

“DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA TÉRMICA DE UNA TERMA SOLAR DE TUBOS AL VACÍO EN PUNO”**“DETERMINATION OF THE THERMAL EFFICIENCY OF A SOLAR TUBE THERMAL TO VACUUM IN PUNO”**

Omar Alex Colque Monje

Ángel Hugo Condori Alanoca

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO-PUNO**RESUMEN:**

La finalidad del presente trabajo de investigación es determinar experimentalmente la eficiencia térmica instantánea de una terma solar de tubos al vacío de flujo directo, la metodología emplea para determinar la eficiencia térmica instantánea está explicada concretamente a través de la expresión matemática que evalúa la cantidad de energía solar útil (Q_{μ}) que es absorbida por el agua con respecto a la cantidad de energía solar que llega al colector solar de tubos al vacío ($I_{\mu} \cdot A_c \cdot \alpha_s$). Los resultados obtenidos están en el rango de 66 - 74% con un promedio general diario de 69,98%, La conclusión más importante de la tesis es que la eficiencia térmica de la terma solar de tubos al vacío experimentada es en promedio 13,02% más eficiente con respecto a la eficiencia térmica de termas solares de colectores solares de placa plana (55,70%).

Palabras Claves: Eficiencia térmica, irradiación solar, tubos al vacío, terma solar.**SUMMARY:**

The purpose of this research is to determine experimentally the instantaneous thermal efficiency of a direct flow vacuum solar thermal bath, the methodology used to determine the instantaneous thermal efficiency is explained concretely through the mathematical expression that evaluates the amount of energy (Q_{μ}) that is absorbed by the water with respect to the amount of solar energy that reaches the solar collector of vacuum tubes ($I_{\mu} \cdot A_c \alpha \alpha_s$). The results obtained are in the range of 66 - 74% with a daily average of 69.98%. The most important conclusion of the thesis is that the thermal efficiency of the solar thermal tube of vacuum tubes experienced is on average 13.02 % More efficient with respect to the thermal efficiency of solar hot water from solar collectors of flat plate (55.70%).

Key words: Thermal efficiency, solar irradiation, tubes to the hole, solar terma.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente en el sur del Perú más de 30 empresas que se dedicaban a la fabricación de termas solares con colectores de placa plana, ninguna de ellas proporcionaba datos técnicos sobre su eficiencia térmica como sucede actualmente con las empresas que fabrican termas solares con colectores de tubos al vacío; aspecto que motivó la realización de esta tesis.

Los colectores de tubos al vacío, aparentemente son los más apropiados para climas desfavorables por tener como aislante térmico el vacío, sin embargo aún 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, 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.

II. MATERIALES Y MÉTODOS:

La metodología empleada para el presente trabajo de investigación, es la metodología ensayo experimental, considerando los factores limitantes en cuanto al módulo experimental de investigación e instrumentos de medición de los parámetros experimentales necesarios para la determinación de la eficiencia térmica.

a. UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA POBLACIÓN

El ensayo técnico experimental se desarrolla en Salcedo – Puno - Perú, por las características ambientales óptimas para la investigación que se desarrolló.

b. MATERIAL EXPERIMENTAL

Módulo de investigación.

En nuestra investigación el módulo de ensayo lo constituye la terma solar de tubos de vacío de flujo directo marca DAVSOL de 6 tubos de vacío y con una capacidad

de almacenamiento de 60 litros de agua caliente, con la instrumentación debidamente implementada



Figura 1. Therma solar con tubos de vacío

Fuente: Foto tomada en el C.P SALCEDO PUNO.

La instrumentación necesaria para la medición de las variables en el trabajo de investigación, estuvo compuesta de lo siguiente:

Termocupla digital

Instrumento que se utilizó para medir la temperatura del ambiente, como parámetro referencial durante la toma de datos y la temperatura de entrada del agua a la therma en °C.

Las características técnicas de la termocupla son:

Digital Thermometer

Marca : Yokogawa Modelo: 2455

Type : K

Rango de medida : -160°C a +1372°C

Fabricación : Japón



Figura 2. Termocupla digital
Fuente: fotografía tomada en el C.P SALCEDO PUNO.

Piranómetro Digital

Instrumento utilizado para medir la irradiación solar (I_{μ}), energía instantánea que llega al colector de tubos de vacío por unidad de área en Wh/m^2 .

Las características técnicas del piranómetro digital son:

PCE-SPM1	: Datalogging Solar Power Meter
Unidad de medida	: Wh/m^2



Figura 3. Piranómetro Digital.
Fuente: fotografía tomada en el C.P SALCEDO PUNO.

Anemómetro digital

Instrumento que nos sirvió para medir la velocidad del viento en Km/h, parámetro que se midió como referencia, el cual era importante para las pérdidas por convección. En los colectores de tubos de vacío no es importante porque la superficie de los tubos no se calienta y está a la temperatura del ambiente.

Las características técnicas del anemómetro digital son:

Windmaster 2

Marca : Kaindl electronic

Rango de medida : 2,5 a 150 Km/h

Made in Germany

Fabricación : Alemania



Figura 4. Anemómetro digital.

Fuente: fotografía tomada en el C.P SALCEDO PUNO.

Controlador microcomputador solar

Instrumento que sirve para el control automático del nivel de agua que ingresa a la terna, a través de una válvula que es controlada por un microcomputador.

También el instrumento mide en forma continua la temperatura del agua caliente en el tanque de almacenamiento a través de una termocupla cuyo sensor transmite la temperatura al microcomputador.

Las características técnicas del instrumento son:

TKD2: Solar water heater microcomputer intelligence controller

Modelo : TK-84

Fabricación : China



Figura 5. Controlador microcomputador solar.
Fuente: fotografía tomada en el C.P SALCEDO PUNO.

Cronómetro digital

Instrumento que se utilizó para medir el tiempo durante el ensayo técnico.

Las características técnicas de este instrumento son:

Celular móvil GSM HUAWEI

HUAWEI G7220

VERSIÓN 01 N° 6011491

c. PROCEDIMIENTO DEL EXPERIMENTO

Montaje del módulo de investigación

- Se procedió al montaje del módulo de investigación, constituido por una terma solar de seis tubos al vacío de flujo directo marca DAVSOL, con una capacidad de tanque de almacenamiento de 60 litros de fabricación China.
- La orientación del colector en dirección norte geográfico, con la ayuda de una brújula, con una inclinación del colector se consideró 20°.
- Se instaló todas las tuberías y accesorios hidráulicos para la entrada del agua fría a la terma solar, conectándose a un tanque ROTOPLAS de 650 litros.
- Se instaló el controlador microcomputador solar, el cual para controlar el nivel de agua lo hace a través de una válvula hidráulica termomagnética, la que se instaló en el sistema hidráulico cerca al depósito donde se encuentra la boya de control del nivel del agua. Así mismo, el microcomputador registra la

temperatura del agua caliente del tanque de almacenamiento, para lo cual se instaló la termocupla del controlador dentro del tanque.

- Para medir la temperatura del agua fría de ingreso a la terma solar se adecuó el depósito donde se encuentra la boya controladora del nivel del agua, lo que se hizo con otra termocupla.
- Finalmente se instaló sobre una pequeña mesa el piranómetro y el anemómetro para las mediciones de la radiación solar y velocidad del viento respectivamente.

Diseño de formatos para la toma de datos experimentales

Diseño de formato para la determinación de la capacidad de volumen de agua de tanque de almacenamiento

Nº	VOLUMEN (mililitros: mL)
1	
2	
3	
⋮	
20	
TOTAL	

Elaborado: Por los investigadores.

Diseño de formato para la toma de datos experimentales

Número de Ensayo	Temperatura del Ambiente (°C)	Temperatura del agua de entrada (°C)	Temperatura del agua en el Tanque (°C)	Radiación solar (W/m ²)	Velocidad del viento (Km/h)
1					
2					
3					
⋮					
20					

Elaborado: Por los investigadores.

d. ENSAYO TÉCNICO EXPERIMENTAL

Para la ejecución del ensayo experimental, a través del cual se procedió a la toma de datos de las variables involucradas en la determinación experimental de la eficiencia térmica de una terma solar en Puno.:

Toma de datos experimentales para la determinación de la capacidad de volumen de tanque de almacenamiento

- 1) Se procedió a vaciar manualmente el tanque de almacenamiento del agua por la válvula de desagüe.
- 2) Se preparó el sistema hidráulico del agua para prender el sistema automático de llenado de agua.
- 3) Se prendió el sistema automático de llenado de agua a través del microcomputador de control.
- 4) Se esperó el mensaje de sonido del microcomputador, que indica el llenado del tanque de almacenamiento.
- 5) Se vació el agua del tanque en dos recipientes de plástico de 25 litros de capacidad atrás de la válvula de desagüe de la parte inferior del tanque.
- 6) Se procedió a medir el volumen de agua del tanque con una jarra graduada en mililitros.
- 7) Los pasos del 1) al 6) se repitieron 2 veces.

Los datos experimentales se presentan en la tabla:

PRIMER ENSAYO DE MEDICIÓN		
Nº	VOLUMEN PRIMER DEPÓSITO (mL)	VOLUMEN SEGUNDO DEPÓSITO (mL)
1	1100	1100
2	1000	1070
3	1050	1100
4	1100	1025
5	975	1100
6	1000	1100
7	1000	1080
8	1050	1025
9	1100	1050
10	1100	1040
11	1100	1050
12	1050	1040
13	1050	1100
14	1000	1050
15	1075	1075
16	990	1100
17	875	975
18	950	700
19	1000	850
20	175	750
TOTAL	19740 mL	20380 mL
Volumen total = 19740 + 20380 = 40120 mL		

Tabla 1. Cálculo del Volumen de agua en el tanque de almacenamiento.
Elaborado: Por los Investigadores

SEGUNDO ENSAYO DE MEDICIÓN		
Nº	VOLUMEN PRIMER DEPÓSITO (mL)	VOLUMEN SEGUNDO DEPÓSITO (mL)
1	995	1050
2	1045	1085
3	1100	1070
4	1095	1100
5	1055	1050
6	1025	1100
7	1050	1050
8	1000	1085
9	1095	1090
10	1050	1090
11	1075	1070
12	1050	1070
13	1100	1080
14	1025	1100
15	1075	1080
16	1090	1050
17	920	1040
18	945	1030
19	900	1100
TOTAL	19690 mL	20390 mL
Volumen total = 19690 + 20390 = 40080 mL		

Tabla 2. Cálculo del Volumen de agua en el tanque de almacenamiento.
Elaborado: Por los investigadores.

Toma de datos experimentales en el módulo de investigación

La presión atmosférica promedio durante los cinco días donde en los que se hicieron las lecturas de datos experimentales fue de:

$$P_{\text{atm}} = 489 \text{ mm Hg} = 0.65 \text{ bar}$$

a una altura de 3827 m.s.n.m.

Para determinar la eficiencia térmica de la terma, es necesario cuantificar el calor útil: $Q_u = mC_p\Delta T/\Delta t$, que es la energía calorífica ganada por la masa (m) del agua del tanque de almacenamiento de la terma y el agua de los tubos de vacío debido al gradiente de temperatura del agua: $\Delta T = T^{\circ}_{\text{tanque}} - T^{\circ}_{\text{entrada}}$; en un intervalo de tiempo Δt , el cual para el ensayo experimental lo consideramos de 1 hora.

Para la determinación de la energía solar que incide sobre el colector solar de tubos de vacío: $I_c = I \cdot A \cdot \alpha_s$, se midió la irradiancia solar en w/m^2 , los otros parámetros A y α_s son constantes y que se calcularon posteriormente.

En función a lo anterior el procedimiento de toma de datos experimentales fue el siguiente:

1. Se arrancó el módulo de investigación (10:45 A.M.)
2. Se verificó el funcionamiento de los instrumentos de medición: termocuplas, piranómetro, microcomputador solar, cronómetro, anemómetro.
3. Se procedió a llenar la terma con agua a través del controlador microcomputador aproximadamente en 10 minutos.
4. Se procedió a realizar las lecturas de la temperatura ambiente y la temperatura del agua a la entrada de la terma con la termocupla (11:00 A.M.).
5. Después de un intervalo de tiempo (Δt) de 1 hora se procedió a realizar las lecturas experimentales siguientes:
 - Temperatura del agua en el tanque, con la termocupla sumergida en el tanque y controlada por el microcomputador.

- La irradiancia solar con el piranómetro digital.
 - La velocidad del viento con el anemómetro digital.
6. Se procedió a vaciar el agua de la terma por la válvula de descarga situada en la parte inferior de la terma.
 7. Se repitió los pasos: 3, 4, 5 y 6; dos veces más durante el día.

Los datos experimentales tomados se sistematizan en la siguiente tabla:



HORA	Temperatura ambiente T_a (°C)	Temperatura del agua a la entrada T_{ent} (°C)	Temperatura del agua en tanque T_{tanq} (°C)	Irradiancia Solar I (W/m ²)	Velocidad del viento (Km/h)
DÍA: 23 DE OCTUBRE DEL 2015					
11:00	17,2	20,2			
12:00			30	1970	3,3
12:15	16,3	24,2			
13:15			38	1862	2,6
13:30	19,6	24,1			
14:30			46	2850	3,1
DÍA: 24 DE OCTUBRE DEL 2015					
11:00	16,4	21,7			
12:00			32	1962	2,3
12:15	19,2	25,5			
13:15			40	1907	3,5
13:30	19,8	24,3			
14:30			47	2924	2,7
DÍA: 25 DE OCTUBRE DEL 2015					
11:00	17,5	22,5			
12:00			33	1921	3,3
12:15	19,0	25,9			
13:15			41	1956	3,4
13:30	19,9	27,1			
14:30			48	3026	2,4

Tabla 3. Datos experimentales tomados en el módulo experimental
Elaborado: Por los investigadores.

HORA	Temperatura ambiente T_a (°C)	Temperatura del agua a la entrada T_{ent} (°C)	Temperatura del agua en tanque T_{tanq} (°C)	Irradiancia Solar I (W/m ²)	Velocidad del viento (Km/h)
DÍA: 26 DE OCTUBRE DEL 2015					
11:00	17,6	24,5			
12:00			35	1889	4,1
12:15	17,7	24,2			
13:15			43	3451	3,3
13:30	18,9	24,7			
14:30			50	3222	3,8
DÍA: 27 DE OCTUBRE DEL 2015					
11:00	17,4	23,4			
12:00			36	1855	3,6
12:15	17,9	24,6			
13:15			44	2558	3,5
13:30	19,2	24,9			
14:30			51	3391	2,9

Tabla 4. Datos experimentales tomados en el módulo experimental
Elaborado: Por los investigadores.

III. RESULTADOS:

a. CÁLCULO DE MASA DEL AGUA DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DEL AGUA (m_1)

Por razones de cálculos más exactos, el volumen de agua del tanque almacenamiento se halló, desaguando el agua por la válvula inferior del tanque, operación que se realizó dos veces, siempre considerando que el llenado del tanque se realizó con el controlador de nivel del microcomputador, de la misma

manera como se llenó el tanque, cuando se realizó la toma de datos experimentales en el módulo de investigación.

Se sabe que la densidad del agua es igual a: $u = \frac{m_1}{V}$

Entonces: $m_1 = \delta \cdot V$ (1)

Dónde: V = Volumen de agua contenido en el tanque de almacenamiento.

La medición de este volumen en mL dos veces se muestra en la tabla 3 y 4.

Para el cálculo de la masa, consideramos el promedio de estos dos volúmenes:

$$\bar{V} = \frac{40120 + 40080}{2} \text{ mL}$$

$$\bar{V} = 40100 \text{ mL}$$

Pero: $1 \text{ mL} = 1 \text{ cm}^3 = 10^{-3} \text{ dm}^3$

Entonces el volumen del agua:

$$\bar{V} = 40100 \times 10^{-3} \text{ dm}^3$$

Pero: $1 \text{ dm}^3 = 1 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

Por consiguiente: $\bar{V} = 40,10 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

Considerando la ecuación (I), la densidad del agua varía con la temperatura pero no significativamente¹, la densidad del agua para nuestros cálculos la asumimos a una temperatura de 35°C, es decir: $\delta = 994 \text{ Kg/m}^3$ valor que es representativo y no afectará los cálculos de ingeniería significativamente.

Por lo tanto la masa del agua en el tanque de almacenamiento es de:

$$m_1 = u \cdot \bar{V}$$

$$m_1 = 994 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} (40,10 \times 10^{-3} \text{ m}^3)$$

$$m_1 = 39,86 \text{ Kg}$$

b. CÁLCULO DE LA MASA DEL AGUA EN LOS TUBOS DE VACÍO (m_2)

¹ Mott, Robert: Mecánica de fluidos aplicada, 2010. Editorial Prentice Hall Hispanoamericana, Pág. 535.

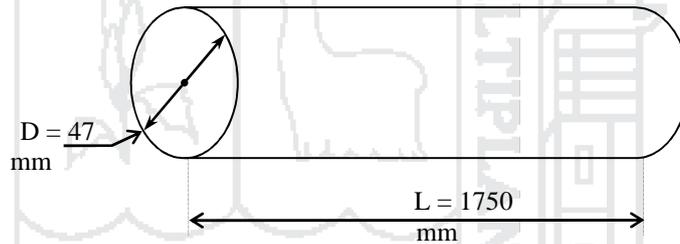
Para calcular la cantidad de agua contenida en los seis tubos del colector solar, los datos técnicos de la terma solar marca Davsol son con respecto a los tubos de vacío:

- Número de tubos : 6
- Espesor : 2 mm
- Diámetro exterior : 58 mm
- Diámetro interior : 47 mm
- Longitud : 1800 mm
- Longitud útil : 1750 mm

Cálculo del volumen de un tubo de vacío, el volumen de un cilindro es igual a:

$$V = \frac{\pi D^2}{4} \cdot L$$

Considerando el volumen interior del tubo de vacío:



$$v = \frac{\pi(47)^2}{4} \cdot 1750 = 3436116.96 \text{ mm}^3$$

Entonces: $V = 3,44 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

Sabemos que: $m = u \cdot V$

La densidad del agua, análoga al acápite 4.1.

$$m = 994 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times 3,44 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$m = 3,42 \text{ Kg}$$

Por consiguiente la masa de agua contenida en los seis tubos al vacío será igual a:

$$m_2 = 6 \times 3.42 = 20,52 \text{ Kg}$$

Por lo tanto el agua total que será calentada en la terma solar será igual a:

$$m = (m_1 + m_2) = 39,86 + 20,52$$

$$m = 60,38 \text{ Kg}$$

c. CÁLCULO DE LA EFICIENCIA TÉRMICA

La eficiencia térmica de la terma solar se evaluó con el calor útil o el calor absorbido por el fluido térmico, es decir el agua, Q_u ; y la irradiación solar térmica I y el área del colector de tubos de vacío A_c , como se define en la siguiente ecuación:

$$y_E = \frac{Q_u}{I_c} = \frac{Q_u}{I \times A_c \times r_s}$$

Dónde: Q_u : Calor absorbido por el agua

I : irradiación solar que llega al colector solar de tubos de vacío.

α_s : factor de corrección del % de radiación sobre los tubos al vacío

i. Cálculo del calor útil (Q_u)

El calor ganado o perdido por un sistema cerrado lo podemos calcular aplicando calorimetría, que es un calor útil entregado al agua en el colector de tubos de vacío y se determina con la siguiente ecuación:

$$Q_u = \frac{m \times C_p \times (T_{\text{tanque}} - T_{\text{ent}})}{\Delta t} \quad (A)$$

Donde:

m : El agua en el tanque de almacenamiento más el agua en los 6 tubos de vacío.

C_p : Calor específico del agua

T_{tanque} : temperatura del agua en el tanque

T_{ent} : temperatura del agua a la entrada de la terma solar

Δt : intervalo de tiempo de absorción del calor por el agua.

Donde:

a) m : será igual a la suma de 39,86 Kg más 20,52 Kg que será igual a:

$$m = 60,38 \text{ Kg}$$

b) C_p : parámetro constante para el agua e igual a:

$$C_p = 4,18 \text{ KJ/Kg} \cdot ^\circ\text{K}$$

- c) $T_{tanque} - T_{ent}$: esta diferencia de temperaturas debe estar en grados Kelvin ($^{\circ}K$), pero numéricamente, una diferencia de temperaturas en grados kelvin ΔT ($^{\circ}K$) es igual a una diferencia de temperatura en grados Celsius ΔT ($^{\circ}C$).

$$\Delta T (^{\circ}K) = \Delta T (^{\circ}C)$$

Porque, ejemplo para las dos primeras temperaturas de la Tabla 5:

$$T_{tanque} = 30^{\circ}C; \quad T_{ent} = 20,2^{\circ}C$$

Entonces:

$$\Delta T (^{\circ}C) = 30 - 20,2 = 9,8^{\circ}C$$

$$\Delta T (^{\circ}K) = (30 + 273) - (20,2 + 273) = 9,8^{\circ}K$$

Por consiguiente:

$$\Delta T (^{\circ}C) = \Delta T (^{\circ}K)$$

- d) Δt : el intervalo de tiempo considerado en la toma de datos experimentales es
1 hora = 3600 segundos.

En la expresión (A), para los datos N^o 1, procederemos al cálculo del calor útil

$$Q_{\mu_1} = \frac{m_1 \cdot C_{p_1} (T_{tanque} - T_{ent_1})}{\Delta t}$$

$$Q_{\mu_1} = \frac{60,38 \text{ Kg} \cdot 4,18 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot ^{\circ}K} (30 - 20,2)^{\circ} K}{3600 \text{ s}}$$

Entonces: $Q_{\mu_1} = 70,11(30 - 20,2) \text{ W} \quad \dots (B)$

Se observa que la cantidad de 70,11 se mantiene constante en los cálculos de los calores útiles restantes, variando solamente el gradiente de temperatura:

$$\Delta T = T_{tanq.} - T_{ent.}; \text{ en el } Q_{\mu_1} \text{ es igual a } (30 - 30,2).$$

Entonces para la lectura número 1:

$$Q_{\mu_1} = 687,08 \text{ W}.$$

Para los cálculos de los calores útiles restantes se utilizará la expresión (B) en la que variará solo la gradiente de temperatura.

HORA	T_{tanq} (°C)	T_{ent} (°C)	UT° (°C)	Q_u (W)
DÍA: 23 DE OCTUBRE DEL 2015				
11:00	30	20,2	9,8	687,08
13:15	38	24,2	13,8	967,52
14:30	46	24,1	21,9	1535,41
DÍA: 24 DE OCTUBRE DEL 2015				
11:00	32	21,7	10,3	722,13
13:15	40	25,5	14,5	1016,60
14:30	47	24,3	22,7	1591,50
DÍA: 25 DE OCTUBRE DEL 2015				
11:00	33	22,5	10,5	736,16
13:15	41	25,9	15,1	1058,66
14:30	48	24,1	23,9	1675,63
DÍA: 26 DE OCTUBRE DEL 2015				
11:00	35	24,5	10,5	736,16
13:15	43	24,2	18,8	1318,07
14:30	50	24,7	25,3	1773,78
DÍA: 27 DE OCTUBRE DEL 2015				
11:00	36	23,4	12,6	883,39
13:15	44	24,6	19,4	1360,13
14:30	51	24,9	26,1	1829,87

Tabla 5. Cálculo del calor útil
Elaborado: Por los investigadores.

ii. Cálculo de la Irradiación sobre el colector solar

Para la determinación experimental de la eficiencia térmica de la terma solar de tubos de vacío es necesario calcular la cantidad de calor solar incidente sobre el colector de seis tubos, la expresión que se muestra a continuación nos permite calcular dicho valor².

$$I_c = I \cdot \alpha_s \cdot A_c$$

Donde:

- I, es la irradiación solar medida con el piranómetro según el procedimiento de lectura de datos experimentales. La terma solar se montó en un lugar donde la radiación solar no sea interferida en ningún momento del día por sombras de edificio, árboles, etc. El piranómetro empleado midió la irradiación solar en W/m^2 .
- α_s , es el factor de corrección que determina el porcentaje de la radiación incidente que llega a los tubos de vacío y es calculado por la expresión:

$$r_s = \frac{\tau}{1 - (1 - \tau) \rho_d}$$

Donde:

- τ , es la transmisividad de los tubos de vidrio de boro silicato cuyo valor es $\tau = 0,74$ y tiene una emisividad $\epsilon = 0,88$.
- α , es la absortividad de los tubos recubiertos de nitrato de aluminio y es igual a $\alpha = 0,99$ y su emisividad es $\epsilon_p = 0,1$.
- ρ_d , es la reflectancia difusa, la misma que para tubos de vacío es igual a $\rho_d = 0,16$.

Por lo tanto, efectuando el cálculo del factor de corrección:

$$r_s = \frac{0,74(0,99)}{1 - (1 - 0,99)0,16}$$

$$r_s = 0,73$$

² Cengel, Yanus: Transferencia de calor, 2004, Editorial McGraw Hill, 2da. Edición, México, pp. 504-560.

- c) A_c , es el área del colector solar de la terma solar, es decir el área de incidencia de la irradiación solar, la cual en la terma solar está constituida por el área del colector solar de seis tubos de vacío. Consideramos que cualquiera que sea la ubicación del sol, solamente la radiación solar llegará a la mitad de los tubos de vacío, razón por la que solo se consideró la mitad de la superficie cilíndrica de cada tubo de vacío para el cálculo de A_c , el área del colector solar.

$$A_c = \frac{f \cdot D_e \cdot L}{2} \cdot n$$

Dónde:

D_e : diámetro exterior del tubo de vacío

L : Longitud útil del tubo de vacío

n : número de tubos de vacío

$$A_c = \frac{f \cdot (0,058 \text{ m}) \cdot (1,750 \text{ m})}{2} \cdot 6 = 0,96 \text{ m}^2$$

Entonces la irradiación sobre el colector solar (I_c), se calculó para cada uno de los 15 datos experimentales a través de la expresión:

$$I_c = I \cdot \alpha_s \cdot A_c$$

Reemplazando los cálculos efectuados:

$$I_c = \left(I \frac{W}{m^2} \right) (0,73) (0,96 m^2)$$

$$I_c = 0,7008 I \quad W \quad (E)$$

La ecuación (E) nos permitirá calcular la irradiación solar sobre el colector solar de tubos al vacío (I_c) para los datos experimentales; donde 0,708 es constante y solo variará la irradiación solar (I) cuyos valores los obtuvimos de las tablas 5 y 6. Efectuando el primer cálculo para el dato experimental número 1: $I_1 = 1970 \text{ W/m}^2$.

Obtenemos reemplazando en (E):

$$I_{c1} = 0,7008 (1970) = 1380,58 \text{ W}$$

Análogamente se calculó para los restantes datos experimentales, cuyos resultados se muestran en la tabla:

HORA	Irradiancia Solar I (W/m ²)	Irradiación sobre el colector I _c (W)
DÍA: 23 DE OCTUBRE DEL 2015		
12:00	1970	1380,58
13:15	1862	1304,89
14:30	2850	1997,28
DÍA: 24 DE OCTUBRE DEL 2015		
12:00	1962	1374,97
13:15	1907	1336,43
14:30	2924	2049,14
DÍA: 25 DE OCTUBRE DEL 2015		
12:00	1921	1346,24
13:15	1956	1370,76
14:30	3026	2120,62
DÍA: 26 DE OCTUBRE DEL 2015		
12:00	1889	1323,81
13:15	2451	1717,66
14:30	3222	2257,98
DÍA: 27 DE OCTUBRE DEL 2015		
12:00	1855	1299,98
13:15	2558	1792,65
14:30	3391	2376,41

Tabla 6. Cálculo de las irradiaciones solares sobre el colector solar de tubos al vacío.
Elaborado: Por los investigadores.

iii. Cálculo de la Eficiencia Térmica

Realizado los cálculos preliminares del calor útil absorbido por el agua en la terma solar (Q_u) y la irradiación solar térmica (I_c) que incide sobre el área del colector solar de tubos de vacío, se procedió al cálculo de la eficiencia térmica de la terma solar, considerando que los datos experimentales se midieron a partir de las 11:00 a.m. con intervalos de 1 hora entre cada medición, culminándose aproximadamente a las 14:30 p.m. del día; durante los cinco días seguidos.

La ecuación empleada fue:

$$y_E (\%) = \frac{Q_u}{I_c} \times 100 = \frac{Q_u}{I \cdot r \cdot A_c} \times 100$$

Calculando la eficiencia térmica para el primer dato, utilizando los cálculos efectuados para el calor útil (Q_u) de la Tabla 7 y la irradiación solar sobre el colector (I_c) de la tabla 8; se tiene:

$$Q_{u_1} = 687,08 \text{ W}$$

$$I_{c_1} = 1380,58 \text{ W}$$

Por consiguiente:

$$y_{E_1} = \frac{687,08 \text{ W}}{1380,58 \text{ W}} \times 100$$

$$y_{E_1} = 49,77\%$$

Análogamente se procedió para el cálculo de las demás eficiencia térmicas, las que se muestran en la tabla 9.

HORA	Calor útil Q_u (W)	Irradiación sobre el colector I_c (W)	Eficiencia Térmica η_E (%)
DÍA: 23 DE OCTUBRE DEL 2015			
12:00	687,08	1380,58	49,77
13:15	967,52	1304,89	74,15
14:30	1535,41	1997,28	76,88
DÍA: 24 DE OCTUBRE DEL 2015			
12:00	722,13	1374,97	52,52
13:15	1016,60	1336,43	76,07
14:30	1591,50	2049,14	77,67
DÍA: 25 DE OCTUBRE DEL 2015			
12:00	736,16	1346,24	54,68
13:15	1058,66	1370,76	77,23
14:30	1675,63	2120,62	79,02
DÍA: 26 DE OCTUBRE DEL 2015			
12:00	736,16	1323,81	55,61
13:15	1318,07	1717,66	76,74
14:30	1773,78	2257,98	78,56
DÍA: 27 DE OCTUBRE DEL 2015			
12:00	883,39	1299,98	67,95
13:15	1360,13	1792,65	75,87
14:30	1829,87	2376,41	76,99

Tabla 7. Cálculo de las eficiencias térmicas**Elaborado: Por los investigadores**

IV. CONCLUSIONES:

La eficiencia térmica promedio diaria está en el rango de 66 – 74% con un promedio general diario de 69,98%.

La eficiencia térmica de una terma solar con colector solar de placa plana, obtenida en un trabajo de investigación³ fue de 55,70%, eficiencia comparada con la eficiencia promedio general diaria de 69,98% calculada en la tesis es menor en un orden de 14,28%; lo cual confirma que la tecnología de los colectores solares de tubos al vacío de flujo directo son más eficientes que los de placa plana.

V. AGRADECIMIENTOS:

A la escuela profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica, a nuestros compañeros que siempre nos dieron mucho aliento para la elaboración del presente trabajo de investigación

VI. BIBLIOGRAFIA.

1. Hernández, R. Fernández, C. (2010) Metodología de la Investigación. México. Editorial Mc Graw Hill.
2. Valera, A. (1998). Energía Solar (pp. 103-121), Lima – Perú. Editorial Hoalo S.C.R.L.
3. Orbegozo, R., Schulte, B. (2000). Calentamiento de agua mediante el uso de termas solares (13-21), Amsterdam / Lima. Editorial Tool Consult Cenergia.
4. Tobajas, C. (2008). Energía Solar Térmica para instaladores. Madrid. Editorial Técnica Cano Pina S.L.
5. Rosenthal, P. - Canedo, W. (1996). Sistemas solares para el calentamiento del agua (pp. 140 – 150) Bolivia, Editorial Proper Bolivia GTZ.
6. Mott, R. (1996). Mecánica de fluidos aplicada (375 – 396). México / Nueva York. Editorial Prentice – Hall. Hispanoamericana, S.A.
7. Cencel, Y. – Ghajar, A. (2011). Transferencia de Calor y Masa. (pp. 700 – 708). México. Editorial McGraw Hill.

³ XVIII Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente (XVIII SPES) Lima, 14-19, 11. 2011.

8. Montoya, L. – Cabana, W. (2011). Evaluación de un calentador solar de agua. XVIII Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente (14-19) Noviembre, 2011, Lima.
9. Kreith, F. – Manglik, E. (2013). Principios de Transferencia de Calor. (pp. 506 – 524). Australia / Brasil. Editorial Cengage Learning.
10. Levenspiel, O. (1997). Fundamentos de Termodinámica (pp. 92 – 133). México/Nuevo York. Editorial Prentice Hall, Hispanoamericana S.A.

VII. TABLAS Y GRAFICAS.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cálculo del Volumen de agua en el tanque de almacenamiento.....	9
Tabla 2. Cálculo del Volumen de agua en el tanque de almacenamiento.....	10
Tabla 3. Datos experimentales tomados en el módulo experimental.....	13
Tabla 4. Datos experimentales tomados en el módulo experimental.....	14
Tabla 5. Cálculo del calor útil.....	19
Tabla 6. Cálculo de las irradiaciones solares sobre el colector solar de tubos al vacío. 22	
Tabla 7. Cálculo de las eficiencias térmicas	24

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Terma solar con tubos de vacío.	3
Figura 2. Termocupla Digital.	4
Figura 3. Piranómetro Digital.....	4
Figura 4. Anemómetro digital.	5
Figura 5. Controlador microcomputador solar.	6