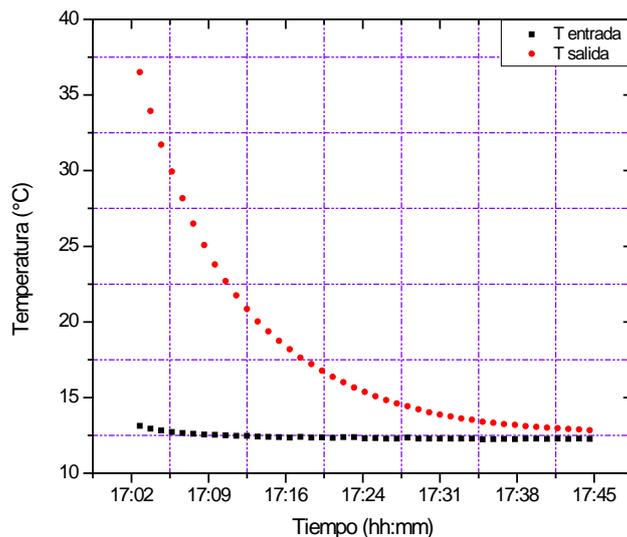


Grafico 6.7. Perfil de temperatura de descarga



En la figura 6.7 se tiene el perfil de temperatura de descarga del agua, la curva roja representa la temperatura de salida del agua y la curva negra representa la temperatura de ingreso de la red, se observa que la descarga se ha realizado hasta que la diferencia de temperatura entre el agua de descarga y el agua de la red que ingresa al sistema es menor que 1K, con estos datos y usando la ecuación (1) se obtiene la energía acumulada por el sistema, la cual es: 10.24 MJ

Flujo

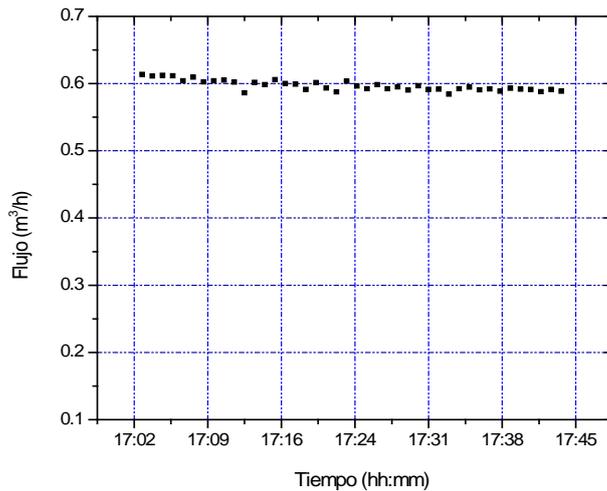


Gráfico 6.8. Flujo del fluido durante la descarga

En la grafica 6.8 se observa que el flujo del fluido durante la descarga se ha mantenido constante en $0,600 \text{ m}^3/\text{h}$

7 de mayo

Energía solar

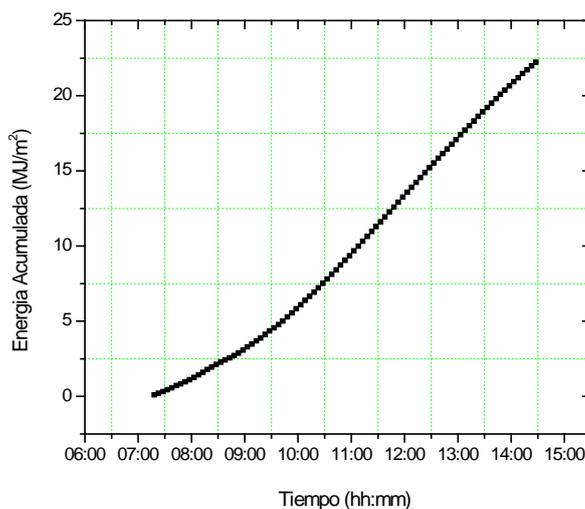


Gráfico 6.9. Comportamiento de la energía solar



En la grafica 6.9 se muestra la energía por metro cuadrado que se recibe del sol entre las 07:30 y 14:30 horas y la energía acumulada entre esas horas es 22.23 MJ/m^2

Radiación Solar

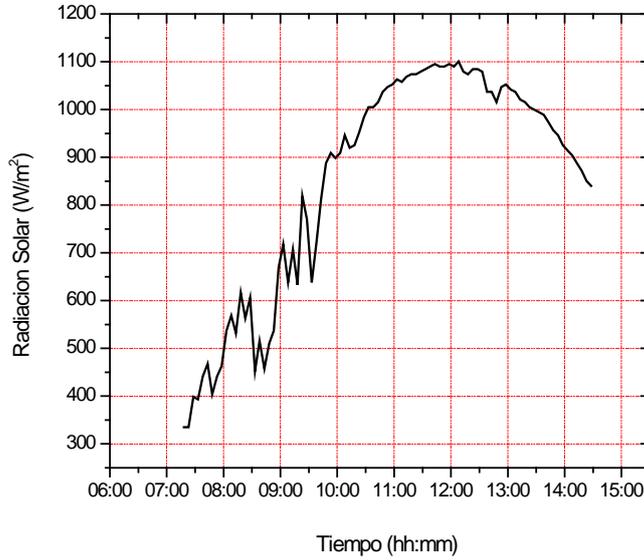


Grafico 6.10. Radiación solar

El grafico 6.10 muestra la intensidad de radiación solar entre las 07:30 y 14:30 horas, se observa que entre las 07:40 y 09:50 horas estaba parcialmente nublado

Perfil de temperatura de descarga

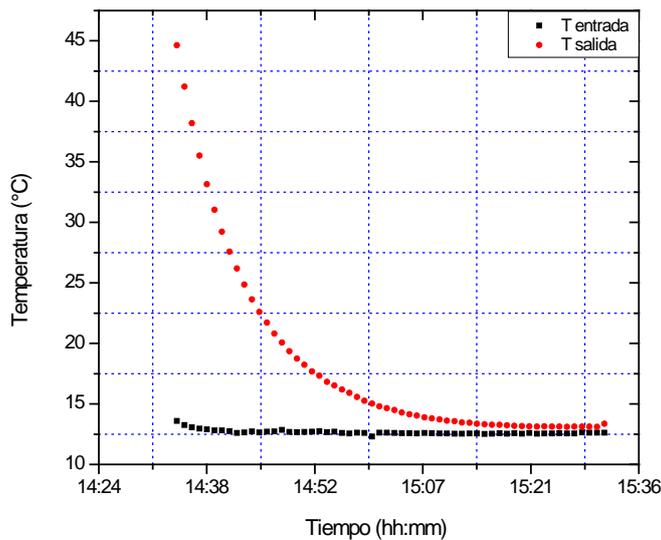


Grafico 6.11. Perfil de temperatura de descarga



En la figura 6.11 se tiene el perfil de temperatura de descarga del agua, la curva roja representa la temperatura de salida del agua y la curva negra representa la temperatura de ingreso de la red, se observa que la descarga se ha realizado hasta que la diferencia de temperatura entre el agua de descarga y el agua de la red que ingresa al sistema es menor que 1K, con estos datos y usando la ecuación (1) se obtiene la energía acumulada por el sistema, la cual es: 13.78 MJ

Flujo

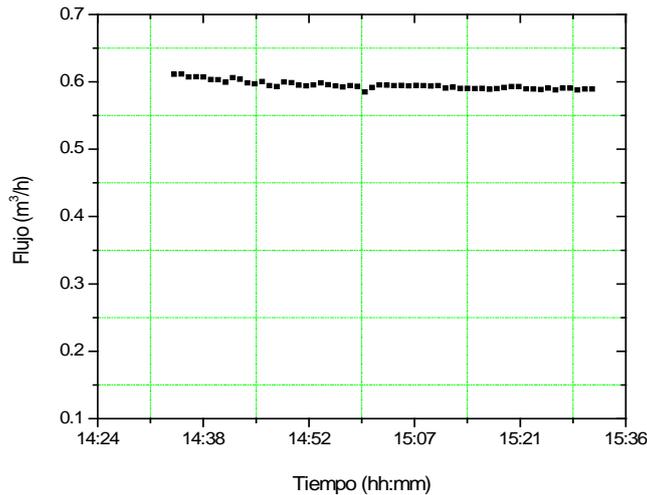


Gráfico 6.12. Flujo del fluido durante la descarga

En la grafica 6.12 se observa que el flujo del fluido durante la descarga se ha mantenido constante en $0,600 \text{ m}^3/\text{h}$

8 de mayo Energía solar

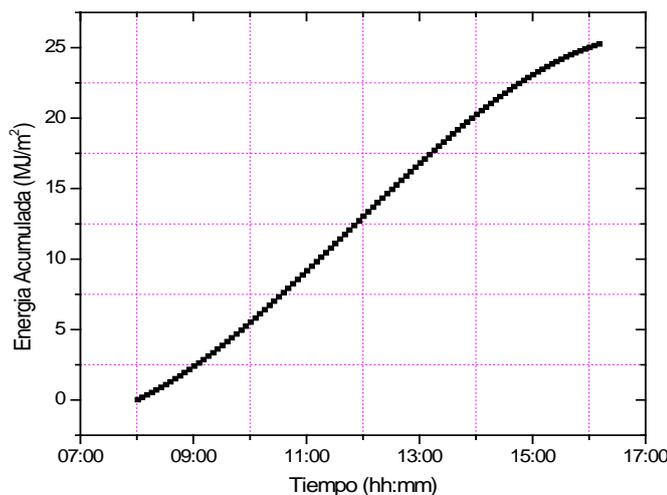


Gráfico 6.13. Comportamiento de la energía solar



En la grafica 6.13 se muestra la energía por metro cuadrado que se recibe del sol entre las 08 y 16 horas y la energía acumulada entre esas horas es 25.25 MJ/m^2

Radiación Solar

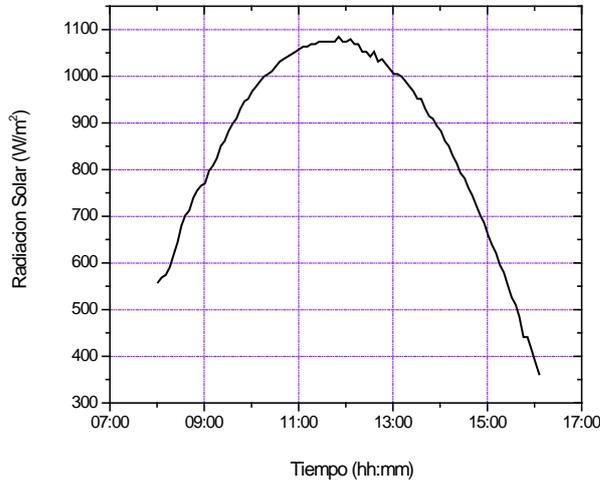


Grafico 6.14. Radiación solar

El grafico 6.14 muestra la intensidad de radiación solar entre las 08 y 16 horas, se observa que no ha habido nubosidad

Perfil de temperatura de descarga

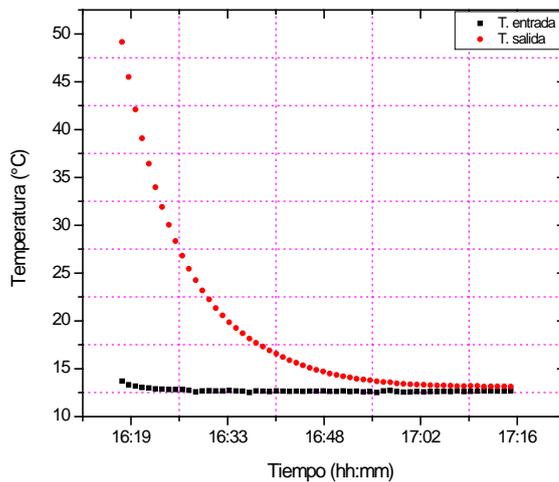


Grafico 6.15. Perfil de temperatura de descarga

En la figura 6.15 se tiene el perfil de temperatura de descarga del agua, la curva roja representa la temperatura de salida del agua y la curva negra representa la temperatura de ingreso de la red, se observa que la descarga se ha realizado hasta que la diferencia



de temperatura entre el agua de descarga y el agua de la red que ingresa al sistema es menor que 1K, con estos datos y usando la ecuación (1) se obtiene la energía acumulada por el sistema, la cual es: 16.02 MJ

Flujo

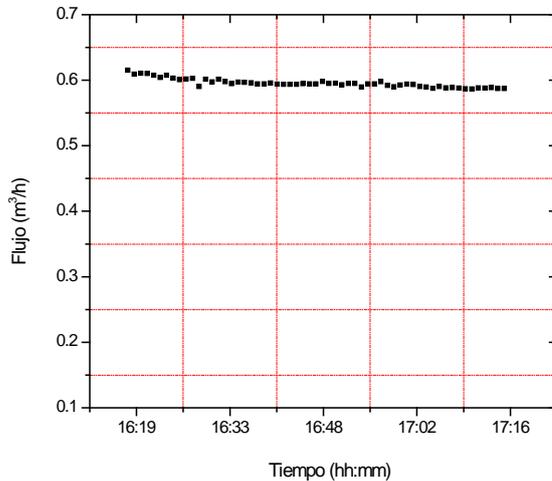


Gráfico 6.16. Flujo del fluido durante la descarga

En la grafica 6.16 se observa que el flujo del fluido durante la descarga se ha mantenido constante en $0,600 \text{ m}^3/\text{h}$

Rendimiento del sistema

Con los datos de energía solar acumulada y energía acumulada por el sistema para los diferentes días de ensayo, se hace la grafica de entrada salida del sistema

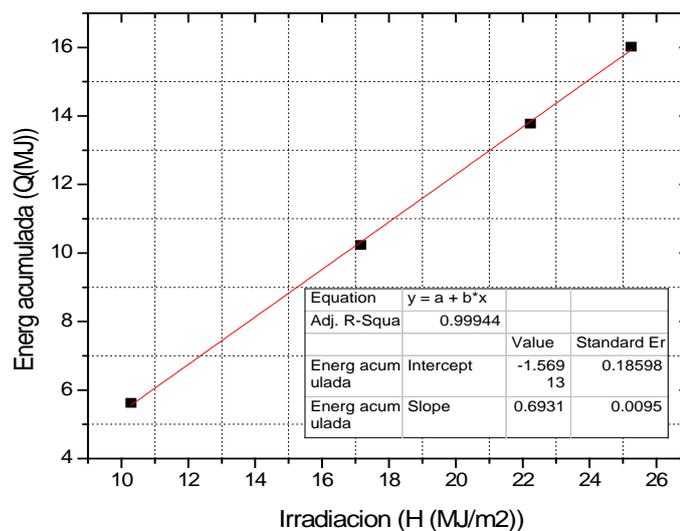


Gráfico 6.17. Salida de energía Q del sistema como función de la irradiación, para una temperatura de red de 14°C y temperatura ambiente de 18°C



Se aplica el método de regresión lineal múltiple para hallar las constantes de la ecuación (2), estas son:

$$a_1 = 0,69362$$

$$a_2 = 0,26372 \text{ MJ/}^{\circ}\text{C}$$

$$a_3 = -3,074 \text{ MJ}$$

La constante $a_1 = 0,69362$, representa la eficiencia del calentador solar que en porcentaje es 69,4%

Pronostico de rendimiento a largo plazo

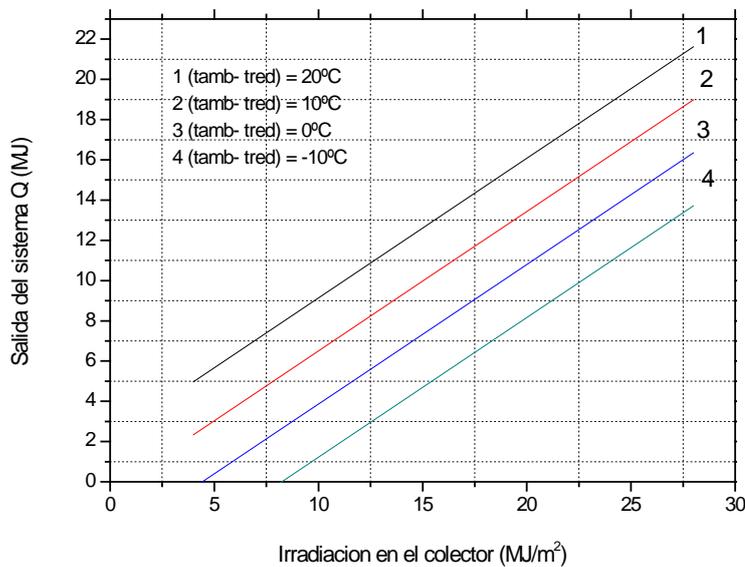


Gráfico 6.18. Salida de energía Q del sistema como función de la irradiación, para una diferencia $(t_{\text{ambiente}} - t_{\text{red}}) = 20^{\circ}\text{C}, 10^{\circ}\text{C}, 0^{\circ}\text{C} - 10^{\circ}\text{C}$

Usando las constantes halladas $a_1 = 0,69362$, $a_2 = 0,26372 \text{ MJ/}^{\circ}\text{C}$, $a_3 = -3,074 \text{ MJ}$ en la ecuación (2) tenemos:

$$Q = 0,69362H + 0,26372(t_{\text{amb}} - t_{\text{red}}) - 3,074 \quad (7)$$

Con esta ecuación se puede trazar otras rectas para diferentes condiciones de $(t_{\text{amb}} - t_{\text{red}})$ y H , lo cual nos permite predecir el comportamiento del calentador solar en cualquier época del año, ya que la temperatura de red y la temperatura ambiente varía según la estación y también lo hace la intensidad de radiación solar.

En la figura 6.18, se han trazado cuatro rectas para las condiciones que se muestra $(t_{\text{ambiente}} - t_{\text{red}}) = 20^{\circ}\text{C}, 10^{\circ}\text{C}, 0^{\circ}\text{C} - 10^{\circ}\text{C}$, entonces, a partir de estas rectas se puede predecir cuál sería la energía acumulada por el agua del calentador solar en cualquier día del año donde se tiene una estimación aproximada de la temperatura del agua de la red, la temperatura del ambiente y el promedio de la energía solar típica de la época.



6.2 Determinación de pérdidas de calor del dispositivo de almacenamiento

Con los datos registrados, a partir de la grafica 6.19 y las ecuaciones (3) y (4), se calcula el coeficiente de pérdida de calor del dispositivo de almacenamiento con la ecuación:

$$U_s = \frac{V_i \rho_f c_{p,f}}{\Delta T} \text{Ln} \left(\frac{t_i - t_{amb}}{t_f - t_{amb}} \right) = 2,19 \text{ J/sC}$$

y las pérdidas de calor del dispositivo de almacenamiento con la ecuación:

$$Q_{perd} = V_i \rho_f c_{p,f} [t_i - t_{amb(noches)}] \left[1 - \exp \left(- \frac{U_s \Delta t_i}{V_i \rho_f c_{p,f}} \right) \right] = -6,83 \text{ MJ}$$

6.3 Determinación de la velocidad de calentamiento y enfriamiento

Se cargo el tanque de almacenamiento de la terma, con agua a una temperatura de 8.4 °C a las 20:30 horas del día 09/05/2013.

Se monitoreo las temperaturas del interior del tanque en su parte media, la temperatura ambiente, la radiación solar y la velocidad de viento desde las 20:30 horas del 09/05/2013 hasta las 18:30 horas del 14/05/2013

Los resultados se muestran en el gráfico siguiente.

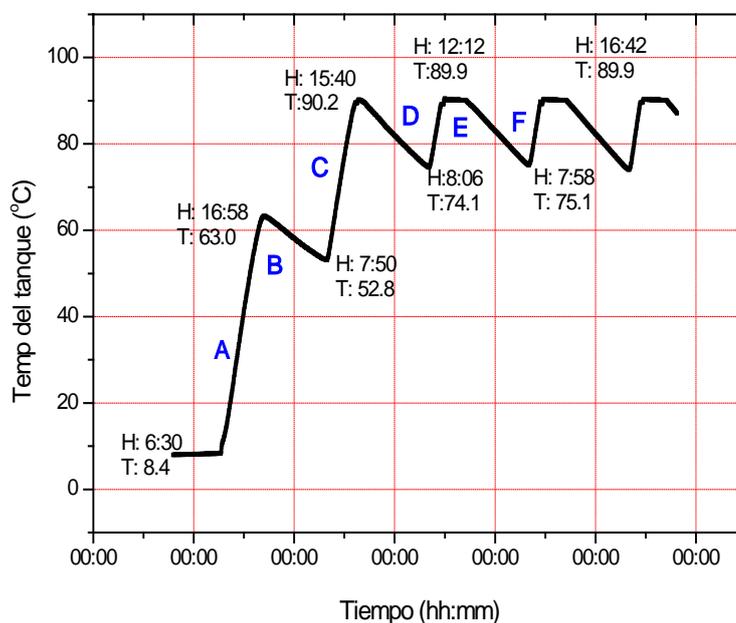


Gráfico 6.19. Temperatura del tanque de almacenamiento (°C) en función del tiempo (horas del día)



1 día de monitoreo.

Tanque de almacenamiento:

El calentamiento en la parte media del tanque de almacenamiento se inicia con una temperatura de $9,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (06:30 horas del día 10/05/2013) hasta $63,00\text{ }^{\circ}\text{C}$ (16:58 horas del día 10/05/2013), con una velocidad de calentamiento de $6,48\text{ }^{\circ}\text{C/hora}$. A partir de las 16:58 horas la temperatura desciende hasta $52,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (07:50 horas del día 11/05/2013) siendo la velocidad de enfriamiento de $-0,81\text{ }^{\circ}\text{C/hora}$.

2 día de monitoreo.

Tanque de almacenamiento:

El calentamiento en la parte media del tanque de almacenamiento se inicia con una temperatura de $52,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (07:50 horas del día 11/05/2013) hasta $90,20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (15:40 horas del día 11/05/2013), con una velocidad de calentamiento de $6,24\text{ }^{\circ}\text{C/hora}$. A partir de las 15:40 horas la temperatura desciende hasta $74,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (08:06 horas del día 12/05/2013) siendo la velocidad de enfriamiento de $-1,056\text{ }^{\circ}\text{C/hora}$.

3 día de monitoreo

Tanque de almacenamiento:

El calentamiento en la parte media del tanque de almacenamiento se inicia con una temperatura de $74,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (08:06 horas del día 12/05/2013) hasta $90,90\text{ }^{\circ}\text{C}$ (12:12 horas del día 12/05/2013), con una velocidad de calentamiento de $6,0\text{ }^{\circ}\text{C/hora}$. A partir de las 15:56 horas la temperatura desciende hasta $75,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (07:58 horas del día 13/05/2013) siendo la velocidad de enfriamiento de $-1,08\text{ }^{\circ}\text{C/hora}$.

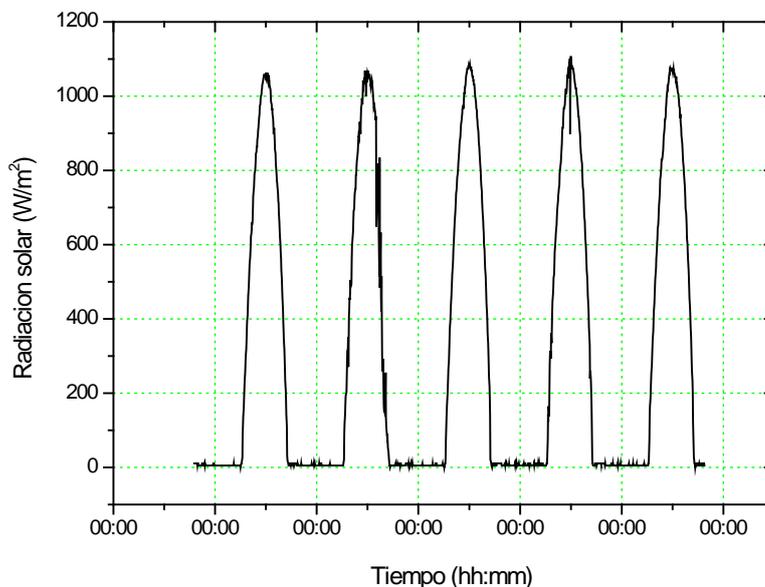


Gráfico 6.20. Comportamiento de la radiación solar de los cinco días de evaluación



En la grafica 6.20 se muestra la radiación solar de los cinco días de evaluación, mediante un procedimiento de integración se obtuvo la energía solar acumulada para cada día, los resultados para los primeros tres días se muestran a continuación.

1 día de monitoreo: Energía de la radiación solar acumulada desde las 5:00 a 18:00 horas fue de:

G(MJ/m ²)	G(KWh/m ²)
27,09	7,53

2 día de monitoreo: Energía de la radiación solar acumulada desde las 5:00 a 18:00 horas fue de:

G(MJ/m ²)	G(KWh/m ²)
25.49	7,08

3 día de monitoreo: Energía de la radiación solar acumulada desde las 5:00 a 18:00 horas fue de:

G(MJ/m ²)	G(KWh/m ²)
28.03	7,79

Utilizando los datos de la grafica 6.1 y la ecuación (5) obtenemos la energía térmica útil ganada por la terma de 120 litros (120 kg):

T inicial(°C)	T final(°C)	ΔT(°C)	mc(tf-ti)(MJ)
9,8	63.0	53,2	26,7
52.8	90.2	37.4	18,7
74.1	89.9	15.8	7,9

Tabla 6.1.Energía térmica útil

Como el diámetro del tubo es: 0,048 m

Longitud del tubo: 1,56 m.

Entonces el área de absorción por tubo es: 0,075 m²

Área de absorción para los 15 tubos es: 1,12 m²

Luego usando los datos de la grafica 6.4 y la formula (6) obtenemos la energía solar por unidad de área recibida.

Día	G(MJ/m ²)	Es(MJ)
1	27,09	30,34
2	25,49	28,55
3	28,03	31,39

Tabla 6.2. Energía solar captada



7. Conclusiones

La eficiencia del calentador solar es de 69,4%, la cual no depende de las condiciones climáticas.

A partir de la ecuación (7) y el gráfico 6.18, se puede predecir cuál sería la energía acumulada por el agua del calentador solar, para cualquier valor de energía solar captada y para las condiciones de temperatura del agua de red y ambiente que se muestran ($t_{\text{ambiente}} - t_{\text{red}} = 20\text{C}^0, 10\text{C}^0, 0\text{C}^0 - 10\text{C}^0$).

Si se conoce una estimación de la temperatura de red, la temperatura ambiente y la intensidad de radiación solar, de cualquier época del año, entonces, con la ayuda de la ecuación (7) se pueden trazar rectas parecidas a las del gráfico 6.18, y por tanto se puede predecir una estimación de la energía acumulada por el agua del calentador en esa época. Esta estimación se podría aplicar a otras regiones geográficas, si se conocen las condiciones climáticas del lugar.

Las pérdidas de energía del tanque acumulador son de 6,83 MJ la que ocurre durante 14 horas desde las 17 horas hasta las 7 horas del día siguiente.

La velocidad de calentamiento del tanque acumulador ($6,48^0\text{C/h}, 6,24^0\text{C/h}, 6,0^0\text{C/h}$), para tres días de monitoreo que se analiza, mantiene un valor casi constante, la cual en promedio, nos indica que la temperatura del agua aumenta $6,2^0\text{C}$ por cada hora, esto nos indica que en la fase de calentamiento, el calentador solar funciona bien.

La velocidad de enfriamiento del tanque acumulador ($-0,81^0\text{C/h}, -1,056^0\text{C/h}, -1,08^0\text{C/h}$) que en promedio, es $-0,98^0\text{C/h}$, nos indica que durante el enfriamiento (aproximadamente 13 a 14 horas sin radiación solar), por cada hora que transcurre, la temperatura del agua del tanque acumulador disminuye en $0,98^0\text{C}$, por lo tanto podemos afirmar que el aislamiento del tanque acumulador es bueno.

8. Recomendaciones

Si se quiere estimar una predicción del comportamiento del calentador solar en otras regiones geográficas, se debe tener datos de la temperatura del agua de la red, temperatura ambiente, y valores de la intensidad de radiación solar para distintas épocas del año.



9. Referencias Bibliograficas

- [1] Budihardjo, G.L. Morrison, Performance of water-in-glass evacuated tube solar water heaters, Solar Energy, 2008
- [2] Jeong Tai Kim a, Hyun Tae Ahn, The performance simulation of all-glass vacuum tubes with coaxial fluid conduit, Heat and Mass Transfer, 2007
- [3] G.L. Morrison *, I. Budihardjo, M. Behnia, Water-in-glass evacuated tube solar water heaters, Solar Energy, 2003
- [4] S.V. Joshi, R.S. Bokil, J.K. Nayak, Test standards for thermosyphon-type solar domestic hot, Solar Energy, 2003
- [5] COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES, " **Recommendations for European Solar Collector Test Methods** ". U.K., 1980.
- [6] ZILLES, R. " **Comparação Experimental de Testes de Coletores Solares planos com Simulador e com Radiação Solar**". Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, 1987.
- [7] DUFFIE, J.A. y BECKMAN, W.A. " **Solar Engineering of Thermal Processes** ". Wiley, New York, 1991
- [8] CHASSÉRIAUX, J.M. " **Conversión térmica de la Radiación Solar**". Bordas, Paris, 1990.
- [9] Cora Placco, Luis Saravia, Carlos Cadena, **Colectores solares para agua caliente** INENCO, UNSa –CONICET, Argentina 2008
- [10] Valera Aníbal, Energía Solar II, Asamblea Nacional de Rectores, Lima Perú 2007
- [11] LINTHORST, J.M. "Natural **Convection Suppression in Solar Collector** ". EFF, Holland, 1985.



10. Anexos

ANEXO A

CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS CALIBRACIÓN DE FLUJOMETRO

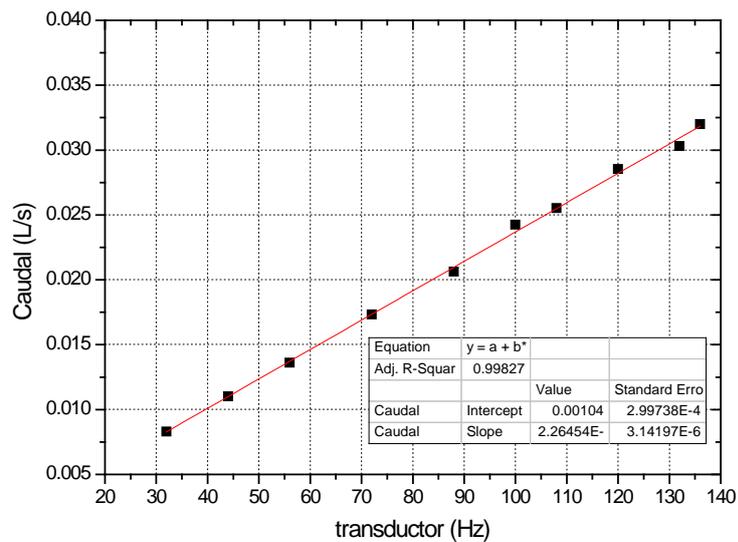


Grafico A.1. Caudal (L/s) en función de la frecuencia del transductor(Hz)



CALIBRACIÓN DE SENSORES DE TEMPERATURA

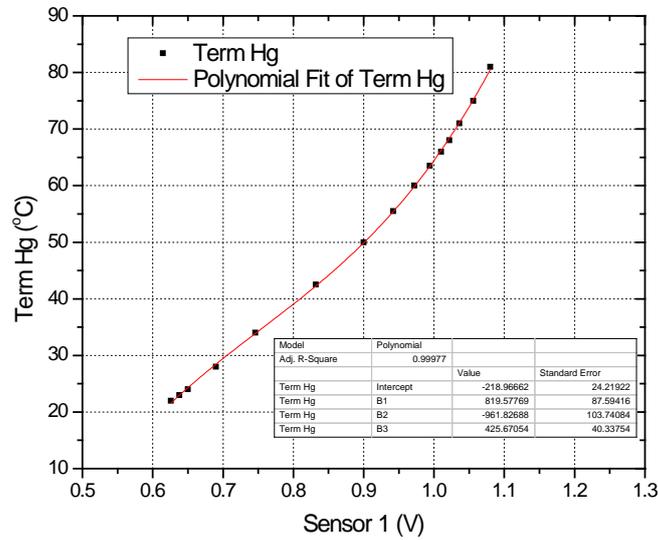


Grafico A.2. Temperatura termómetro patrón (°C) en función del sensor de temperatura de entrada al colector (°C)

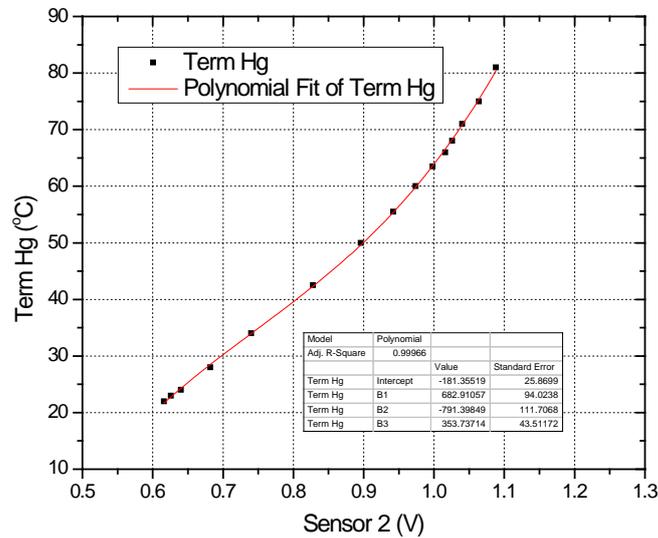


Grafico A.3. Temperatura termómetro patrón (°C) en función del sensor de temperatura de salida del colector (°C)

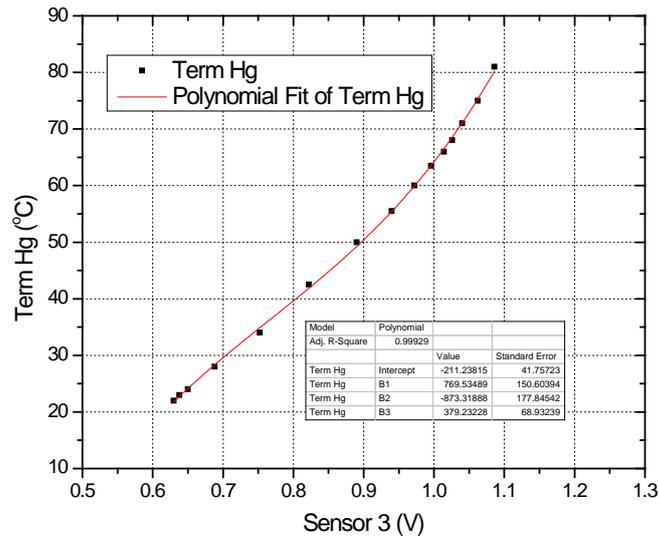


Grafico A.4. Temperatura termómetro patrón (°C) en función del sensor de temperatura de ambiente(°C)

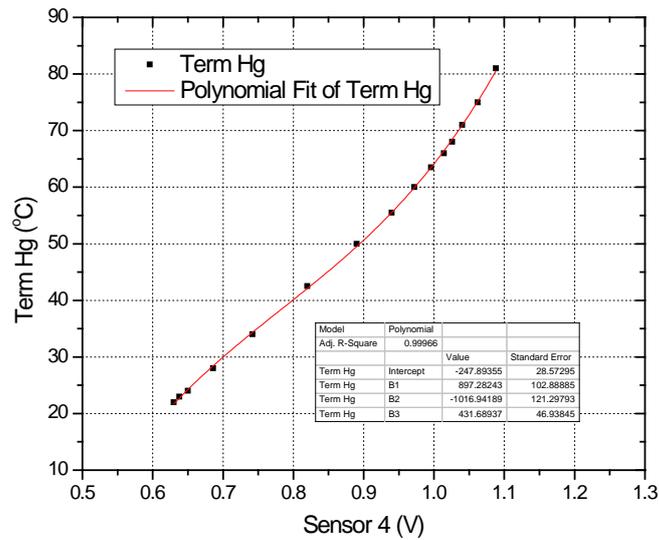


Grafico A.5. Temperatura termómetro patrón (°C) en función del sensor de temperatura de tanque (°C)

