

# **EVALUACIÓN DE UN SISTEMA SOLAR DE TUBOS DE VACÍO CON TUBOS DE CALOR PARA CALENTAMIENTO DE AGUA, USO INDUSTRIAL**

*EVALUATION OF A SOLAR SYSTEM OF VACUUM TUBES WITH HEAT PIPES FOR WATER HEATING, INDUSTRIAL USE*

***Alma Leticia Aguilar González***

Tecnológico Nacional de México / ITS de Ciudad Hidalgo, México  
*aaguilar@cdhidalgo.tecnm.mx*

***Natanael Vargas Pimentel***

Tecnológico Nacional de México / ITS de Ciudad Hidalgo, México  
*nvargas@cdhidalgo.tecnm.mx*

***José Ángel Morales Martínez***

Tecnológico Nacional de México / ITS de Ciudad Hidalgo, México  
*jmorales@cdhidalgo.tecnm.mx*

**Recepción:** 15/noviembre/2023

**Aceptación:** 9/diciembre/2024

## **Resumen**

La disponibilidad de energía en el mundo se ha convertido en un problema crucial, dado que la gran mayoría de los países, tanto los de en vías de desarrollo como los industrializados, se ven afectados por las crecientes demandas requeridas para satisfacer sus metas económicas y sociales, han adoptado un sistema de ahorro de energía, por esa razón están construyendo equipos que utilizan energía renovable para transformarla y poder abastecerse de ellas sin tener que gastar los recursos naturales y contaminar el medio ambiente.

El uso de calentadores solares es con el fin de aprovechar los rayos del sol, transformar la energía radiante proveniente de éste en energía calorífica y transferirla al agua para su almacenamiento y uso.

La presente investigación nos ayuda a determinar los posibles usos industriales por sus rendimientos técnicos.

**Palabras Clave:** evaluación energética, tubos al vacío, eficiencia.

## **Abstract**

*The availability of energy in the world has become a crucial problem, since the vast majority of countries, both developing and industrialized, are affected by the growing demands required to meet their economic and social goals have adopted an energy saving system, for that reason they are building equipment that uses renewable energy to transform it and be able to supply them without having to spend natural resources and pollute the environment.*

*The use of solar heaters is in order to take advantage of the sun's rays, transform the radiant energy from it into heat energy and transfer it to water for storage and use. This research helps us to determine the possible industrial uses for its technical performance.*

**Keywords:** *energy evaluation, vacuum tubes, efficiency.*

## **1. Introducción**

La energía es un insumo básico para el desarrollo de la vida humana. diariamente, cada ser humano consume una considerable cantidad de energía, solo para subsistir. Sus aplicaciones son tan amplias como nos podamos imaginar; por lo tanto, frente a la problemática de la escasez energética y el alto costo que las formas usuales de energía han tomado, ha llegado hora de buscar otras alternativas.

Una de las alternativas es hacer un uso más eficiente de la energía, sin embargo, debido a que la energía no puede dejar de utilizarse, es necesario, junto a esta solución, buscar una más que la complemente. Este complemento es precisamente el uso de energías renovables.

Las energías renovables son aquellas que provienen de fuentes naturales inagotables (a diferencia de la forma más popular de energía actualmente utilizada, los combustibles fósiles).

El hecho de usar fuentes renovables nos lleva a una situación de doble beneficio: por un lado, tenemos una fuente de energía natural cuya producción no implica costo alguno y, por otro, el beneficio de utilizar un tipo de energía que no libera gases que contribuyan al efecto invernadero.

La energía renovable por excelencia es la proveniente del sol. Esta no solo nos llega de forma gratuita día tras día, sino que, además, con el equipo apropiado, es perfectamente aprovechable.

## **2. Métodos**

El sol es la fuente de energía por excelencia, no solo suministra una gran cantidad de energía, sino que, además, lo hace de manera gratuita. Es por ello que el desarrollo de sistemas que sean capaces de captar y concentrar la energía del sol, ha ido tomando cada vez más importancia.

Una de las diferencias principales entre la diversidad de sistemas de concentradores que existen hoy en día, son los rangos de temperatura que alcanzan y, por lo tanto, las aplicaciones que se les pueda dar.

En nuestro caso de estudio, evaluamos un sistema de calentador de agua de tubos evacuados con tubo de calor. Dentro de la gama de los calentadores de medianas temperaturas, los de tubos evacuados con tubo de calor son lo que, hasta ahora, han presentado las mejores eficiencias frente a otros colectores, además, sus aplicaciones incluyen no solo uso doméstico, sino también en pequeñas y medianas empresas (tintorerías, hoteles, industria de envasado, etc.)

### **Sistema de Calentador de Tubos Evacuados con Tubo de Calor**

Tenemos un sistema de “*n*” tubos evacuados para minimizar (prácticamente a cero) las pérdidas por convección que se puedan tener entre el tubo exterior y el tubo de captación; el tubo de captación, como su nombre lo indica, es en el que se realiza la captación de la radiación proveniente del sol.

Dentro del tubo de captación, tenemos el llamado tubo de calor (heat pipe) formado por un material conductor (cobre o aluminio) y en su interior, circula un fluido líquido no tóxico (acetona o alcohol). El heat pipe, en su parte superior, cuenta con un bulbo que va situado en la parte interna del termotanque, donde entra en contacto con el agua.

El calentamiento se lleva a cabo de la siguiente forma: La radiación solar es captada por el tubo interno (o de captación) y este transfiere calor a el heat pipe, el cual, a

su vez, lo transfiere al fluido interno, el fluido interno reacciona ante la presencia de calor, pasando de su estado líquido a vapor, y, por física básica, este vapor se posiciona en la parte superior del heat pipe, que corresponde al área del bulbo, el bulbo, como resultado de esta estratificación del fluido, eleva rápidamente su temperatura. Finalmente, el calentamiento del agua se realiza cuando esta, mientras fluye dentro del termotanque, entra en contacto con el bulbo y éste, le transfiere calor. A esta forma de transferencia de calor en un sistema de colector solar se le conoce como indirecta, ya que el agua no fluye a través de los tubos, sino que es calentada indirectamente por un fluido de trabajo.

### **Sistema evaluado**

Calentador de Agua de Tubos Evacuados con Tubo de Calor, de la marca Enerverde\*. Éste es un prototipo de dicha marca y por la tecnología que utiliza (tubos evacuados con tubo de calor), resulta de gran interés analizar su potencial. Se inició el estudio con el armado del equipo, con la descripción de cada una de sus partes y como es que fueron ensambladas, Figuras 1 y 2.



*Fuente: Elaboración propia.*

Figura 1 Ensamble del colector.



*Fuente: Elaboración propia.*

Figura 2 Base armada sin tubos.

Así mismo, dentro de la Tabla 1 se muestran las partes que conforman el colector, cantidad, y su descripción. Posterior a esto, en las Tablas 2 y 3, se muestran las áreas de recepción energética con fines de cálculos termodinámicos y las dimensiones de los elementos.

Tabla 1 Características del colector.

Cantidad	Elemento	Descripción
24	Tubos evacuados	Vidrio: Boro silicato transparente de alta resistencia.
24	Tubos captadores	Vidrio: Boro silicato con recubrimiento químico de nitrato de aluminio.
24	Heat pipe	Tubo de cobre con acetona en su interior como fluido de trabajo
1	Termotanque	Depósito con aislamiento térmico.
1	Estructura de soporte	Estructura metálica (aluminio) que sostiene y da forma al conjunto de partes colector.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2 Áreas y ángulo.

Área de apertura	3.084 m <sup>2</sup>
Área de captación	3.080 m <sup>2</sup>
Ángulo de inclinación	30°

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3 Dimensiones.

Tubos externos	
Diámetro Externo	Espesor
5.80 cm	1.69 mm
Tubos internos	
Diámetro Externo	Espesor
4.74 cm	1.63 mm

Fuente: Elaboración propia.

## Análisis Termodinámico

El análisis termodinámico se realizó bajo ciertas consideraciones:

- El sistema es abierto y está formado por todo el calentador, desde que entra el agua, hasta su salida.
- Se trata de flujo estable (el flujo que entra es igual al flujo que sale).
- El fluido de trabajo a analizar es el agua y, como en esta no ocurre cambio de fase, se trata de calor sensible (aumento de temperatura).
- No tenemos cambios considerables en energía cinética ni potencial, además, dentro del sistema no se realiza trabajo.
- Se obtiene la eficiencia de Primera Ley.

Lo que se quiere conocer con este análisis es el comportamiento y, por tanto, la eficiencia del colector. Como la eficiencia que se calcula es por 1<sup>ra</sup> Ley de la Termodinámica, y esta nos dicta que “La energía no se crea ni se destruye, solo se transforma”, lo que finalmente se puede traducir como que todo lo que entra es igual a lo que sale, obteniendo así la forma general de la eficiencia, Ecuación 1.

$$\eta = \frac{\text{Salidas}}{\text{Entradas}} \quad (1)$$

La cual, trasladada a nuestro sistema, el cual se puede ver en la Ecuación 2.

$$\eta = \frac{Q_{\text{útil}}}{Q_{\text{total}}} \quad (2)$$

Para obtener el Calor útil ( $Q_u$ ) y el Calor total ( $Q_t$ ), se toman las consideraciones previamente descritas. El calor útil es el calor que se aprovecha para aumentar la temperatura del agua.

Balance de Energía de 1<sup>ra</sup> Ley de la Termodinámica general para flujo uniforme, dicho balance se puede ver en la Ecuación 3.

$$\dot{Q} + \dot{W} = \dot{m}(\Delta EU + \Delta EC + \Delta EP) \quad (3)$$

Donde  $\dot{Q}$  es el flujo de calor,  $\dot{W}$  la potencia,  $\dot{m}$  flujo másico y  $\Delta EU$ ,  $\Delta EC$ ,  $\Delta EP$  cambios de energía interna, cinética y potencial, respectivamente

Balance de Energía de 1<sup>ra</sup> Ley después de las consideraciones, balance mostrado en la Ecuación 4.

$$Q = \dot{m}(\Delta EU) \quad (4)$$

Como se trata de un sistema con calor sensible se obtiene la Ecuación 5.

$$Q_u = \dot{m} C_p (T_2 - T_1) \quad (5)$$

$T_2 - T_1$  diferencia de temperaturas de entrada y salida, y  $Q_t$  es el calor total está relacionado con la radiación solar ( $I_{rr}$ ) y el área de captación ( $A_c$ ), Ecuación 6.

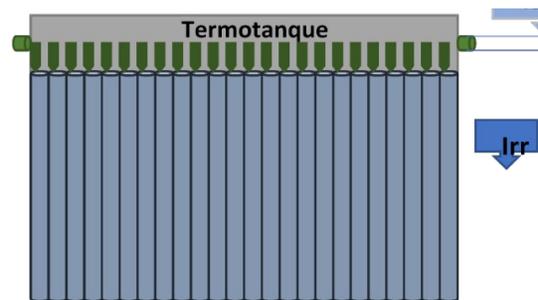
$$Q_t = I_{rr} A_c \quad (6)$$

Entonces, sustituyendo en la Ecuación 4, los calores obtenidos de la Ecuación 5 y Ecuación 6, nos arrojan una nueva fórmula, Ecuación 7.

$$\eta = (\dot{m} C_p (T_2 - T_1)) / I_{rr} A_c \quad (7)$$

Donde  $C_p$  es el calor específico,  $I_{rr}$  la irradiancia global (*directa + difusa*) y  $A_c$  el área de captación ( $m^2$ )

Después de esto, en la Figura 3 se muestra la disposición y configuración del colector, destacando las líneas de entrada y salida de fluidos. El diseño del sistema permite una eficiente distribución y recolección de fluidos, minimizando las pérdidas de presión y optimizando el rendimiento del flujo.



Fuente: Elaboración propia.

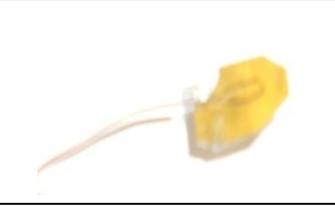
Figura 3 Diagrama del sistema del colector.

Criterios para selección de sensores de temperatura, presión, flujo másico e irradiancia:

- Rango de operación (*valor mínimo – valor máximo*).
- Tipo y característica de los fluidos a medir (corrosivo, estático, dinámico, solido, liquido, gaseoso).
- Características del sitio donde se va a medir o instalar (dentro de tuberías, sobre superficies, intemperies, ambientes agresivos).
- Tipo de adquisición y procesamiento de datos (señal de salida). Toma de datos manual o por sistema.
- Costo beneficio.
- Características físicas del instrumento: rango, precisión, exactitud, estabilidad, repetibilidad, linealidad, formas y tamaños, tiempo de respuesta y resolución.

Para la selección de la instrumentación del sistema fue necesario contemplar los anteriores criterios, resultando de vital importancia, su exactitud, su tamaño y su forma, resultando solo algunos seleccionados como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4 Instrumentos utilizados.

Sensores de temperatura	
(3) RTD (PT 100) <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rango: -50 a 500 °C</li> <li>• Exactitud: <math>\pm 0.2</math> a 0.5 °C</li> <li>• Mide: Temperatura de entrada Temperatura de salida del colector y Temperatura ambiente</li> </ul>	
(3) Termopar tipo J <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rango: - 75 a 177 °C</li> <li>• Exactitud: <math>\pm 1</math> a 4 °C</li> <li>• Mide: Temperatura de la pared externa del termotanque, Temperatura de bulbo de Cu y Temperatura de bulbo de Al</li> </ul>	
Transductores de presión	
(3) Piezoeléctrico <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rango: 0 a 200 (lb/pulg<sup>2</sup>)</li> <li>• Exactitud: 1%</li> <li>• Mide: Presión a la entrada, Presión a la salida del colector y Presión atmosférica.</li> </ul>	
Sensor de irradiancia	
(1) Piranometro <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensibilidad: <math>14.11 \times 10^{-6} \frac{v}{wm^{-2}}</math></li> <li>• Exactitud: 0.5%</li> <li>• Mide: Irradiancia</li> </ul>	
Transductor de flujo	
(1) Coriolis <ul style="list-style-type: none"> <li>• Exactitud: 0.1%</li> <li>• Mide: Flujo de agua a la entrada del sistema</li> </ul>	

Fuente: Elaboración propia.

### Selección de software

El software VEE ENGINEERING se utilizó para la calibración y para la evaluación del sistema debido a que es un software amigable que nos permite la adquisición, control, monitoreo y almacenamiento de datos.

Esta adquisición, monitoreo y almacenamiento fue posible por el adquirente de datos Agilent 34970, el cual se observa en la Figura 4, a través de cada una de sus tarjetas en donde es posible conectar cada uno de los sensores.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4 Equipo de adquisición de datos.

## Calibración

La calibración es la comparación de una variable cualquiera de un instrumento contra una variable obtenida de un patrón siendo este una referencia de una magnitud con la mayor exactitud.

Es necesario calibrar algunos de los instrumentos seleccionados para cerciorarse de su exactitud, por ello se debe calibrar contra un patrón certificado, en este caso se calibraron instrumentos de temperatura y de presión, ya que el flujometro es un patrón certificado al igual que el Piranometro. En el caso de los sensores de temperatura, los sensores a calibrar fueron solamente (*RTD tipo PT100*), los termopares tipo J no fue necesario calibrar debido a su exactitud. La calibración se realiza poniendo a prueba los sensores (*RTD tipo PT100*) contra el patrón (*TERMISTOR*), se eligió este sensor como patrón debido a que cuenta con la mayor exactitud ( $\pm 0.1$  a  $0.15$  °C) dentro de los sensores de temperatura. A través de una serie de pruebas diseñadas es posible la recolección de los datos, Tabla 5.

Tabla 5 Recolección de los datos de calibración.

	40 °C	45 °C	50 °C	55 °C	60 °C
Datos adquiridos	20	20	20	20	20
Intervalo entre cada dato	2 s	2 s	2 s	2 s	2 s

Fuente: Elaboración propia.

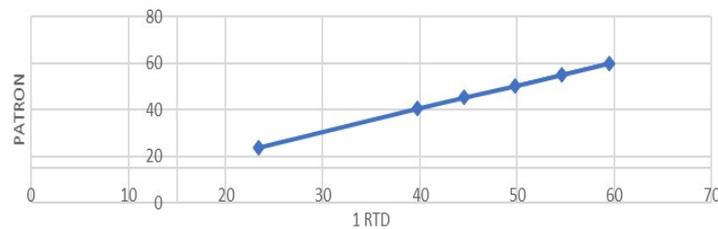
Mediante este procedimiento estadístico y después de graficar resultados es que fue posible obtener sus ecuaciones de calibración de cada uno de los sensores que nos permiten adquirir datos más confiables que los iniciales. Estas ecuaciones

fueron utilizadas en el programa de recolección de datos mostrados en la Tabla 6, para la evaluación del sistema, así mismo se muestran en las Figuras 5, 6 y 7 las ecuaciones en forma gráfica.

Tabla 6 Recolección de datos para la evaluación del sistema.

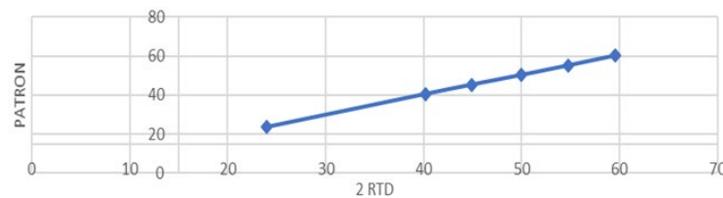
SENSOR	ECUACIÓN	USO
1 RTD (PT 100)	$y = 1.0114x - 0.0071$	Temperatura de entrada (T1)
2 RTD (PT 100)	$y = 1.025x - 0.9634$	Temperatura de salida (T2)
3 RTD (PT 100)	$y = 1.0248x - 1.0267$	Temperatura ambiente (Tambiente)

Fuente: Elaboración propia.



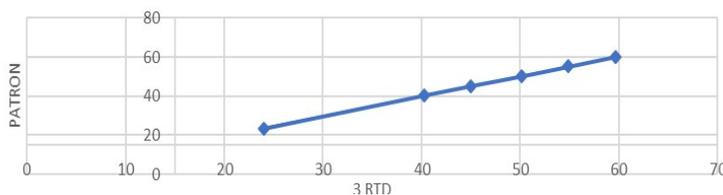
Fuente: Elaboración propia.

Figura 5 RTD 1 vs patrón.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6 RTD 2 vs patrón.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7 RTD 3 vs patrón.

### Calibración de instrumento de presión

Al igual que los sensores de temperatura, los sensores de presión fue necesario calibrar, los datos adquiridos y los intervalos entre datos se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7 Sensores de presión.

Presión (bar)	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
Datos adquiridos	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Intervalo entre cada dato	2 s	2 s	2 s	2 s	2 s	2 s	2 s	2 s	2 s	2 s

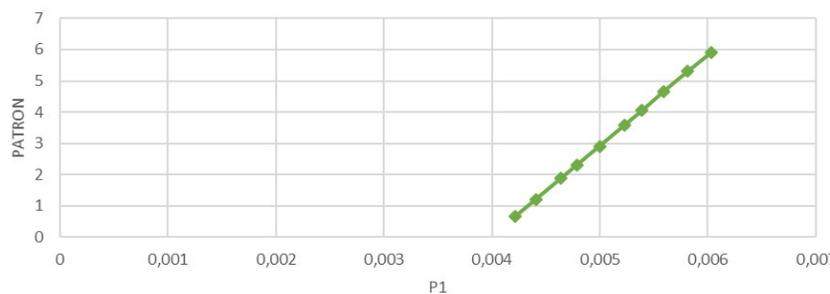
Fuente: Elaboración propia.

Cabe mencionar que esta calibración se realizó con nitrógeno. Las ecuaciones rectificadoras fueron para cada sensor como se observan en la Tabla 8, al igual que las ecuaciones de temperatura estas fueron utilizadas en el programa de adquisición de datos para la calibración respectiva obteniendo las ecuaciones y graficas mostradas en las Figuras 8, 9 y 10.

Tabla 8 Evaluación del sistema.

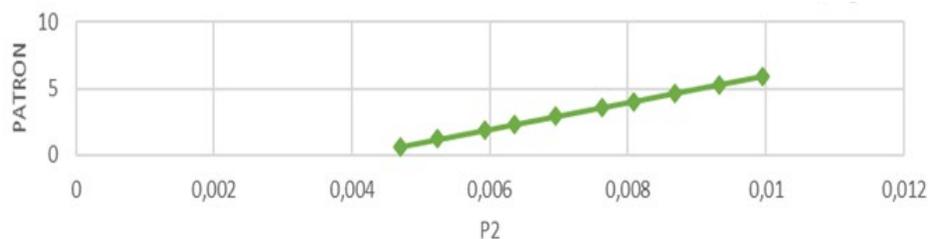
Sensor	Ecuación	Uso
1 Piezoeléctrico	$Y = 2900.9x - 11.57$	Presión de entrada (P1)
2 Piezoeléctrico	$y = 1002.3x - 4.049$	Presión de salida (P2)
3 Piezoeléctrico	$y = 2505.6x - 10.04$	Presión atmosférica (Patm)

Fuente: Elaboración propia.



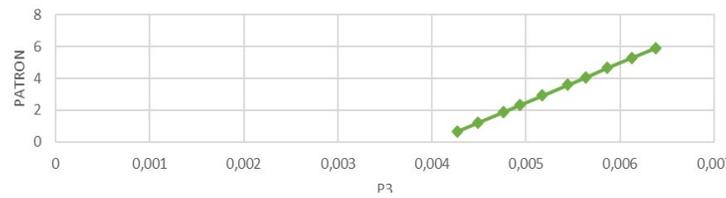
Fuente: Elaboración propia.

Figura 8 P1 vs patrón.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 9 P2 vs patrón.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 10 P3 vs patrón.

### Instalación del equipo e instrumentos

Una vez elegidos y correctamente calibrados los instrumentos a utilizar, se pudo llevar a cabo la instalación completa como se observa en la Figura 11. La instalación completa constó de sistema de colector, tanque de almacenamiento, instrumentos, tanque de suministro con bomba eléctrica y accesorios de instalación hidráulica (manguera, tuberías, válvulas, etc.).

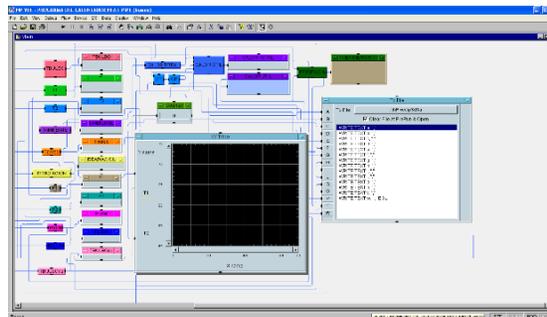


Fuente: Elaboración propia.

Figura 11 Instalación del sistema de evaluación.

### Adquisición de datos para evaluación

Para obtener los datos necesarios para el análisis termodinámico se programó con VEE ENGINEERING, Figura 12.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 12. Programa de adquisición, almacenamiento y procesamiento de datos.

El programa almacenaba, monitoreaba y graficaba las variables elegidas, además, calculaba los calores útil y total, así como la eficiencia del sistema, bajo las condiciones especificadas en la Tabla de experimentos, las pruebas experimentales se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9 Pruebas experimentales.

DÍA 1		DÍA 2		DÍA 3		DÍA 4	
$\dot{m}$ (l/min)	$T_1$ (°C)	$\dot{m}$ (l/min)	$T_1$ (°C)	$\dot{m}$ (l/min)	$T_1$ (°C)	$\dot{m}$ (l/min)	$T_1$ (°C)
1	30	1	40	1	50	1	60
2	30	2	40	2	50	2	60
3	30	3	40	3	50	3	60
4	30	4	40	4	50	4	60
5	30	5	40	5	50	5	60

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla de pruebas experimentales fue diseñada de esta forma para evaluar el calentador bajo diferentes condiciones. Las condiciones que se variaron, como se puede observar, fueron los flujos de entrada (bajo la premisa de que, a mayor flujo de entrada, mayor ( $Q_u$ ) y, por lo tanto, mayor eficiencia) y las temperaturas de entrada (esperando obtener, con mayor temperatura de entrada, su correspondiente mayor temperatura de salida). Además, para evaluar el comportamiento del calentador en instalaciones en serie.

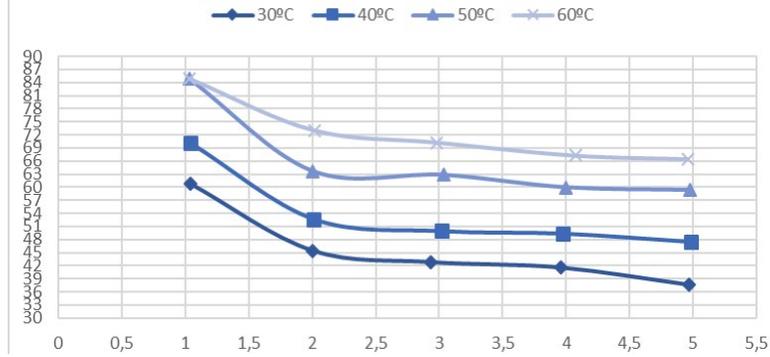
### 3. Resultados

Diariamente, durante 4 días, se recolectaron de datos, siguiendo el horario solar de 11:30 am a 2:30 pm. Para cada experimento se acumularon aproximadamente 120 datos por cada punto (temperatura de entrada y flujo constante).

#### Datos Obtenidos

Para esto, se muestra el comportamiento de la temperatura de salida ( $T_2$ ) para los 5 diferentes flujos de entrada y para su correspondiente temperatura de entrada ( $T_1$ ), este comportamiento a manera de gráfica se puede visualizar en la Figura 13. Como se puede ver, el comportamiento es bastante similar para las 4 temperaturas

de entrada. La tendencia nos muestra que, al principio y para una misma  $T_1$ , cuando tenemos el menor flujo de entrada, obtenemos la mayor  $T_2$ , la cual va disminuyendo conforme se aumenta el flujo de entrada. Para llegar a esto se realizaron pruebas de temperatura a diferentes grados mostrados en la Tabla 10.



Fuente: Elaboración propia.

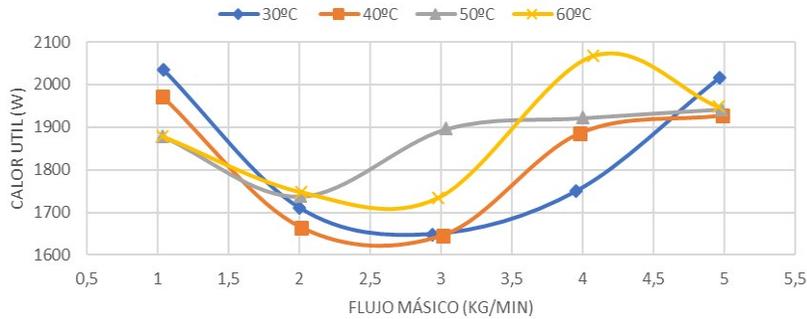
Figura 13 Flujo vs T2.

Tabla 10 Resultados pruebas experimentales.

DÍA 1 TEMPERATURA DE ENTRADA (30 ºC)															
ÍTEM	T1 (°C)	FLUJO (Kg/min)	Qu (W)	T2 (°C)	EFICIENCIA (%)	ΔT [T2-T1] (°C)	IRRADIANCIA (W/m²)	Tambiente (°C)	VALOR NORMALIZADO (°C·m²/W)	ENTALPIA In (KJ/Kg)	ENTALPIA Out (KJ/Kg)	ENTROPIA In (KJ*Kg/K)	ENTROPIA Out (KJ*Kg/K)	ENTALPIA amb (KJ/Kg)	ENTROPIA amb (KJ*Kg/K)
1	32.613	1.0401	2035.2962	60.79	77.10197	28.1763	857.31717	29.5495	0.003573756	136.274	254.0112	0.4709653	0.84003	123.486	0.42896704
2	33.144	2.0001	1710.5894	45.431	63.73992	12.2871	871.11717	29.94176	0.003675969	138.49	189.8221	0.4782	0.6426	125.123	0.43436538
3	34.695	2.9375	1648.3755	42.759	59.37083	8.06407	901.26601	30.15494	0.005037084	144.985	178.6541	0.4992786	0.60735	126.012	0.43729667
4	35.175	3.995	1749.265	41.532	62.87248	6.35698	908.17324	30.66422	0.00499403	146.97	173.5263	0.5057833	0.59107	128.138	0.44429158
5	31.969	4.97	2016.8625	37.546	72.80161	5.57909	899.15546	30.56633	0.001559772	133.584	156.8821	0.462162	0.53781	127.729	0.44294801
DÍA 2 TEMPERATURA DE ENTRADA (40 ºC)															
ÍTEM	T1 (°C)	FLUJO (Kg/min)	Qu (W)	T2 (°C)	EFICIENCIA (%)	ΔT [T2-T1] (°C)	IRRADIANCIA (W/m²)	Tambiente (°C)	VALOR NORMALIZADO (°C·m²/W)	ENTALPIA In (KJ/Kg)	ENTALPIA Out (KJ/Kg)	ENTROPIA In (KJ*Kg/K)	ENTROPIA Out (KJ*Kg/K)	ENTALPIA amb (KJ/Kg)	ENTROPIA amb (KJ*Kg/K)
1	42.873	1.0392	1971.1529	70.098	78.90591	27.2253	814.5318	26.77144	0.019768032	179.132	4.883231	0.6088628	0.01896	111.895	0.39055281
2	40.835	2.0129	1664.5349	52.71	64.81501	11.8741	833.59624	27.22905	0.016322525	170.617	8.91756	0.5818053	0.03356	113.804	0.39690249
3	42.164	3.0162	1646.0618	50.001	63.33989	7.83703	844.96261	27.80726	0.016990927	176.168	13.07603	0.5994643	0.04856	116.216	0.40491315
4	42.616	3.9779	1885.0447	49.422	73.2999	6.80533	891.29373	28.17782	0.01619967	178.059	17.06353	0.6054638	0.06289	117.762	0.41003969
5	41.994	4.9639	1926.9274	47.546	73.37183	5.55193	870.16638	29.61977	0.014220639	175.459	21.23595	0.5972102	0.07784	123.779	0.42993451
DÍA 3 TEMPERATURA DE ENTRADA (50 ºC)															
ÍTEM	T1 (°C)	FLUJO (Kg/min)	Qu (W)	T2 (°C)	EFICIENCIA (%)	ΔT [T2-T1] (°C)	IRRADIANCIA (W/m²)	Tambiente (°C)	VALOR NORMALIZADO (°C·m²/W)	ENTALPIA In (KJ/Kg)	ENTALPIA Out (KJ/Kg)	ENTROPIA In (KJ*Kg/K)	ENTROPIA Out (KJ*Kg/K)	ENTALPIA amb (KJ/Kg)	ENTROPIA amb (KJ*Kg/K)
1	58.88	1.0364	1878.8031	84.843	67.2767	25.9628	906.9323	27.80714	0.034261604	246.032	4.871545	0.815952	0.01892	116.215	0.40491156
2	51.246	2.0067	1737.4149	63.667	68.27618	12.4202	826.49063	26.83292	0.029538659	214.128	8.891953	0.7183789	0.03347	112.151	0.39140639
3	53.841	3.0372	1895.9923	62.79	69.44664	8.94871	886.89621	28.2712	0.028830406	224.972	13.16324	0.7517796	0.04887	118.151	0.41133073
4	52.697	3.999	2018.75	59.939	72.35946	7.24171	905.43499	28.84424	0.026344393	220.193	17.15102	0.7370897	0.0632	120.542	0.41924503
5	52.078	4.9771	2510.3725	59.322	95.779	7.24369	855.59436	28.01885	0.028119799	217.604	21.20797	0.7291124	0.07774	117.099	0.40784114
DÍA 4 TEMPERATURA DE ENTRADA (60 ºC)															
ÍTEM	T1 (°C)	FLUJO (Kg/min)	Qu (W)	T2 (°C)	EFICIENCIA (%)	ΔT [T2-T1] (°C)	IRRADIANCIA (W/m²)	Tambiente (°C)	VALOR NORMALIZADO (°C·m²/W)	ENTALPIA In (KJ/Kg)	ENTALPIA Out (KJ/Kg)	ENTROPIA In (KJ*Kg/K)	ENTROPIA Out (KJ*Kg/K)	ENTALPIA amb (KJ/Kg)	ENTROPIA amb (KJ*Kg/K)
1	58.88	1.0364	1878.8031	84.843	67.2767	25.9628	906.9323	27.80714	0.034261604	246.032	4.871545	0.815952	0.01892	116.215	0.40491156
2	60.581	2.0155	1747.546	73.001	62.98753	12.42	901.59323	28.37777	0.035718275	253.14	8.928519	0.8374075	0.0336	118.596	0.41280352
3	61.88	2.9787	1733.5839	70.22	61.36094	8.34051	920.22874	28.74886	0.03600267	258.565	12.92051	0.8537161	0.048	120.145	0.41792876
4	59.938	4.0747	2067.4074	67.211	73.4566	7.27227	913.67972	29.04788	0.033808997	250.455	17.46486	0.8293137	0.06433	121.392	0.42205437
5	60.753	4.9616	1947.4781	66.38	65.99945	5.62707	958.61934	29.20834	0.032906323	253.858	21.14357	0.8395695	0.07751	122.062	0.42426669

Fuente: Elaboración propia.

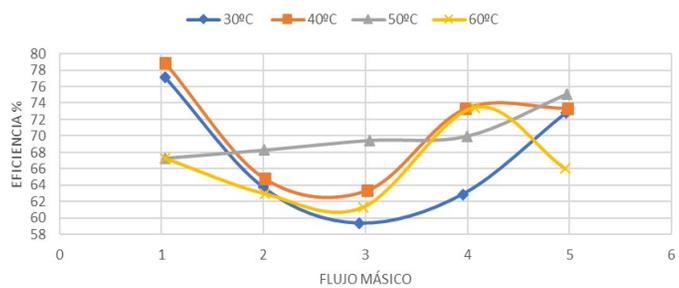
Posterior a esto, en la Figura 14 se muestra el flujo másico graficado contra calor útil, esta Figura nos muestra la relación que tienen estas variables entre sí, según la Ecuación que nos ayuda a obtener este calor útil ( $\dot{m}Cp(T_2 - T_1)$ ) nos indica que a mayor flujo mayor calor útil.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 14 Calor útil.

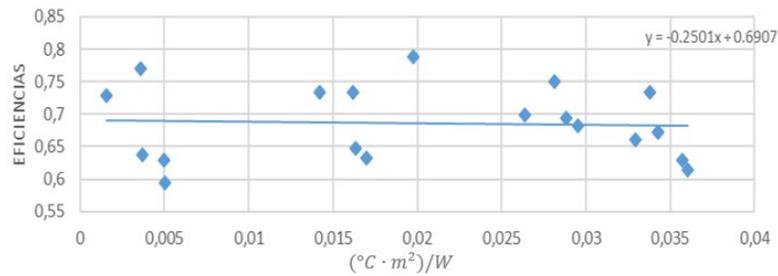
Se puede observar que como se sabe la eficiencia está relacionada directamente con el ( $Q_u$ ), su comportamiento tiende a incrementar en magnitud con forme aumenta el flujo como se observa en la Figura 15, excepto en el primer flujo (1 kg/min), en el que se presenta el mayor ( $Q_u$ ) y por tanto la mayor eficiencia.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 15 Flujo másico vs eficiencia %.

Luego de esto, en la Figura 16 se muestra la relación de la eficiencia con respecto a la temperatura de salida a la cual es posible calentar el agua con respecto a la temperatura ambiente y la irradiancia, esta Figura además muestra una Ecuación normalizada con la cual es posible variar las condiciones según la zona geográfica para obtener la eficiencia correspondiente al lugar contemplando.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 16 Eficiencias estandarizadas.

## 4. Discusión

Al analizar los datos obtenidos mediante el estudio, se puede observar que:

- Las mejores eficiencias se obtuvieron con los menores flujos para las diferentes temperaturas de entrada. El comportamiento fue decreciente, excepto en el punto de flujo más alto, donde se encuentra otro incremento en la eficiencia.
- En base a los resultados, se pueden definir las condiciones de entrada (temperatura y flujo) requeridas para obtener cierta temperatura de salida deseada.
- De acuerdo los resultados, es posible obtener la eficiencia del calentador sin importar la zona geográfica, la cual, afecta a factores como temperatura ambiente, irradiancia, etc.
- El software de adquisición de datos VEE ENGINEERING resultó ser una muy útil herramienta, ya que permitió, mediante una interfaz amigable, la adquisición, procesamiento y almacenamiento de datos.

En conclusión, se pudo demostrar que, en efecto, el Calentador Solar de Agua de Tubos Evacuados con Tubo de Calor, es un sistema que presenta de las mejores eficiencias, dentro de la gama de calentadores de mediana temperatura, lo cual lo posiciona como un fuerte competidor en las aplicaciones de pequeña y mediana empresa, además, de su uso doméstico.

Algunas de las aplicaciones que se pueden dar a este sistema son: industria hotelera, lavandería, tintorería, industria de envasado, hospitales, etc. Lo cual nos

demuestra la amplitud y diversidad de aplicación que puede llegar a tener dentro del mercado de calentadores solares.

## **5. Bibliografías y Referencias**

- [1] Budihardjo, I., & Morrison, G. L. (2009). Performance of water-in-glass evacuated tube solar water heaters. *Solar Energy*, 83(1), 49-56.
- [2] Frenk, C.A., *Renewable Energy for Sustainable Development in Mexico*. Forever Print S.A. deC.V.; 2009.
- [3] J. A. Duffie, and W. A. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*, 3rd ed. New York: Wiley, 1980, pp. 282-285.
- [4] Mamouri, S. J., Derami, H. G., Ghiasi, M., Shafii, M. B., & Shiee, Z. (2014). Experimental investigation of the effect of using thermosyphon heat pipes and vacuum glass on the performance of solar still. *Energy*, 75, 501- 507.
- [5] Martinez, et al. (2008) *Installations for heater water by use of Solar Energy Manual*. Mexico.
- [6] Morrison, G. L., Budihardjo, I., & Behnia, M. (2005). Measurement and simulation of Flow rate in a water-in-glass evacuated tube solar water heater. *Solar Energy*, 78(2), 257-267.
- [7] *Renewable Global Status Report*, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, 2015. 51-55, ISBN 978-3-9815934-2-6.
- [8] Secretary of Energy. *National Balance of Energy 2015*, Mexico. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/248570/Balance\\_Nacional\\_de\\_Energ\\_a\\_2015\\_\\_2\\_.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/248570/Balance_Nacional_de_Energ_a_2015__2_.pdf)
- [9] Experimental analysis of thermal performance of flat plate and evacuated tube solar collectors in stationary standard and daily conditions. *Solar Energy*, 84(8), 1382-1396.