



# ESPE

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**  
**INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**



## Diseño e implementación de un colector cilindro parabólico con seguimiento solar para obtener agua caliente

**Autores:**

Carlos A. Mantilla

José M. Toro

**Tutor:**

Ing. Mario Jiménez

# Introducción



- ☞ En el presente proyecto se analiza la radiación solar disponible en el lugar de instalación, el diseño y construcción del sistema mecánico, además se realiza un análisis del sistema de seguimiento solar, el cual se dimensiona a partir de la estructura del CCP; para la alimentación de energía del sistema de seguimiento se dimensiona el sistema de carga, conformado por un panel solar y una batería.
- ☞ El sistema de calentamiento se basa en colocar un Heat Pipe en el foco de la parábola para recibir los rayos solares reflejados por el colector e intercambiar calor al agua a partir de un termopozo donde ingresa el condensador del tubo de calor, obteniendo un rendimiento global de 16,37%.

# Objetivos del trabajo de titulación



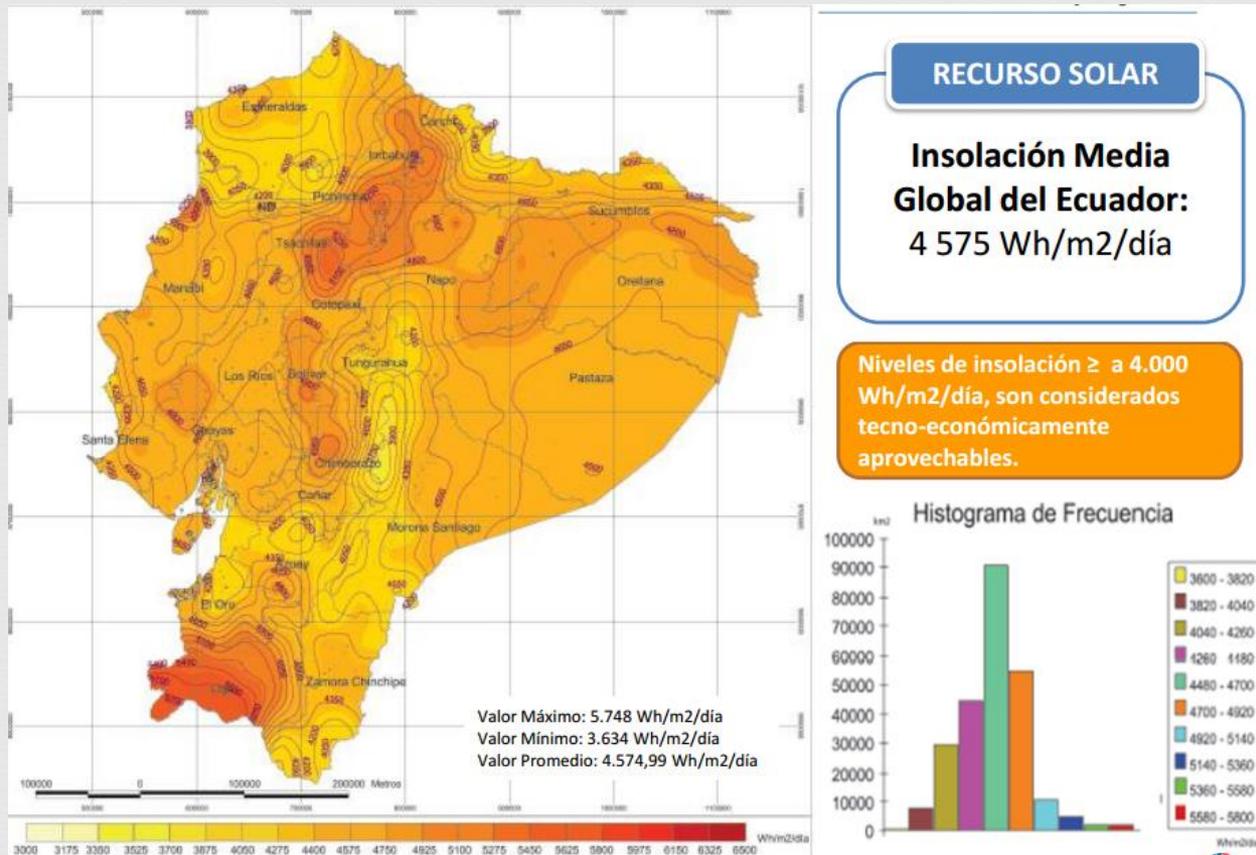
Obtener las variables necesarias para realizar el sistema de seguimiento solar.

Especificar los materiales a usar para la construcción del colector cilindro parabólico, el mecanismo de seguimiento solar.

Diseñar un sistema de calentamiento de agua mediante un intercambiador de calor.

Monitorear las variables físicas que intervienen en el proceso de calentamiento de agua.

# Radiación solar en el Ecuador



# Colector cilindro parabólico (CCP)



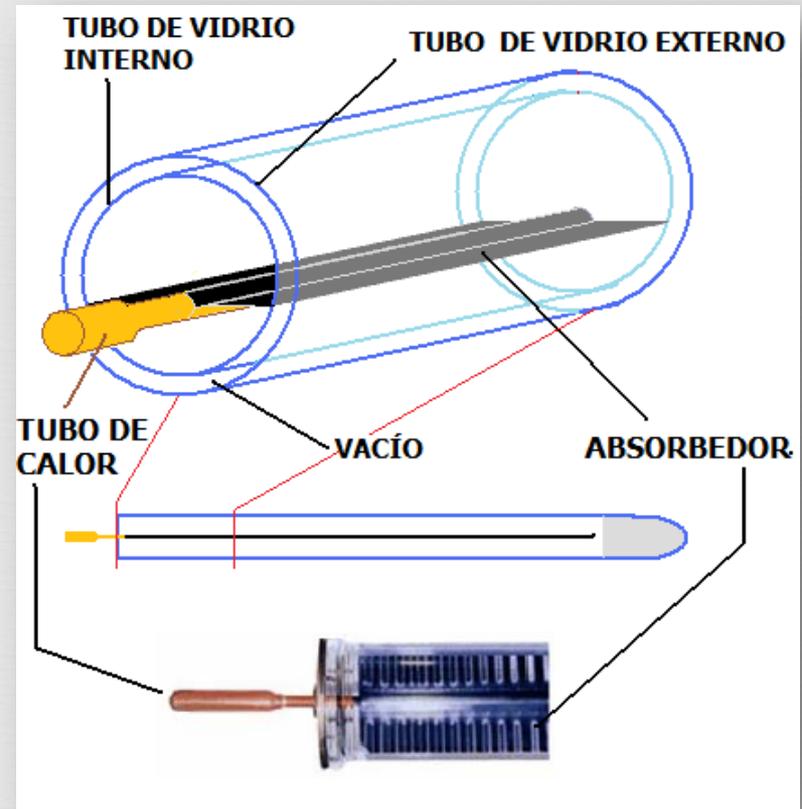
- ☞ Tienen un foco lineal y que transforma la radiación solar directa en energía térmica cuando se calienta un fluido a través de un tubo que se encuentra en el eje focal del mismo.
- ☞ Además, se tiene que la eficiencia en este tipo de colector tiene valores que van del 12,5% al 17%.



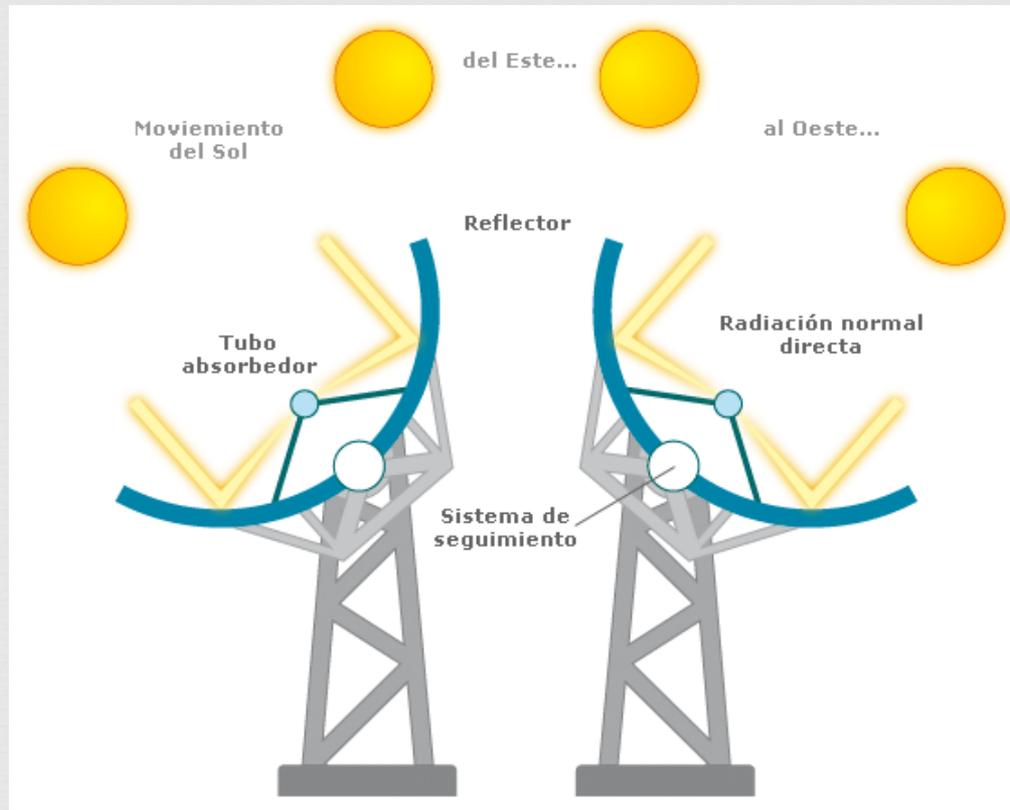
# Sistema Heat Pipe



- Es un sistema térmicamente complejo de evaporación-condensación que transporta rápidamente gran cantidad de calor
- El ciclo de evaporación-condensación acepta calor desde una fuente externa, la cual eleva la temperatura del fluido de trabajo del Heat Pipe a su zona de ebullición, este se evapora para luego liberar calor latente mediante transformación inversa (condensación) en la sección del disipador de calor.



# Sistema de seguimiento solar



# Diseño e implementación



Análisis del recurso solar

Diseño del colector cilindro parabólico

Mecanismo de seguimiento solar

Diseño del sistema de obtención de agua caliente

Conexión del sistema hidráulico

Módulo de control

Sistema de monitoreo de variables físicas

# Análisis del recurso solar



Utilizando el software SAM, en la ubicación geográfica del lugar de instalación en donde se encontrará ubicado el sistema

	Max	Avg Daily Max
✓ All		
✓ lat-0.93000_lon-78.61000_2014.csv		
> Global irradiance - GHI (W/m2)		
✓ Beam irradiance - DNI (W/m2)		
Jan	1020	970
Feb	994	679.4194
Mar	965	635.4839
Apr	965	801.4839
May	934	832.8065
Jun	960	868.4516
Jul	970	921.8387
Aug	960	825
Sep	978	824.6452
Oct	978	819
Nov	992	876.0968
Dec	1025	919.871

# Ángulo de incidencia solar

---

☞ Para el encontrar el ángulo de incidencia solar, con una inclinación mínima del colector respecto a la horizontal de  $6^\circ$ , se tienen los siguientes parámetros:

☞ Latitud geográfica ( $\varphi$ ):  $-0,9354^\circ$  (Lugar de instalación)

☞ Inclinación del colector ( $s$ ):  $6^\circ$

☞ Declinación ( $\delta$ )

☞ Azimut u Orientación ( $a$ ):  $180^\circ$

☞ Ángulo horario ( $w$ )

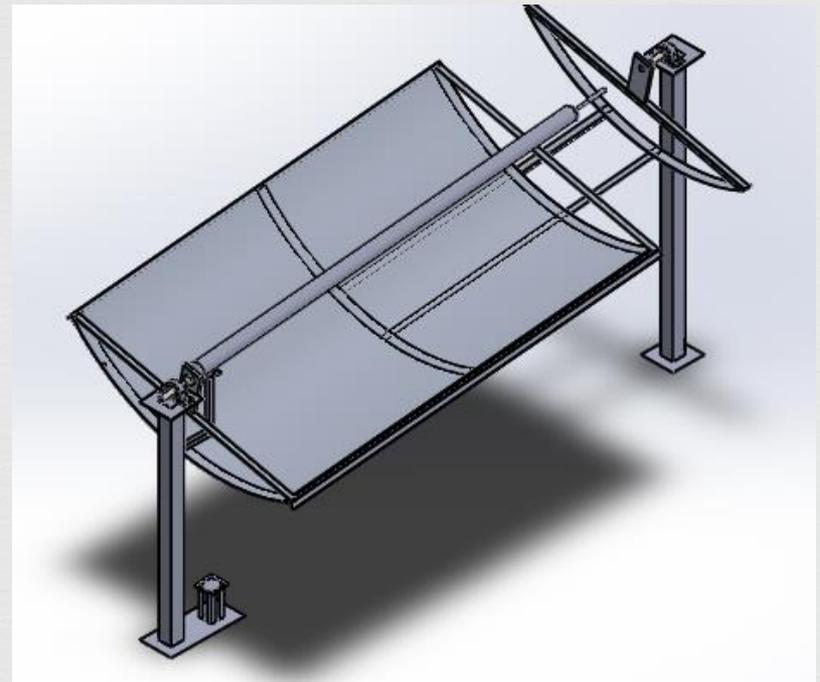
$$\cos \theta = \cos(\varphi - s) \times \cos(\delta) \times \cos(w) + \operatorname{sen}(\varphi - s) \times \operatorname{sen}(\delta)$$

$$\cos \theta = 0,8643$$

# Diseño del colector cilindro parabólico



El colector solar cilindro-parabólico a implementar se conforma principalmente por una base reflectora en forma de parábola, la cual es la encargada de reflejar los rayos solares al punto focal en el cual se encuentra un tubo absorbedor, el cual permanece fijo durante todo el funcionamiento.



# Diseño de los componentes del CCP



## BASE REFLECTORA

☞ Para el diseño de la base reflectora se utilizará una plancha de aluminio reflectante cuyas dimensiones son 1.75x1.20 metros; el lado de 1.20 metros será donde se realiza la curva de la parábola. Se tomará como vértice de la parábola la mitad del lado curvo, es decir la longitud de la curva ( $S$ ) será de 0,6 metros.



- Se realizarán los cálculos para dos distancias focales, 25 y 35 centímetros.
- Teniendo que la longitud de la curva se determina por la ecuación

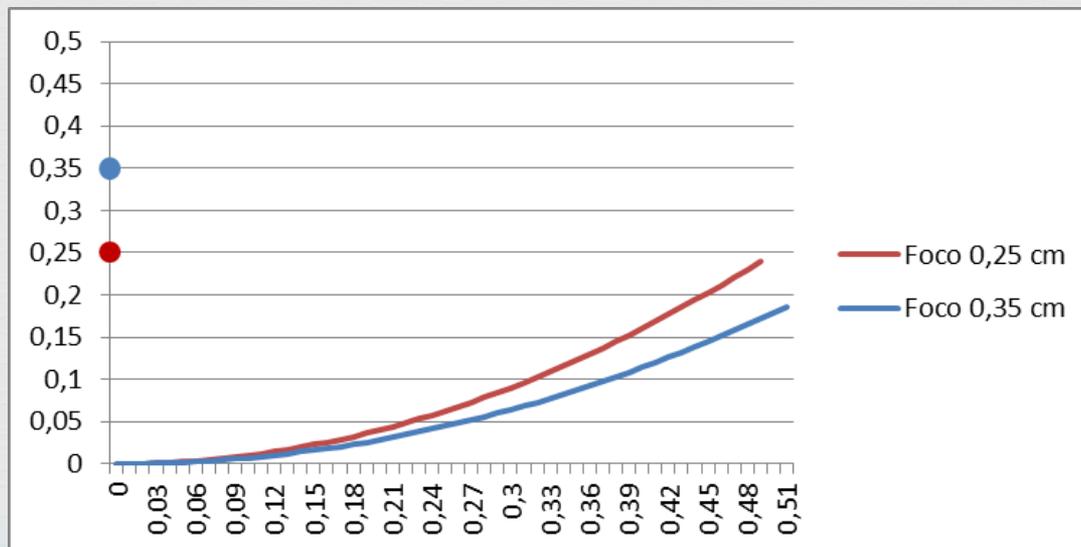
$$S = \int_a^b \sqrt{1 + f'(x)} dx$$

- Hallamos la derivada  $f'(x)$  de la ecuación de la parábola, la cual es:

$$f(x) = y = \frac{x^2}{4 \times F}$$



Foco	$X_{m\acute{a}x}$	$Y_{m\acute{a}x}$
0,25	0,49	0,24
0,35	0,51	0,19





Se calcula el ángulo de abertura  $\alpha$  y la distancia  $\rho$  correspondientes al punto focal con la parábola.

Para calcular  $\alpha$  procedemos a realizar el cálculo siguiente:

$$tg\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{X_{max}}{F - Y_{max}} = \frac{0,51}{0,35 - 0,19} = \mathbf{3,1875}$$

$$\alpha = 2 \times arctg(3,1875) = 145,164^\circ$$

$$\rho = \sqrt{X_{m\acute{a}x}^2 + (F - Y_{m\acute{a}x})^2}$$

$$\rho = \sqrt{0,51^2 + (0,35 - 0,19)^2} = \mathbf{0,53 \text{ cm}}$$

# Tubo receptor

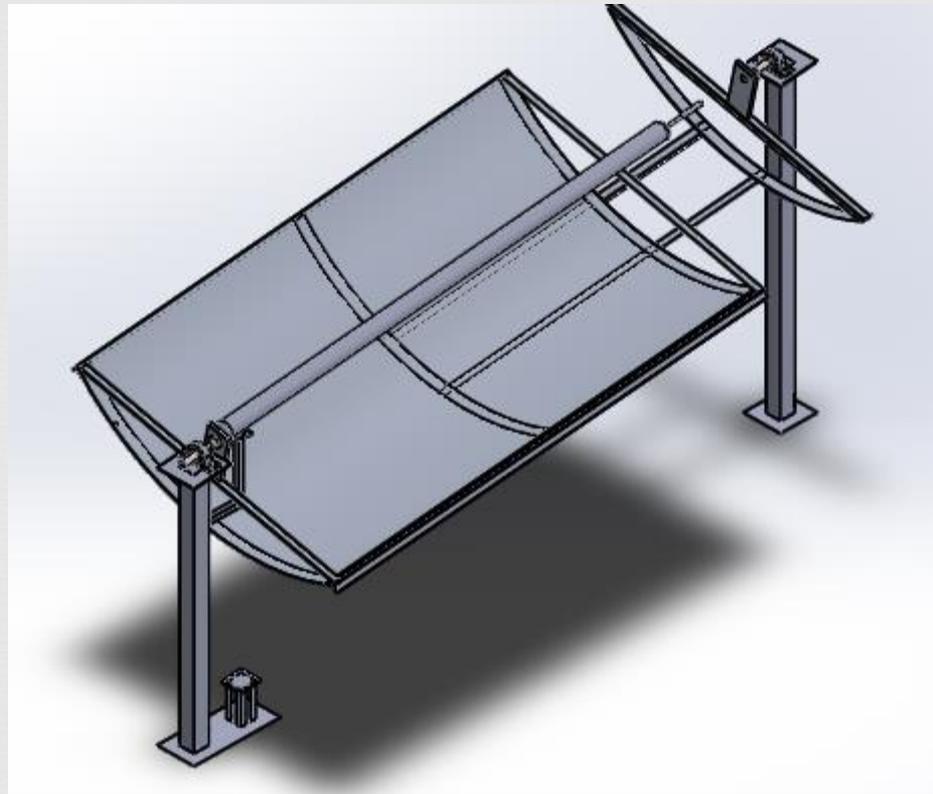


Ahora procedemos a calcular el diámetro del tubo receptor utilizando la ecuación siguiente:

$$\begin{aligned}\varnothing_{min} &= \frac{2 \times \rho \times tg16'}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \\ \varnothing_{min} &= \frac{2 \times 0,53 \times tg16'}{\cos\left(\frac{145,164}{2}\right)} = 1,6 \text{ cm}\end{aligned}$$

Utilizando el valor de distancia focal igual a 25 cm, se obtiene un valor de diámetro mínimo del tubo de 22 centímetros; por lo tanto la distancia focal a utilizar en el proyecto será la de 35 centímetros.

# Modelado del CCP

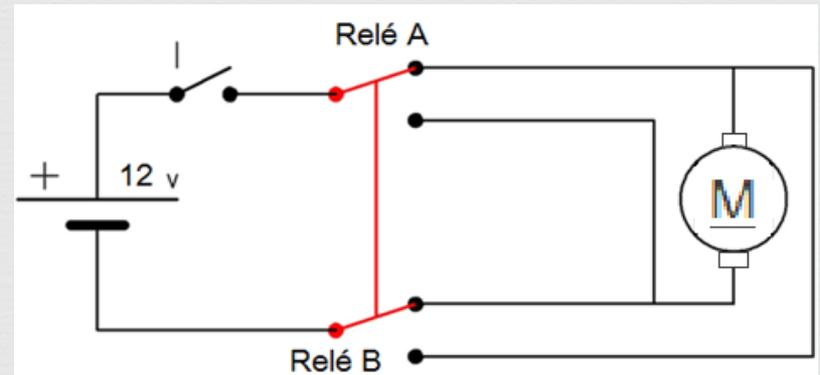


# Mecanismo de seguimiento solar

- El mecanismo de seguimiento solar a utilizar en el proyecto se basa en un actuador lineal capaz de ejercer una fuerza de hasta 1500 [N], y se conecta a un controlador que mediante dos celdas fotovoltaicas que captan la radiación solar generando así un valor de voltaje en cada una de las celdas.
- según la diferencia de voltaje que existe entre ellas se produce el sentido de giro del motor para regular la posición del eje.



# Descripción del control de seguimiento solar



# Implementación del mecanismo de seguimiento solar



∞ La implementación del mecanismo se realizó de modo que se aproveche la radiación solar útil en el lugar de ubicación del seguidor.



*ESTE*

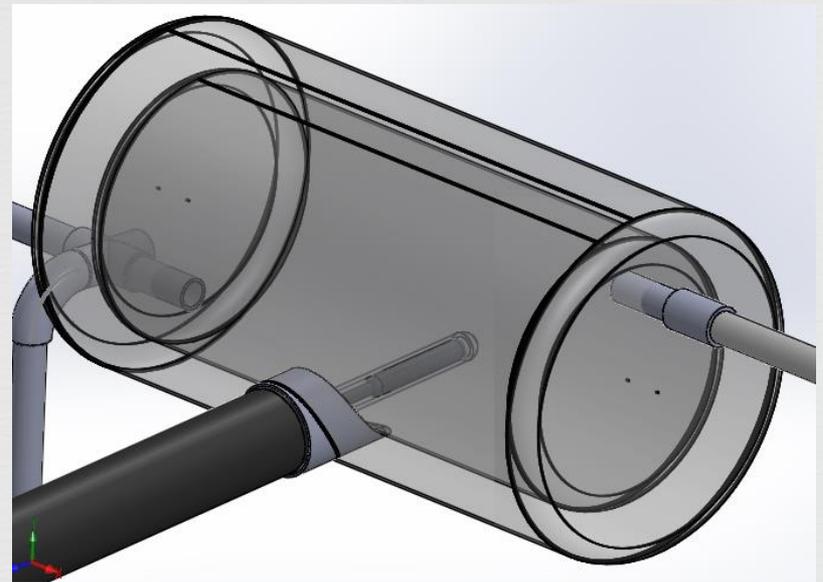


*OESTE*

# Diseño del sistema de obtención de agua caliente



Este proyecto se lo hará utilizando Heat Pipe como fuente de calor, ya que al utilizar un tubo de vacío como absorbedor de radiación la eficiencia del sistema es mucho mayor que al tener un tubo de cobre en el foco del reflector,





∞ Para el dimensionamiento del tanque de almacenamiento es necesario calcular el calor que recibirá el tubo absorbedor proveniente de la superficie reflectora del CCP.

$$\begin{aligned}Q_{util} &= 423,69 [W] \\Q_{nec} &= Q_{util} \times 3600 s \\&= 423,69 \times 3600 \\Q_{nec} &= 1525,28 kJ\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}Q_{nec} &= m \times C_p \times (\Delta T) \\m &= 8,22 kg\end{aligned}$$



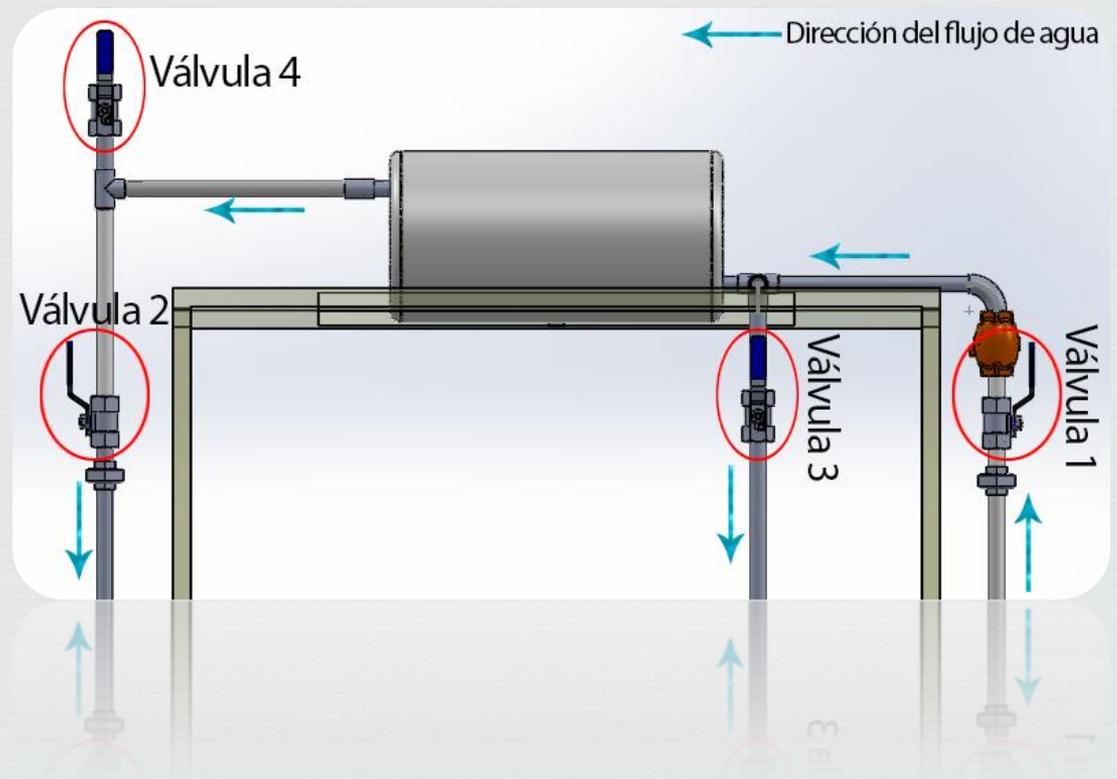
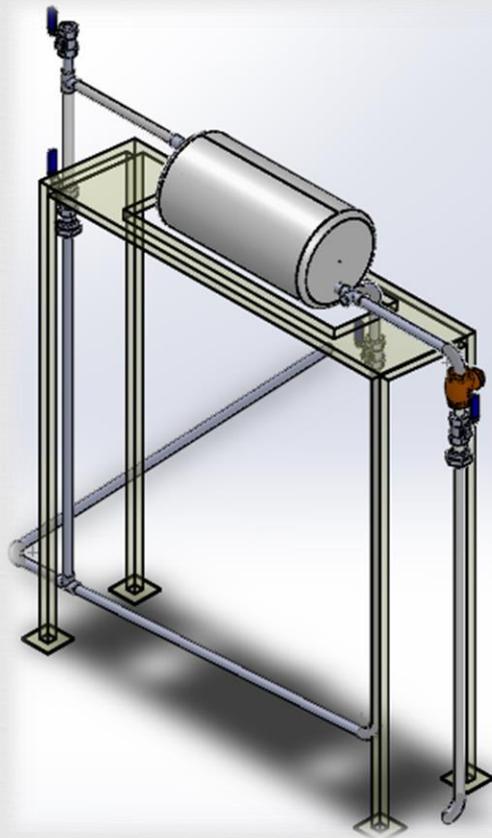
# MODELADO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO



El sistema de calentamiento de agua está conformado por el tanque de almacenamiento de agua, el Heat Pipe y una mesa soporte del tanque



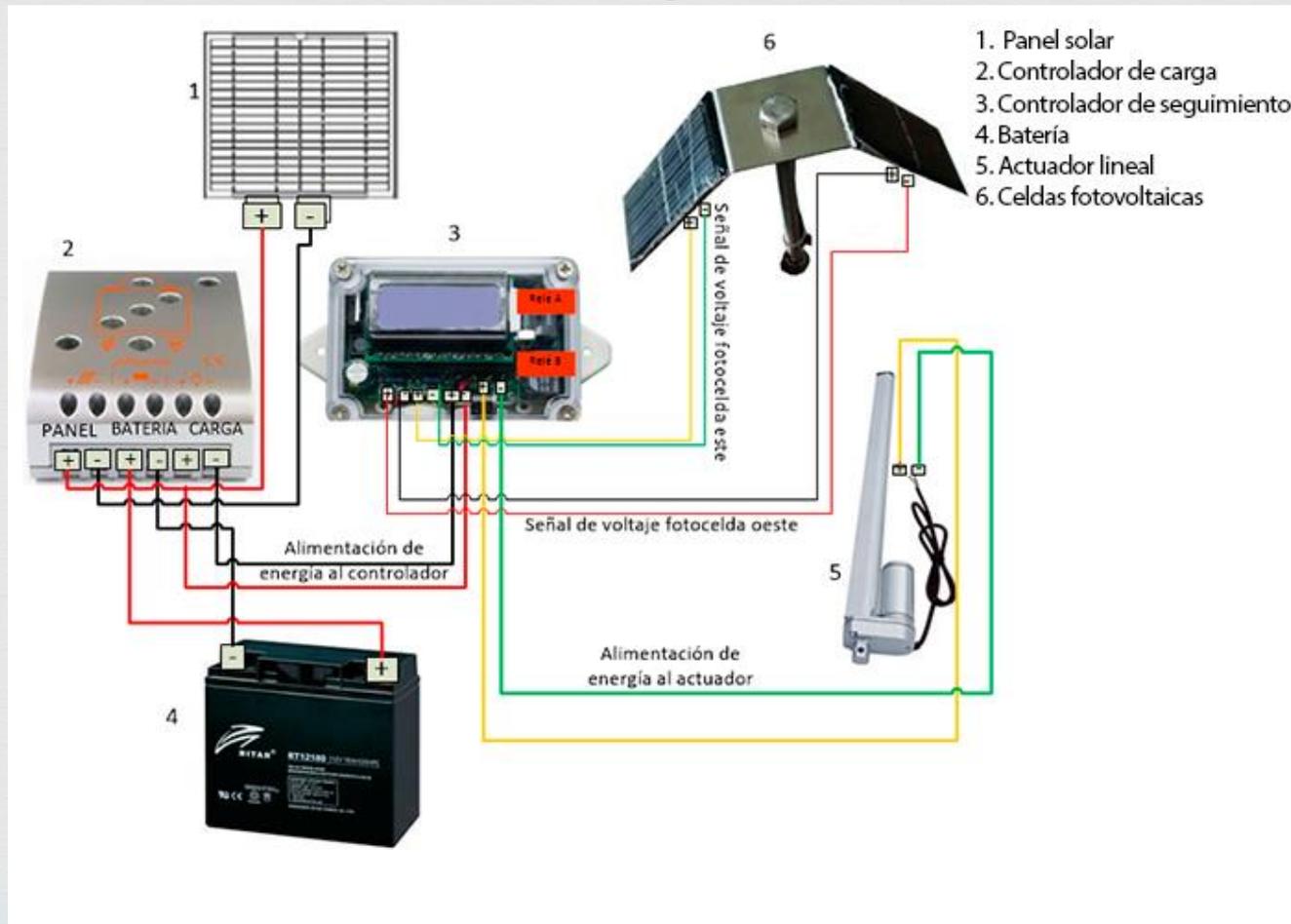
# Conexión del sistema hidráulico



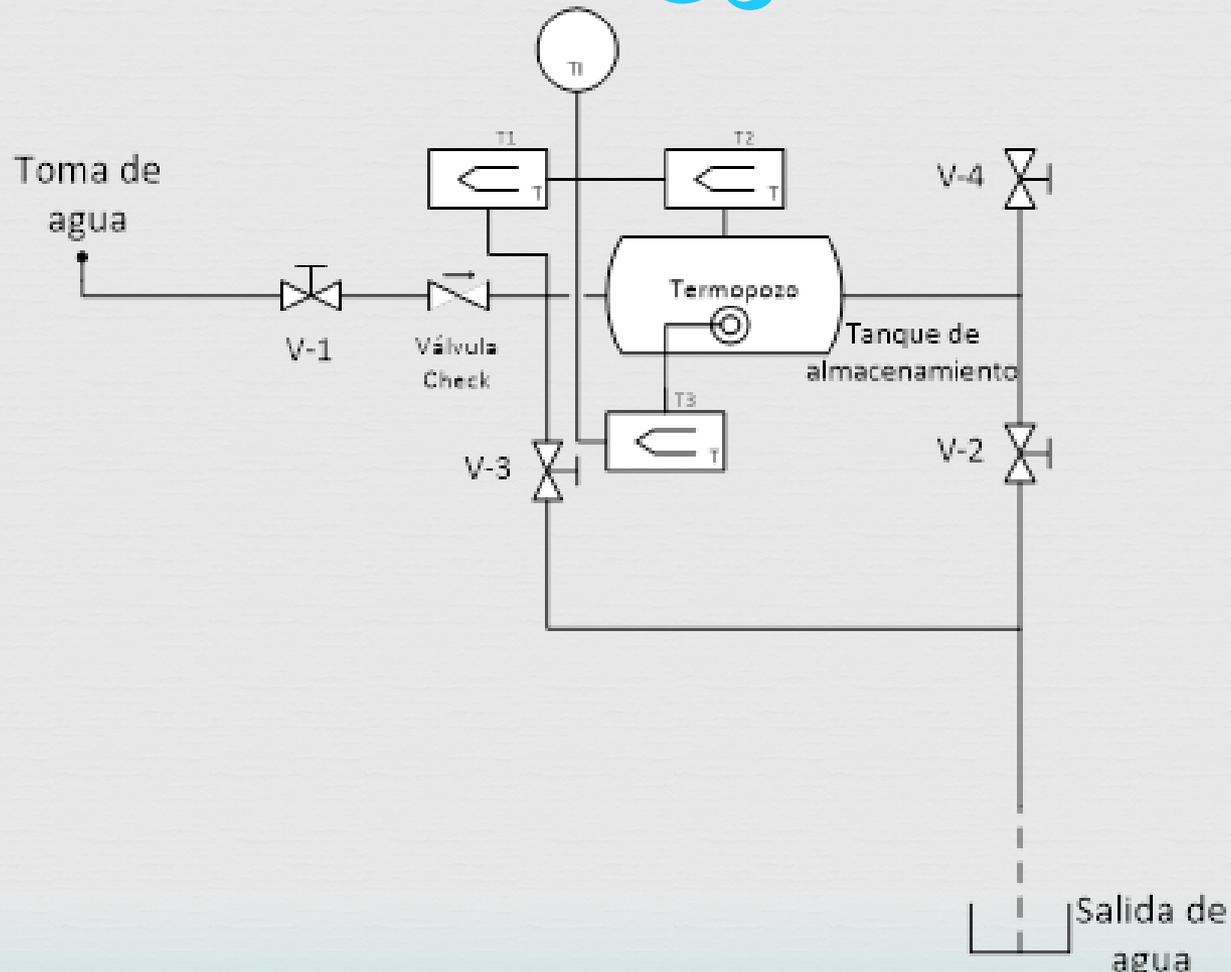
# Módulo de control

Nombre del equipo	Característica	Imagen del equipo
<b>Batería</b>	Encargada de suministrar energía para el sistema de seguimiento.	
<b>Controlador de carga solar</b>	Permite regular los parámetros de voltaje y corriente producidos por el panel solar para cargar la batería.	
<b>Caja de control del seguidor solar</b>	Es la encargada de realizar el control de movimiento del actuador eléctrico	

# Conexiones de los dispositivos del módulo de control



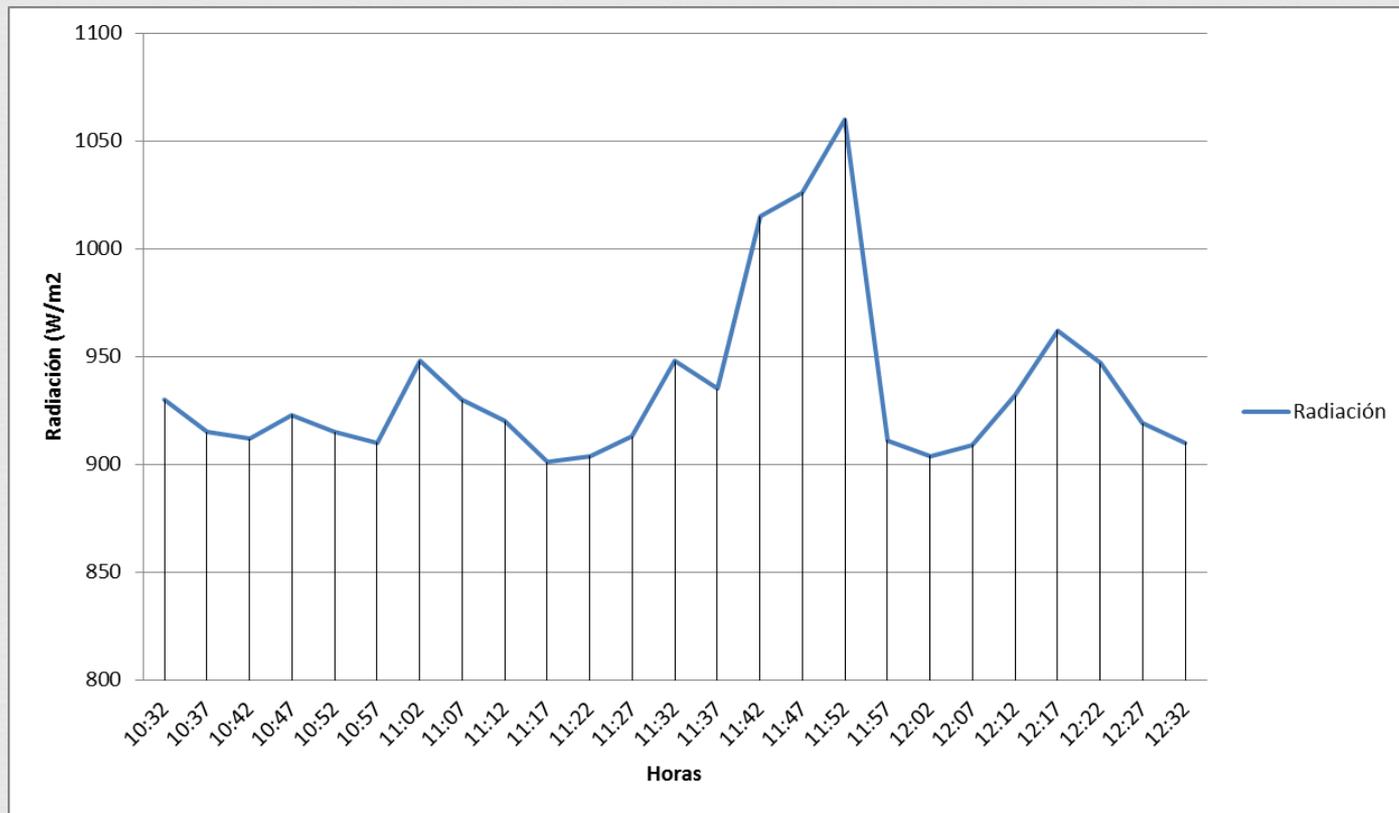
# Sistema de monitoreo de variables físicas



# Pruebas y resultados

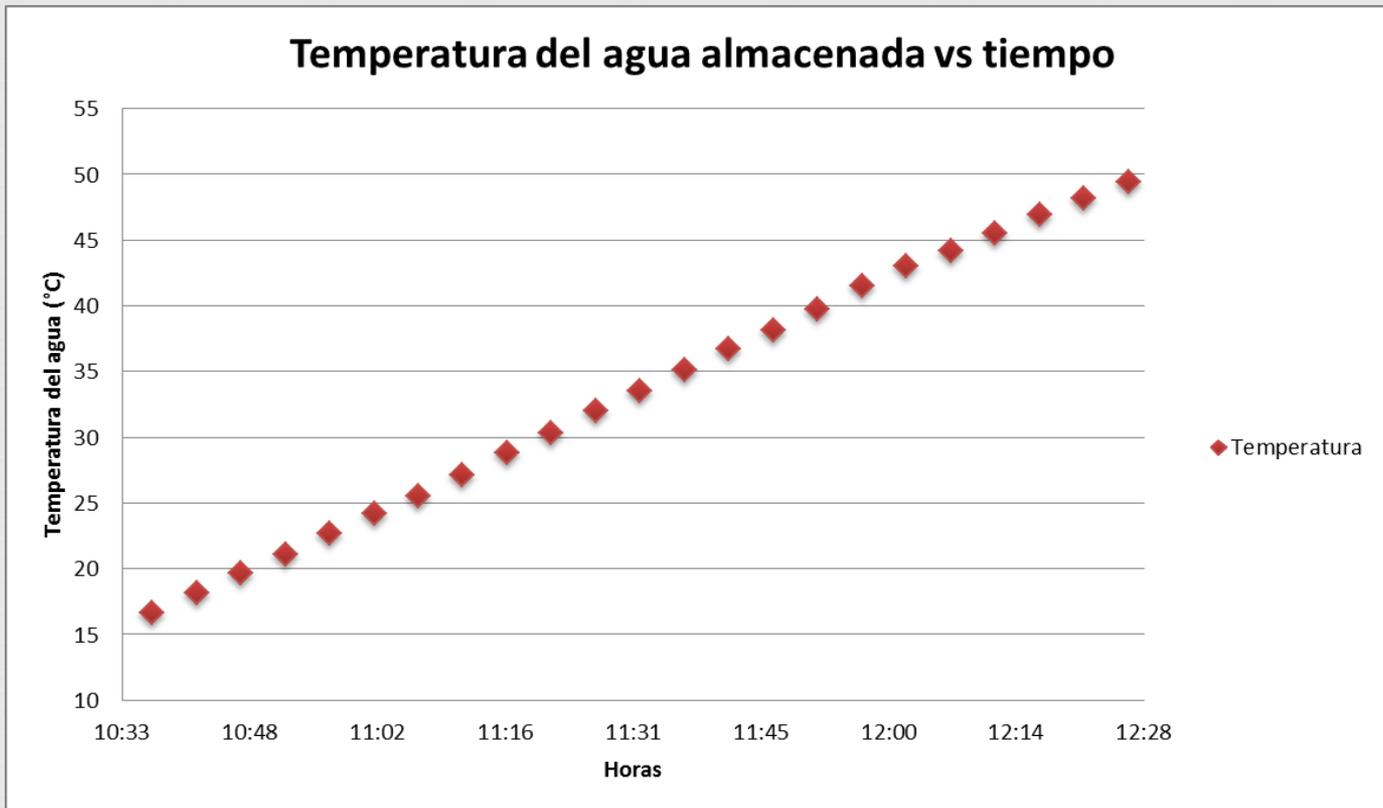


# Radiación en el lugar de instalación

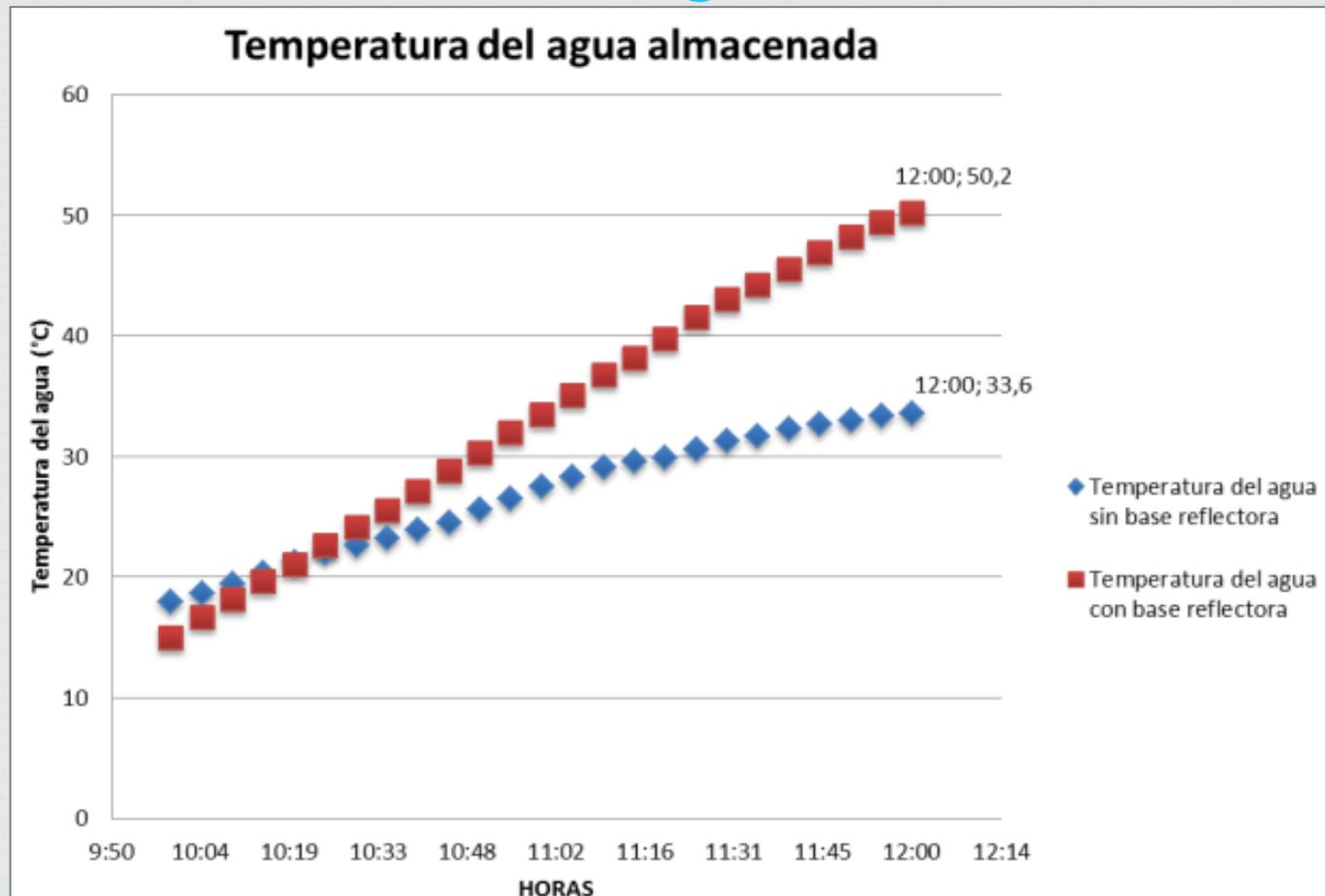


La energía incidente del sol durante las dos horas es de 1873,25 Wh/m<sup>2</sup>.

# Temperatura en el tanque



# Ensayo con base reflectora cubierta



# Rendimiento global



$$\begin{aligned}Q_{util} &= m \times C_p \times (T_f - T_i) \\Q_{util} &= 10 \times 4,18 \times (50,2 - 15) \\Q_{util} &= 1471,36 \text{ [KJ]} \times \frac{1}{3600 \text{ s}} = 408,71 \text{ [Wh]}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}Q_{in} &= S_c \times E_{sol} \times \cos \theta \\Q_{in} &= 1,5418 \times 1873,25 \times 0,8643 \\Q_{in} &= 2496,25 \text{ [Wh]}\end{aligned}$$

☞ Con esto tendremos un rendimiento del colector de:

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{Q_{util}}{Q_{in}} \\ \eta &= 0,1637 = \mathbf{16,37\%}\end{aligned}$$

# Conclusiones



- Se diseñó un colector cilindro parabólico, orientado al norte con una inclinación de  $6^\circ$  respecto a la horizontal con seguimiento solar este-oeste controlado por un sensor fotovoltaico; mediante la implementación del sistema de calentamiento Heat Pipe en el foco de la base reflectora del CCP se produjo 1471,35 [KJ] de energía útil durante dos horas, que permitió tener un incremento de temperatura del agua almacenada en el tanque de  $35,2^\circ\text{C}$ .
- Se obtuvo un rendimiento global del sistema de 16,37% ya que la energía incidente del sol sobre el colector fue de 2527,23 Wh y la energía útil utilizada por el agua para elevar su temperatura de  $15^\circ\text{C}$  a  $50,2^\circ\text{C}$  fue de 408,71 [Wh].



- ☞ El seguimiento solar es en un eje debido a que al estar cerca de la línea ecuatorial la declinación solar en los solsticios no supera los  $23,4^\circ$  según el software de simulación de astronomía de la Universidad de Nebraska-Lincoln con el cual se analizó el movimiento solar sobre Latacunga, por lo tanto un seguimiento de norte a sur no es necesario.
- ☞ Se utilizó aluminio brillante con un coeficiente de reflexión de 0,853 para la base reflectora con el objetivo de reflejar los rayos del sol y, a su vez, de bajo peso; la estructura del sistema se construyó de acero A36 y fue pintada al horno para que soporte condiciones climáticas adversas, el tanque de almacenamiento está construido de acero inoxidable.



- ❧ El sistema de seguimiento solar tiene autonomía para su funcionamiento mediante su fuente de alimentación, que fue diseñada mediante un panel solar y una batería, debido a que este tiene un motor DC que mueve un actuador por medio de engranes a una velocidad de 5,7 mm/s y posee una clase de protección IP54 para el actuador e IP65 para la caja de control.
- ❧ No es necesario de un sistema de recirculación de agua para el funcionamiento del sistema de calentamiento debido a que se este sistema de calentamiento de agua se diseñó utilizando el sistema de intercambio de calor mediante heat pipe, en donde el condensador del tubo de calor ingresa al tanque de almacenamiento por un termopozo, que es en donde se produce el intercambio de calor con el agua.
- ❧ Mediante un termómetro digital de cuatro canales, al cual se conectan termocuplas tipo K, se mide la temperatura del agua al ingreso del tanque, en el agua almacenada dentro del mismo y en el condensador del Heat Pipe; la radiación solar se mide mediante un piranómetro durante el funcionamiento del sistema.



¡GRACIAS!

