

Evaluación de la eficiencia de un calentador solar de tubos evacuados implementado con una tarjeta Arduino Mega

Jeovany Rafael Rodríguez Mejía

Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas, Av. López Velarde No.
801 CP 98060 Zacatecas, México. 044 4921689055
ingrafaelrodriguez.rr@gmail.com

Francisco Eneldo López Monteagudo

Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas, Av. López Velarde No.
801 CP 98060 Zacatecas, México. 044
eneldolm@yahoo.com

María Auxiliadora Araiza Esquivel

Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas, Av. López Velarde No.
801 CP 98060 Zacatecas, México. 044
araizama@cantera.reduaz.m

Víctor Manuel García Saldívar

Unidad Académica de Ingeniería Química, Universidad Autónoma de Zacatecas, Av. López Velarde No.
801 CP 98060 Zacatecas, México. 044
vmgarcia@uaz.edu.mx

Resumen

El siguiente documento presenta el rendimiento térmico obtenido de un sistema de calentamiento de agua de tubos evacuados; caracterizado y evaluado en el Campus Universitario Siglo XXI de la Universidad Autónoma de Zacatecas. Donde se refleja la evaluación del sistema operando dinámicamente, con el objetivo de describir la existencia de afecciones por nubosidad y mala estratificación del fluido las cuales provocan la caída

de la eficiencia del colector. Por ende al obtener las curvas de operación del sistema y realizar un ajuste lineal, se observan que las afecciones provocadas por la nubosidad y la estratificación deficiente del fluido al iniciar la operación del sistema por la mañana, limitan considerablemente el calentamiento del agua de una forma eficaz.

Palabras Claves: colector solar tubos evacuados, energía solar, rendimiento térmico, termosolar, velocidad de flujo.

1. Introducción

La siguiente investigación determina el rendimiento térmico en periodos de una hora de un calentador solar de tubos evacuados ubicado en el Campus Universitario Siglo XXI de la Universidad Autónoma de Zacatecas, caracterizado con sensores de temperatura, velocidad de viento, radiación solar y caudal. Las señales llegan de forma analógica y digital, por tal motivo se utilizan dos sistemas de adquisición de datos. El calentador solar caracterizado es de 8 tubos evacuados con un tanque de almacenamiento de 78 litros y un área de colección de un metro cuadrado. El sistema es evaluado durante un periodo de 8 horas, considerando días nublados y soleados. Se realiza el cálculo de la eficiencia instantánea del calentador, determinando así un modelo matemático linealizado del sistema evaluado.

La motivación para llevar a cabo esta experimentación se basa en conocer el rendimiento térmico alcanzado por los calentadores solares en la zona de Zacatecas, además de la velocidad de flujo que se alcanza por circulación natural, ya que esta afecta de manera directa el rendimiento del sistema.

Existen varias referencias con respecto a las evaluaciones tanto del rendimiento térmico como de la tasa de flujo en los calentadores solares de tubos evacuados. En Sydney se realizó la evaluación de un sistema de tubos al vacío. El objetivo era validar un modelo de simulación para la circulación por termosifón en los tubos evacuados. Se compara el

rendimiento con uno de placa plana, encontrándose que es más eficiente el segundo para el calentamiento del agua doméstica [1, 2].

De igual forma se tiene la referencia de la evaluación realizada a un calentador solar de tubos evacuados, donde se analizan la velocidad de flujo a través de los tubos. Se considera un modelo matemático, asumiendo que no existe interacción alguna entre los tubos adyacente. La medición del flujo se logra a partir de la técnica de velocimetría de imágenes de partículas. Los resultados muestran que la tasa de flujo de convección natural es la suficiente para perturbar la estratificación del depósito [3].

Otra referencia considerada importante es la evaluación teórica realizada a este tipo de sistemas para diferentes condiciones de operación, se analiza por medio de dinámica de fluidos computacional. Se plantean tres longitudes de tubo, que varían de 0,59 m a 1,47 m, los modelos se simulan con cinco flujos máxicos de entrada que varían de 0,05 kg / min a 10 kg / min con una temperatura de entrada constante de 333 K. Entonces se obtiene que la longitud del tubo más corta alcanza la más alta eficiencia, la tasa de flujo de entrada óptima se dio entre 0,4 kg / min a 1 kg / min y por último se muestran pequeñas variaciones en las eficiencias [4].

2. Desarrollo

El proceso de calentamiento de agua por medio de la energía solar considera la transformación de la radiación térmica a través de un sistema colector que absorbe esta energía y la transforma en calor útil, el mismo que es aprovechado por el fluido en este caso agua para elevar su temperatura y por efecto termosifónico desplazarse hacia la parte más alta del tanque de almacenamiento. Considerando este efecto se han desarrollado sistemas de calentamiento de agua como el que se evalúa. El análisis del sistema se lleva a cabo a partir del conocimiento de ciertos parámetros los cuales se obtienen del sistema en operación. Para determinar la eficiencia instantánea del sistema en períodos de una hora se considera, el calor útil del sistema Q_u , el área de colección A_c y la irradiancia incidida sobre el colector por hora H_T , relacionándose con la ecuación (1) [5].

$$\eta_i = \frac{Q_u}{A_c H_T} \quad (1)$$

La eficiencia se obtiene en períodos de una hora. Entonces el calor útil del sistema se logra obtener conociendo la tasa de flujo másico del sistema en operación \dot{m} , la capacidad calorífica del agua C_p y las temperaturas de entrada y salida del sistema T_s y T_i . Por lo que la ecuación (2) logra relacionar el calor útil del sistema [5].

$$Q_u = \dot{m} C_p (T_s - T_i) \quad (2)$$

El área de colección se basa aun colector de tubos evacuados con reflector, entonces el área es el producto entre la longitud de los tubos L_t y el ancho del reflector W_r . Como se observa en la ecuación (3) [5].

$$A_c = L_t \times W_r \quad (3)$$

Por último la irradiancia sobre la superficie inclinada en una hora H_T , se obtiene del piranómetro CMP3. La temperatura, se adquiere a partir de los termopares tipo J de cobre-constantán; se registra la temperatura del agua de ingreso al sistema T_i , la temperatura de salida del sistema T_s y la temperatura ambiente T_a . La velocidad del aire se obtiene a partir del anemómetro de tres copas Campbell. Las señales se adquieren con el adquirente Agilent, para cada minuto.

El caudal se obtiene a partir de un flujómetro Seametrics, con un rango de flujo de 0.2 a 15 GPM. La señal se adquiere con una tarjeta Arduino Mega, para poder determinar la tasa de flujo. El sistema caracterizado en evaluación se observa a continuación en Fig.1.



Fig.1. Sistema Caracterizado.

El adquisidor Agilent es un sistema autónomo para la adquisición de datos con la capacidad de medir voltaje, corriente y frecuencia en forma analógica. La tarjeta Arduino Mega de igual forma es un sistema de adquisición de datos con la capacidad de adquirir señales analógicas y digitales. Los sistemas de adquisición se observan en la Fig. 2.

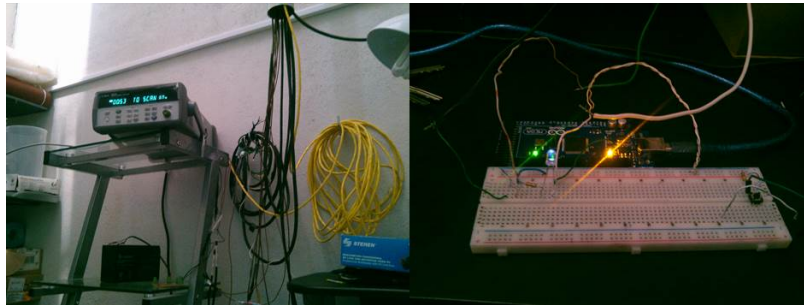


Fig.2. Sistemas de adquisición de datos.

Se determina el tiempo solar a partir de la ecuación (4) [7].

$$TS = 4(L_{st} - L_{loc}) + E + TC \quad (4)$$

Donde TS se define como el tiempo solar, L_{st} longitud estándar, L_{loc} longitud local, E definida como la ecuación del tiempo y TC se refiere al tiempo civil. Entonces los parámetros en consideración son el C_p del agua con un valor de $4186 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$, un área de colección de un metro cuadrado. Para determinar el flujo másico del sistema se considera la relación entre el caudal Q y la densidad del agua ρ , como se refiere la ecuación (5) [5].

$$\dot{m} = \rho Q \quad (5)$$

Para considerar la idealización del sistema evaluado se determinan dos parámetros definidos a partir de la eficiencia instantánea obtenida y la relación entre el gradiente de temperatura y la irradiancia incidida promedio horaria. Las relaciones se observan en las ecuaciones (6) y (7) [7, 8].

$$X = \frac{(T_i - T_a)}{H_T} \quad (6)$$

$$Y = \frac{\dot{m}C_p(T_s - T_i)}{A_c H_T} \quad (7)$$

3. Resultados

El calentador solar de tubos evacuados es evaluado durante su operación en cuatro días: 28 de mayo, 29 de mayo, 3 de junio y 4 de junio, todos durante el año en curso. Se logran obtener los valores de operación del sistema. En mayo se considera un flujo másico de 0.00833 kg/s, para junio se considera un flujo másico de 0.00916 kg/s ya que la variación detectada en el caudal es mínima durante la operación. Para la evaluación del 28 de mayo; el medio día solar se dio a las 12:11:06 horas con respecto al tiempo civil. Los valores se ven representados en la siguiente Tabla 1.

Tiempo Civil	H _T (W/m ²)	T _a (°C)	T _i (°C)	T _s (°C)	V _v (m/s)	η _i
8:11 a 9:11	226.41	19.00	36.64	36.46	0.36	- 3%(Perdidas)
9:11 a 10:11	380.94	21.34	36.32	38.63	0.28	21%
10:11 a 11:11	674.37	24.28	36.37	42.67	0.81	33%
11:11 a 12:11	739.03	25.35	36.78	46.52	2.14	46%
12:11 a 13:11	938.56	27.23	37.55	50.81	2.32	49%
13:11 a 14:11	673.40	27.02	38.51	53.48	121.23	78%
14:11 a 15:11	960.44	30.81	40.06	58.52	2.13	67%
15:11 a 16:11	558.27	29.20	42.09	59.76	1.57	110% (Caída de Irradiancia)

Tabla 1. Operación del sistema el día 28 de mayo.

Para la evaluación del 29 de mayo; el medio día solar se dio a las 12:10:36 horas con respecto al tiempo civil. Los valores se ven representados en la siguiente Tabla 2.

Tiempo Civil	H_T (W/m ²)	T_a (°C)	T_i (°C)	T_s (°C)	V_v (m/s)	η_i
8:10 a 9:10	133.62	18.23	49.28	49.09	1.05	-5%(Perdidas)
9:10 a 10:10	360.11	20.42	48.72	50.15	1.36	14%
10:10 a 11:10	420.02	21.67	48.53	52.19	1.02	30%
11:10 a 12:10	636.40	24.14	48.50	55.25	1.03	37%
12:10 a 13:10	567.20	24.34	48.83	57.07	2.36	51%
13:10 a 14:10	559.37	25.07	49.02	59.73	2.28	67%
14:10 a 15:10	283.84	24.33	49.35	59.90	1.55	130%(Caída de Irradiancia)
15:10 a 16:10	480.32	25.85	50.30	62.29	0.89	87%

Tabla 2. Operación del sistema el día 29 de mayo.

Para la evaluación del 3 de junio; el medio día solar se dio a las 12:10:16 horas con respecto al tiempo civil. Los valores se ven representados en la siguiente Tabla 3.

Tiempo Civil	H_T (W/m ²)	T_a (°C)	T_i (°C)	T_s (°C)	V_v (m/s)	η_i
8:10 a 9:10	214.19	19.64	55.80	56.59	1.41	14%
9:10 a 10:10	321.86	19.53	56.11	57.00	2.95	11%
10:10 a 11:10	550.44	21.90	56.66	58.61	4.04	14%
11:10 a 12:10	894.92	24.51	56.76	62.45	4.18	24%
12:10 a 13:10	816.08	25.14	56.51	67.21	3.86	50%

13:10 a 14:10	1,037.46	29.94	56.13	71.32	2.73	56%
14:10 a 15:10	1,018.76	27.83	57.93	74.81	2.86	64%
15:10 a 16:10	940.99	28.85	60.16	76.87	2.63	68%

Tabla 3. Operación del sistema el día 3 de junio.

Para la evaluación del 4 de junio; el medio día solar se dio a las 12:11:06 horas con respecto al tiempo civil. Los valores se ven representados en la siguiente Tabla 4.

Tiempo Civil	H_T (W/m ²)	T_a (°C)	T_i (°C)	T_s (°C)	V_v (m/s)	η_i
8:10 a 9:10	213.60	18.01	54.78	54.26	2.04	- 9%(Perdidas)
9:10 a 10:10	444.93	20.54	53.90	56.53	1.94	23%
10:10 a 11:10	660.84	24.41	53.31	60.04	1.06	39%
11:10 a 12:10	783.16	26.63	53.66	63.18	1.10	47%
12:10 a 13:10	912.69	28.21	54.62	66.87	2.75	51%
13:10 a 14:10	1,018.99	29.94	56.13	71.32	2.73	57%
14:10 a 15:10	849.14	30.08	57.93	74.81	2.86	76%

15:10 a 16:10	644.06	29.90	60.16	77.87	2.63	105%(Caída de Irradiancia)
---------------	--------	-------	-------	-------	------	----------------------------

Tabla 4. Operación del sistema el día 4 de junio.

Entonces considerando las evaluaciones desarrolladas se logra ajustar el sistema a un modelo matemático con tendencia lineal, a partir de las curvas de eficiencia para cada día de evaluación. Dichos parámetros se observa en la Tabla 5. De igual forma se observan en las Figuras siguientes Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5 y Fig. 6 las curvas de eficiencia alcanzadas por el sistema en cuestión; así como la tendencia lineal que se supone en cada una.

El modelo matemático se deriva de la siguiente suposición donde el sistema tiene una tendencia lineal, representada por la ecuación (8) [4, 6].

$$Y = A + BX. \tag{8}$$

Donde A corresponde al máximo valor de calor absorbido, B corresponde a la pendiente del sistema que se relaciona con las pérdidas del mismo con signo negativo.

Debido a que la eficiencia instantánea de un sistema de calentamiento solar de agua, puede describirse también como la cantidad de calor absorbido por el sistema menos las pérdidas del mismo, se logra representar a partir de la ecuación (9) [4].

$$\eta_i = F_R \left[(\tau\alpha) - U_L \frac{(T_i - T_a)}{H_T} \right] \tag{9}$$

Donde F_R se define como factor de remoción de calor, $(\tau\alpha)$ se conoce como el factor de eficiencia óptica, U_L se conoce como el coeficiente de pérdidas globales del sistema.

Relacionando las ecuaciones (8) y (9), pueden definirse que la pendiente corresponde al valor alcanzado por el producto de F_R y U_L . [4]

Los valores que definen a la correspondencia entre los datos y la tendencia lineal están determinados por R².

Fecha	No. de Prueba	H _r (W/m ²)	V _v (m/s)	T _a (°C)	T _i (°C)	T _s (°C)	F _{RUL} (W/ m ² °C)	Y (%)	R ²
28/05/2014	1	643.93	1.37	25.53	35.64	59.76	13.1973	49	0.3471
29/05/2014	2	430.11	1.44	23.01	49.28	62.29	7.5861	48	0.2397
3/06/2014	3	724.34	3.73	24.32	56.81	76.87	7.6855	46	0.2456
4/06/2014	4	690.93	2.14	25.96	54.78	77.81	3.3947	49	0.4482

Tabla 5. Operación del sistema.

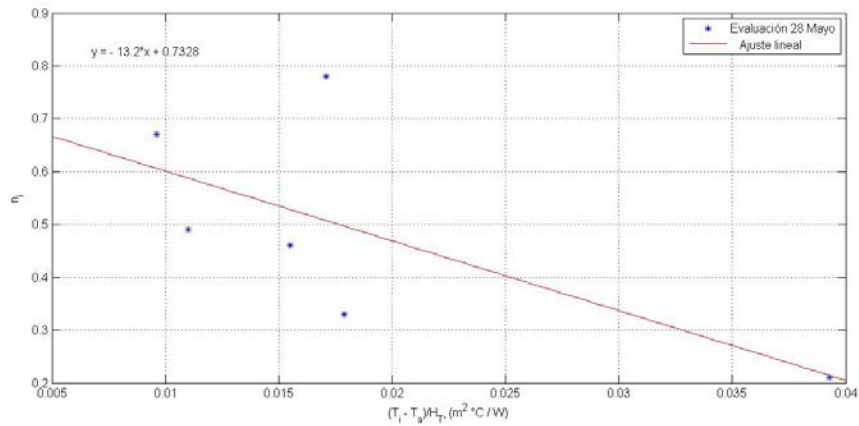


Fig. 3. Evaluación 28 de mayo.

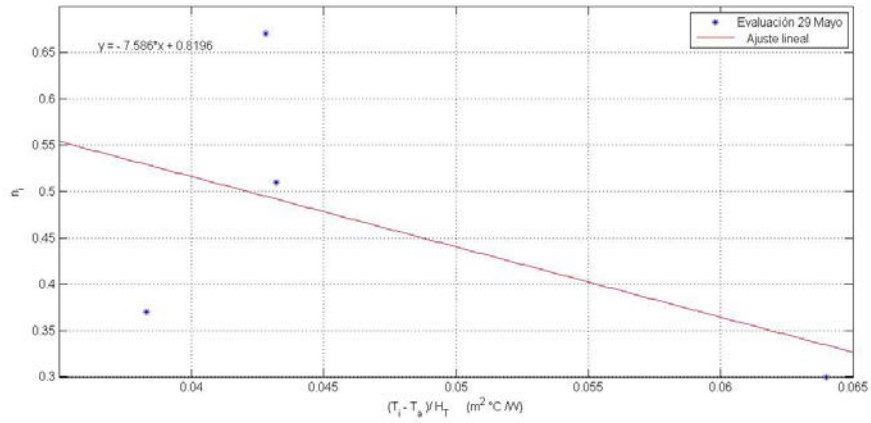


Fig. 4. Evaluación 29 de mayo.

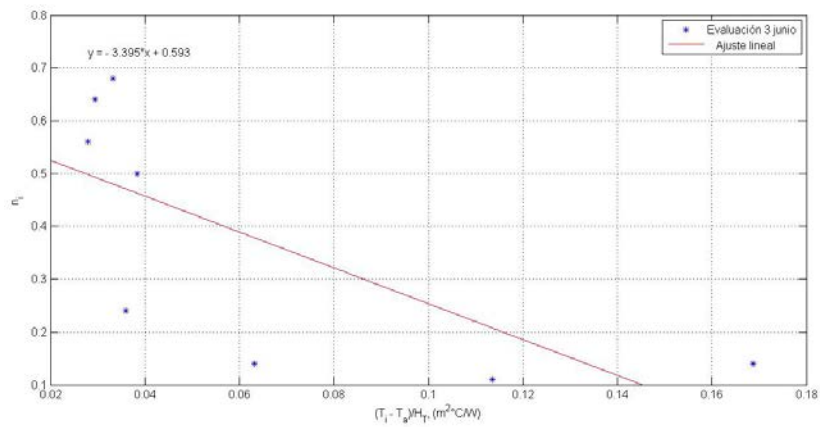


Fig. 5. Evaluación 3 de Junio.

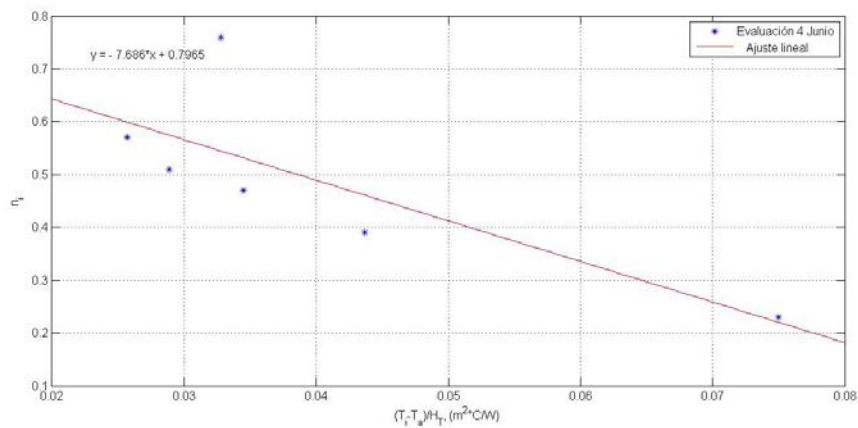


Fig. 6. Evaluación 4 de Junio.

Las siguientes graficas muestran las condiciones climatológicas con que fue evaluado el sistema ver en Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11 y Fig. 12. Donde se observan las características de la temperatura ambiente, velocidad de viento y la irradiancia incidida.

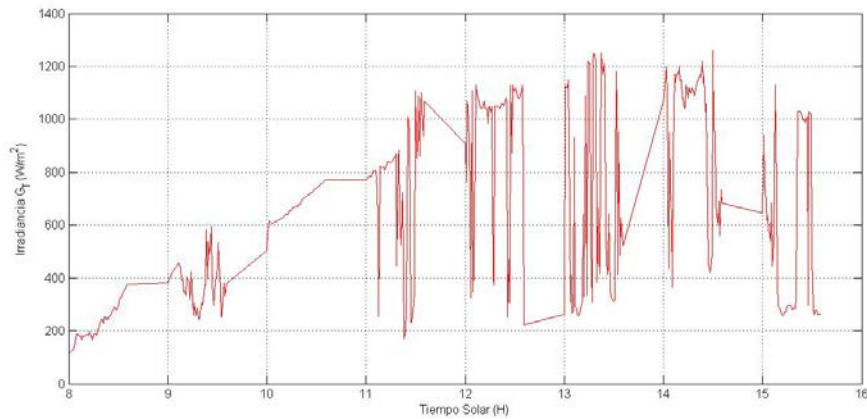


Fig. 7. Irradiancia solar más alta.

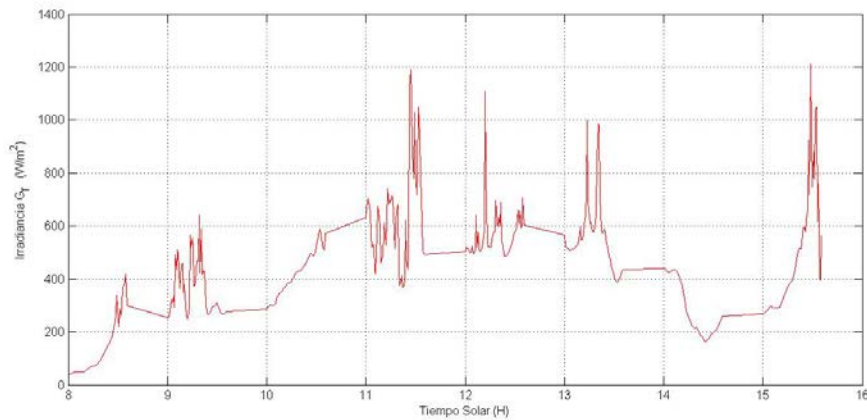


Fig. 8. Irradiancia solar más baja.

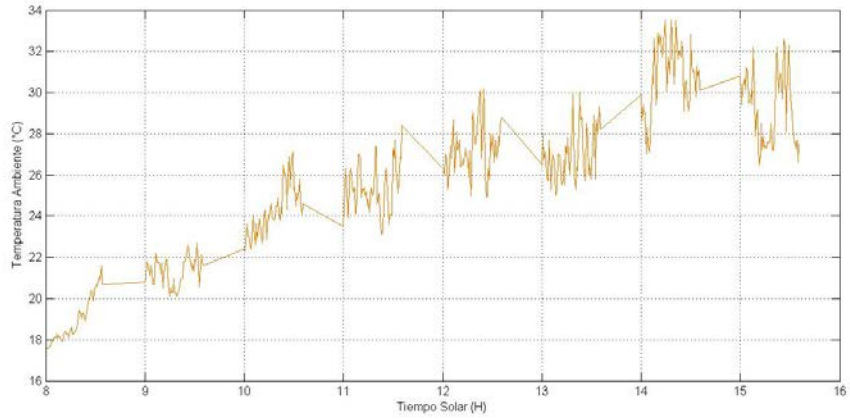


Fig. 9. Temperatura ambiente.

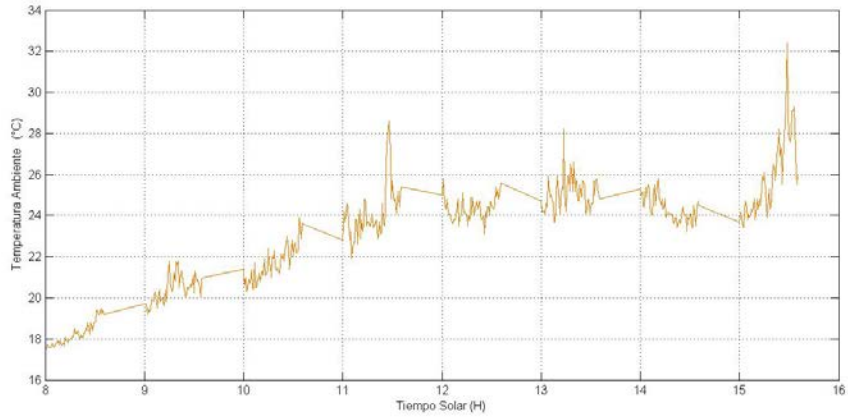


Fig. 10. Temperatura ambiente.

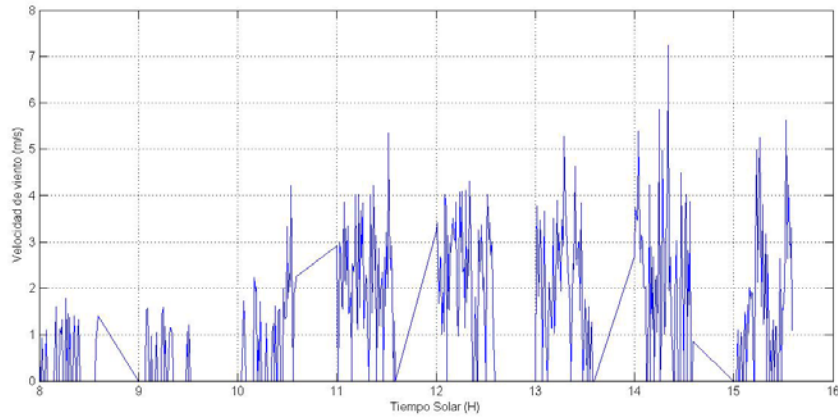


Fig. 11. Velocidad del viento más baja.

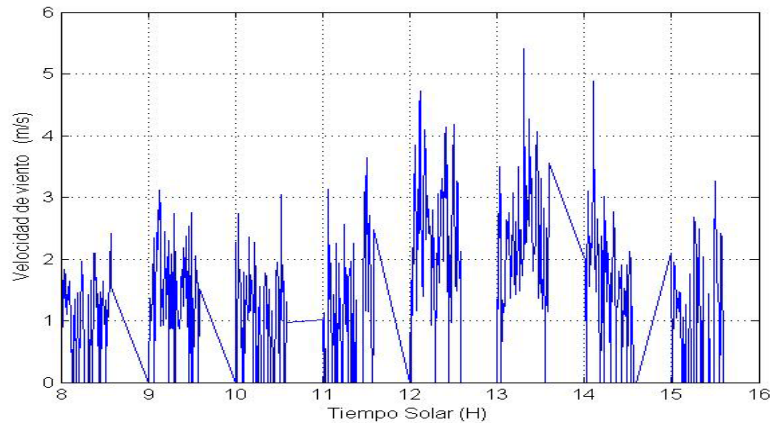


Fig. 12. Velocidad del viento más alta.

4. Discusión

Se observa gráficamente la afección que sufre el colector con respecto a la caída de irradiancia, además el mayor efecto que se tiene sobre la eficiencia del sistema es que al iniciar el proceso de calentamiento en las mañanas, el sistema inicia perdiendo energía debido a que la estratificación del fluido en el tanque de almacenamiento es deficiente, lo que ocasiona caídas considerables de la eficiencia durante ese primer período de calentamiento y al fin del día el sistema se ve afectado en el rendimiento global.

El sistema mantiene caliente el agua durante todo el día, aumentando gradualmente con respecto a la energía radiante absorbida, se ve poco afectado el colector por la caída de irradiancia. Si se desea aumentar la eficiencia en el sistema termosolar, debe considerarse que la estratificación en el tanque se afecta directamente. Durante esta evaluación experimental el sistema no es considerado como ideal, por lo tanto no se homogeniza el agua del tanque al inicio del proceso de calentamiento, para poder observar la afección que se tiene si el agua en el tanque está caliente al iniciar la operación del calentador.

Las curvas de eficiencia obtenidas del equipo termosolar, son referencia del comportamiento que este llega a tener durante el período que hay brillo solar, se lleva a cabo un ajuste lineal en cada curva de eficiencia con la intención de verificar que la tendencia que tiene el calentador solar no es lineal, cuando existen variables que lo afectan directamente durante su operación.

Considerando las afecciones que sufre el sistema puede proponerse mejoras al sistema para incrementar su eficiencia global, con la intención de aprovechar efectivamente el potencial solar existente.

5. Conclusiones

Se puede concluir que el sistema termosolar cubre con las necesidades de calentamiento de agua de servicio, debido a que los parámetros requeridos en la temperatura del agua son entre 50 °C y 60 °C, se obtienen al final del día. Pero el sistema es ineficiente debido a que no aprovecha de la mejor manera el potencial solar recibido, el cual alcanza valores promedio por encima de los 700 W/m², por lo tanto debe tenerse en cuenta que la mayor afección que tiene el sistema es la deficiente estratificación del fluido en el tanque de almacenamiento, al inicio de operación del sistema. Además de esto puede observarse que el flujo másico del sistema tiene influencia sobre el calor útil que se aprovecha, ya que se observa que las pérdidas energéticas en forma de calor son altas, del orden de los 13.19 W/m² °C; considerando la cantidad que logra aprovechar el fluido. Se concluye

que el sistema alcanza una eficiencia máxima de 49 %, la cual cubre las necesidades del calentamiento de agua, pero podría mejorarse este rendimiento con el objetivo de aprovechar eficientemente el recurso solar, minimizando las pérdidas de calor e incrementando la temperatura en el fluido.

6. Referencias

- [1] I. Budihardjo, G.L. Morrison, "Performance of water-in-glass evacuated tube solar water heaters", *Solar Energy*, Volume 83, Issue 1, January 2009, Pages 49–56.
- [2] E. Zambolin, D. Del Col, "Experimental analysis of thermal performance of flat plate and evacuated tube solar collectors in stationary standard and daily conditions", *Solar Energy*, Volume 84, June 2010, Pages 1382-1396.
- [3] G.L. Morrison, I. Budihardjo, M. Behniab, "Measurement and simulation of flow rate in a water-in-glass evacuated tube solar water heater", *Solar Energy*, Volume 78, Issue 2, February 2005, Pages 257–267, ISES Solar World Congress 2003.
- [4] L. J. Shah, S. Furbo, "Theoretical flow investigations of an all glass evacuated tubular collector", *Solar Energy*, Volume 81, Issue 6, June 2007, Pages 822–828.
- [5] J. Duffie and W. Beckman, *Solar Engineering Of Thermal Processes*, 3er edición, 2006, Jhon Wiley and sons Inc, New Jersey.
- [6] Norma Mexicana NMX-ES-002-NORMEX-2007, *Energía solar definiciones y terminología*, Sociedad Mexicana de Normalización y Certificación NORMEX, México, 2007.
- [7] Norma Mexicana NMX-ES-004-NORMEX-2010, *Energía solar evaluación térmica de sistemas solares para calentamiento de agua método de prueba*, Sociedad Mexicana de Normalización y Certificación NORMEX, México, 2007.

- [8] A. E. González Cabrera, Diseño, construcción, caracterizado y modelado de un sistema de almacenamiento de energía térmica para colectores solares, Tesis de maestría de la Universidad Autónoma de Zacatecas, 2013.

7. Autores

Jeovany Rafael Rodríguez Mejía, Graduado de Ingeniero Mecánico en 2012, de la Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco México. Actualmente estudiante de Maestría en la Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, de la Universidad Autónoma de Zacatecas, con domicilio en la Avenida Ramón López Velarde 801, CP 98060 Zacatecas, Zacatecas, México. ingrafaelrodriguez.rr@gmail.com.

Francisco Eneldo López Monteagudo Graduado de Ingeniero Electricista en 1981, Doctor en Ciencias Técnicas en 1999, en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba. Profesor titular de la Universidad Central de las Villas Cuba desde 1981 hasta el 2009. Actualmente es profesor-investigador Titular de la escuela de ingeniería eléctrica de la Universidad Autónoma de Zacatecas, con domicilio en la Avenida Ramón López Velarde 801, CP 98060 Zacatecas, Zacatecas, México. eneldolm@yahoo.com.

María Auxiliadora Araiza Esquivel, Dra. Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas, Av. López Velarde No 801 CP 98060 Zacatecas, México araizama@cantera.reduaz.mx.

Víctor Manuel García Saldívar, Unidad Académica de Ingeniería Química, Universidad Autónoma de Zacatecas, Av. López Velarde No 801 CP 98060 Zacatecas, México. vmgarcia@uaz.edu.mx.