

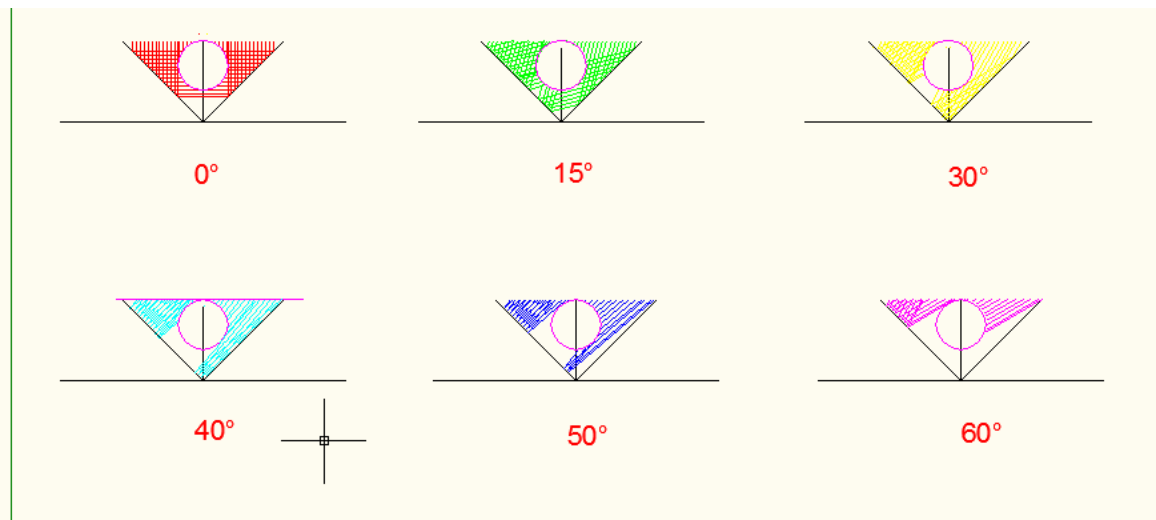
## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1. Síntesis de los materiales elegidos y su diseño del calentador solar

Las materias primas principal utilizados para la construcción de este colector solar fueron metales debido a que la duración de este material es bastante significativo, según datos obtenidos de los distribuidores de acero, mencionan que todo lo que está hecho de acero inoxidable se hace para resistir mucho tiempo, por lo que su tiempo de vida es largo y el acero galvanizado tiene el mismo caso.

#### 6.1.1. Concentrador

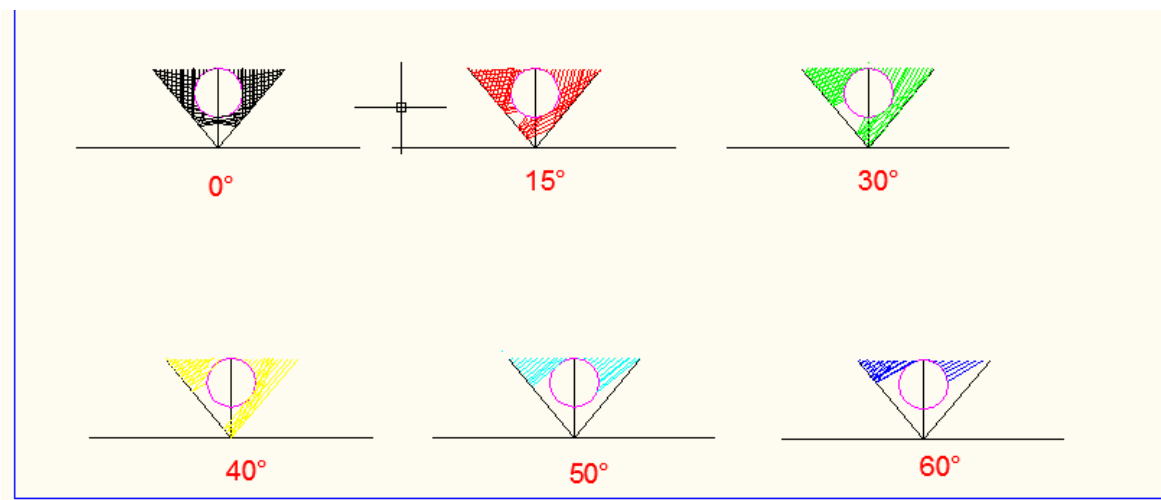
Un concentrador es un dispositivo que concentra la componente directa de la radiación solar sobre un absorbedor (Almaza, etc, 1981). Para el estudio y diseño del sistema de concentrador solar, se tuvo que realizar un estudio de trazado de rayos con el cual en la figura 7 muestra los resultados del estudio de trazado de rayos con un ángulo de apertura de  $90^\circ$  y distancia focal  $1.25r$  para diferentes ángulos de incidencia de la radiación solar.



**Figura 7.** Resultados del estudio de trazado de rayos con un ángulo de apertura de  $90^\circ$  y distancia focal  $1.25r$ .

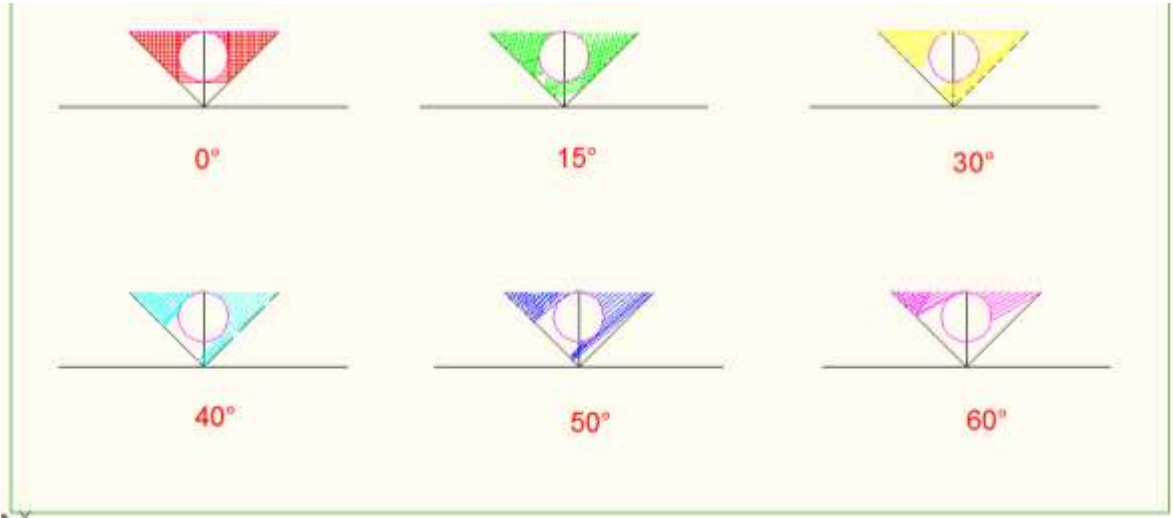
Como se observa, existe una gran cantidad de pérdida de radiación sobre todo para los ángulos de incidencia de  $0^\circ$  y por arriba de  $30^\circ$ . Estos resultados se

pueden asociar con la gran apertura de la distancia entre el vértice del concentrador y el tubo absorbedor. Una posibilidad para disminuir la pérdida de radiación en el sistema es disminuyendo el valor del ángulo de apertura tal como se muestra en la figura 8. Se observa una considerable disminución de la pérdida por radiación mediante la reducción del ángulo de apertura del concentrador, sin embargo se observa también una importante disminución del mismo para poder coleccionar la radiación cuando ésta subtende ángulos de incidencia mayor a  $30^\circ$ . No obstante, es notorio que aún para la radiación directa, las pérdidas debidas a la separación entre el colector y el absorbedor son excesivas e inaceptables



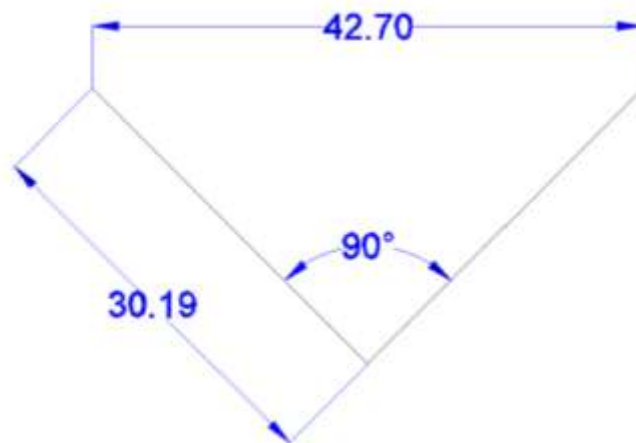
**Figura 8.** Resultados del estudio de trazado de rayos con diferentes ángulos de apertura y distancia focal  $1.25r$ .

El resto de los análisis variando la distancia entre el vértice y el absorbedor generó resultados similares para los dos ángulos de apertura probados, una marcada pérdida de radiación en la apertura entre el vértice y el absorbedor, dificultad en la eficiencia de colección de radiación, (datos no mostrados). En la figura 9 se muestran los resultados obtenidos en el estudio de trazado de rayos usando un ángulo de apertura de  $90^\circ$  y una apertura entre el vértice y el absorbedor de  $1.0r$ . El análisis de los resultados muestra que con esta geometría se tiene el mínimo de pérdidas de radiación con un área de iluminación máximo para los diferentes ángulos de incidencia de la radiación solar.

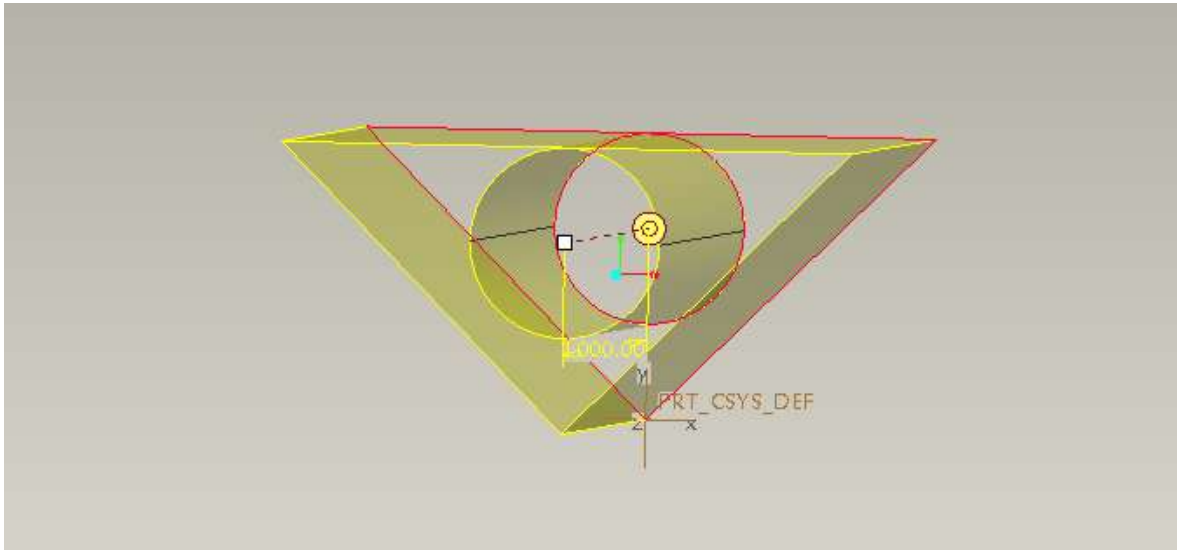


**Figura 9.** Resultados del estudio de trazado de rayos con un ángulo de apertura de  $90^\circ$  y distancia focal 1.0r.

Con los resultados descritos, una vez decidido cuál es la geometría óptima del concentrador solar, se procedió a realizar el diseño del sistema que fue construido como primera versión del prototipo para pruebas en el laboratorio. La figura 10 muestra las dimensiones obtenidas del concentrador solar unitario y la figura 11 muestran una vista frontal del diseño.

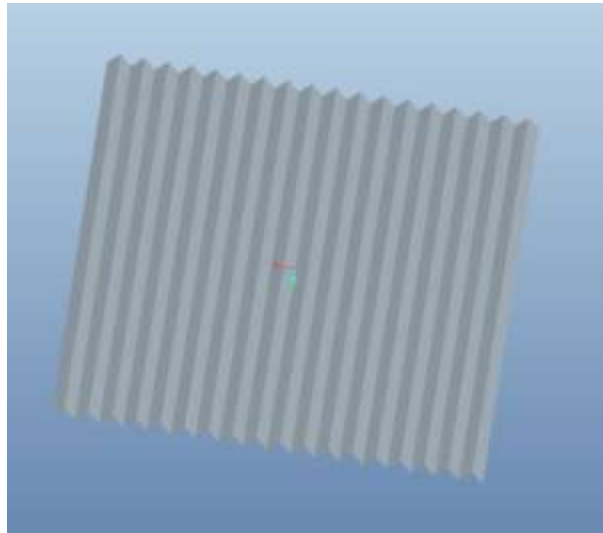


**Figura 10.** Dimensiones del diseño de concentrador solar unitario. Fuente: propia



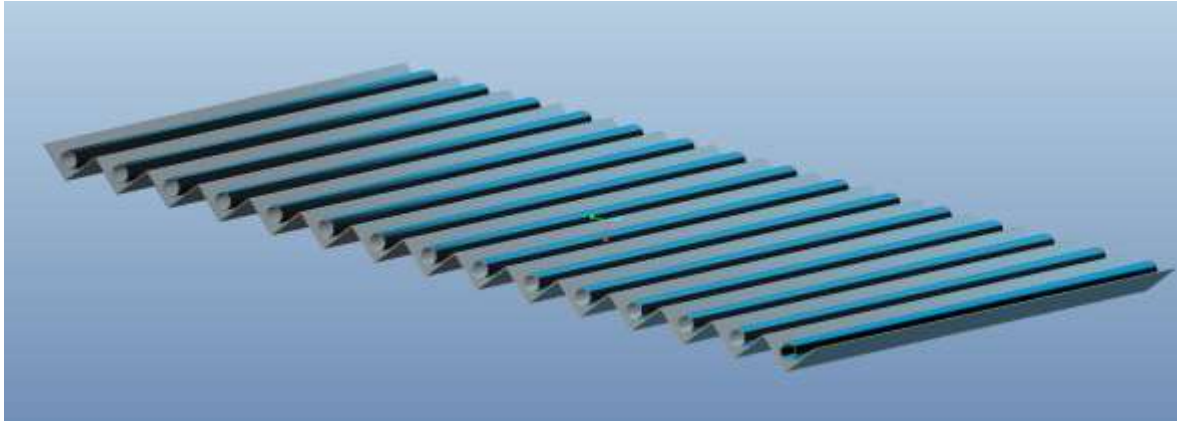
**Figura 11.** Vista frontal del diseño del concentrador.

Sin embargo, para construir el calentador solar, se diseñó una serie de concentradores solares, formando un sistema unitario y para ello las medidas propuestas fueran de 122cm x 85.4cm formando un área de  $1\text{m}^2$  como se presenta en la figura 12.



**Figura 12.** Diseño del concentrador de 122cm x 85.4cm con un área de  $1\text{m}^2$ . Fuente: propia

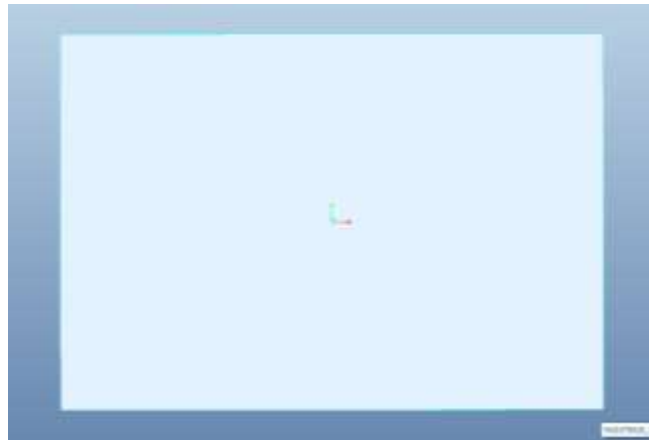
En la figura 13 muestra una vista de la conformación que tendría el sistema de concentración solar del prototipo si, después del análisis del diseño mostrado en las figuras 10 y 11, se decidió utilizar esta geometría para la construcción del sistema que fue probado.



**Figura 13.** Vista lateral del sistema de concentración solar completo que fue construido.

Para la construcción del concentrador solar fue necesario encontrar un material que contara con determinadas características, entre ellas principalmente tuviera un buen nivel para reflejar la radiación solar reflejante y al mismo tiempo que tuviera la facilidad de manipulación. Para ello, se realizaron pruebas a tres tipos de materiales reflejantes que fueron papel aluminio, papel reflejante de envoltura de regalos y espejos de vidrios, de los cuales el de mejor resultado fue el de espejos de virio (Solís & Gutiérrez, 2010).. Sin embargo este material solo cumple con una de las dos características principales requeridas para nuestro concentrador, por lo tanto en busca de otras opciones de materiales, se halló una lámina de acero inoxidable con acabado tipo espejo que contaba con un excelente nivel reflejante, maleable y además como se mencionó anteriormente, es durable. Por ello, se decidió utilizar este material.

Para el caso del colector plano que se utilizó una lámina diferente, pero con dimensiones similares a las del colector en V se utilizó la lámina más sencilla y económica posible del mercado, hallando finalmente una lámina de lata que fue pintada con pintura negro mate, con el objetivo de simular los colectores comunes y económicos del mercado actualmente.



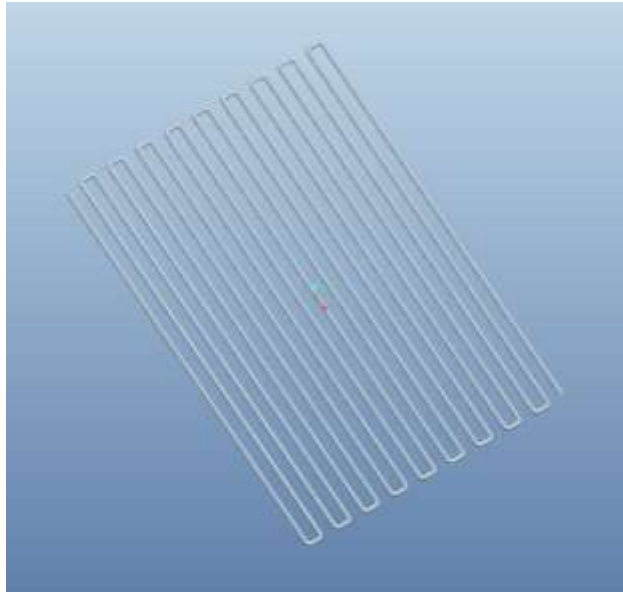
**Figura 14.** Diseño de lámina del concentrador de 122cm x 85.4cm plano de 1 m<sup>2</sup> de área. Fuente: propia

### 6.1.2. Absorbedor

Absorbedor: componente de un dispositivo solar que tiene como función captar y retener la mayor cantidad de radiación solar (Almanza, etc. 1981). El absorbedor es la segunda pieza más importante del colector solar. Es el componente que captará la radiación solar lo distribuirá al líquido a calentar que para este proyecto es agua. Para el buen funcionamiento del colector solar, se analizar diversos materiales que como se menciona, puedan captar y retener, además de transmitir la mayor cantidad de energía. Para ello se ha decidido utilizar como absorbedor tubos de cobre pintados con pintura negro mate, ya que el cobre tiene un excelente nivel de absorción (aven, 2009), además de ser materiales comunes y accesibles económicamente.

En cuanto a las dimensiones, el absorbedor se diseñó para captar la radiación en un área de 1 metro cuadrado, ya montado sobre el concentrador

solar. Formando un radiador con 19 tubos de cobre con longitud de 122cm y una distancia entre centros de ejes de 4.5cm, quedando como lo muestra la figura 15.

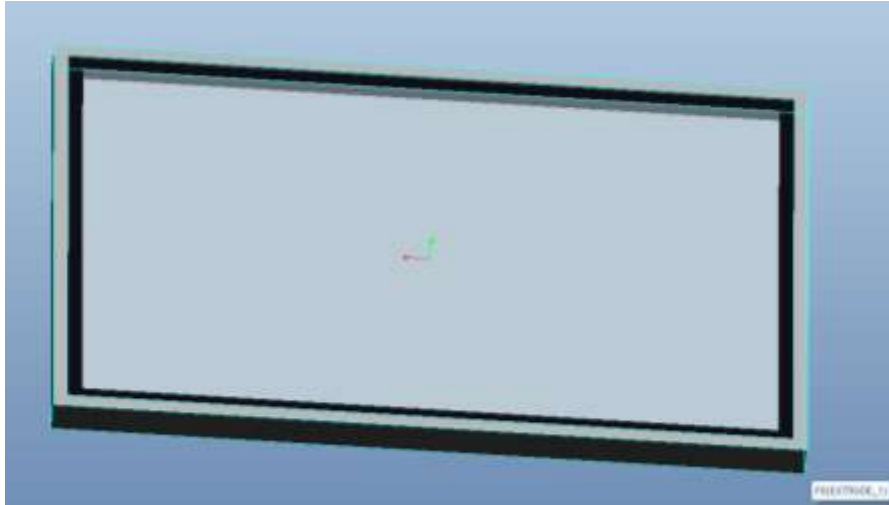


**Figura 15.** Diagrama de la construcción del radiador (absorbedor). Fuente: propia.

### 6.1.3. Marcos

En el caso de los marcos se analizaron varias propuestas de materiales diversos, pero como en los componentes anteriores, éste debería cubrir algunos requisitos básicos como el que pudiera proteger el sistema de calentamiento, además de que pudiera resistir al ser expuesto a la radiación solar constante y a las inclemencias del tiempo, para ello se decidió utilizar un marco hecho de lámina de acero galvanizada ya que cubre muy bien los requisitos antes mencionados.

Para el diseño de los marcos, se buscó que pudieran contener en su interior y sin ningún problema el concentrador y el absorbedor ya ensamblado y montado, obteniendo así un marco de lámina galvanizada de 129cm x 90cm x 5 cm de espesor.



**Figura 16.** Diagrama del marco. Fuente: propia.

#### **6.1.4. Vidrio**

El colector solar lleva un vidrio colocado en la parte frontal del mismo, que permite por una parte el paso de la radiación solar hacia los componentes importantes de dicho aparato, y por otra parte hacer un efecto invernadero dentro de este sistema, esto permitirá captar mayor cantidad de energía. Por este motivo se decidió colocar un vidrio tratado térmicamente para garantizar que soporte los cambios bruscos de temperatura.

El vidrio no se diseñó, solo se calculó el área que éste debería cubrir y se mandó a elaborar, quedando con las medidas siguientes: 85.5cm de ancho X 122.5cm de largo.





**Figura 17.** Imagen del vidrio templado. Fuente: propia.

### **6.1.5. Tanque de almacenamiento**

Para este proyecto se requirió instalar al colector solar un tanque de almacenamiento para poder recircular el agua y medir así la capacidad que tiene para calentarla con dicho aparato, para ello se buscó que el tanque tuviera una capacidad de la cual fuera adecuada en el uso de una vivienda típica promedio en México, por lo cual con estudios previos se obtuvo que para darle servicio a una vivienda habitada por 3 personas se requiere un promedio de 100 litros de agua caliente, así que se buscaron opciones y teniendo como resultado de esta búsqueda que la mejor opción era una tambo de plástico con capacidad de 120 litros el cual se adaptó perfecto a la situación.



**Figura 18.** Imagen del tanque de almacenamiento. Fuente: propia.

#### **6.1.6. Termo-tanque**

Se tenía previsto que al funcionar el sistema de calentamiento de agua por medio del colector solar y almacenarla en el tanque, éste se requería proteger térmicamente para retener la mayor cantidad de energía calorífica, por ello se buscó lo que se conoce como termo-tanque, para solucionar el problema. La solución fue colocar el tanque de 120 L. Dentro de otro tambor de plástico de mayor capacidad (200 L.) el cual comenzaría a funcionar como aislante térmico.



**Figura 19.** Imagen de termo-tanque (lado derecho) y tanque (izquierdo). Fuente: propia.

### 6.1.7. Sistema de bombeo

Para hacer recircular el agua en el colector solar, fue necesario instalar una bomba que ayudaría a hacer fluir el agua por todo el sistema constantemente, mejor opción fue colocar una bomba sumergible para fuente de 45 W de potencia, con un flujo máximo de 20.5 L/min y una frecuencia de 60 Hz.



**Figura 20.** Imagen de la bomba sumergible. Fuente: propia.

### 6.1.8. Conexiones

Finalmente para realizar las conexiones entre el termo-tanque y el colector solar se decidió utilizar manguera para agua de ½ pulgada de diámetro, ya que la manguera tiene la facilidad de ser flexible, económica y de fácil instalación.

## 6.2. Materiales utilizados para la construcción del concentrador solar en V y el concentrador solar plano y sus especificaciones

De los materiales que se requirieron para la construcción del colector solar en V fueron los siguientes:

- 24.5 m. De tubo soldable de cobre de ½ in de diámetro
- 1 bote de gas butano con boquilla
- Pasta para soldar
- Soldadura de estaño 50/50
- 1 m. de lija
- 2 coples cree de cobre de ½ in

- 2 reductor campana galvanizado de  $\frac{3}{4}$  a  $\frac{1}{2}$  in
- 2 conexiones para agua
- 2 gusanos galvanizado de  $\frac{3}{4}$  in de diámetro
- 4 abrazaderas sin fin de  $\frac{1}{2}$  in
- 1 cinta teflón
- 10 m. De manguera
- $\frac{1}{2}$  L. de pintura de esmalte color negro mate
- 1 vidrio tratado térmicamente (templado) de 122.5cm x 85.5cm x 0.6cm
- Silicón especial para altas temperaturas
- 1 tambo de plástico de 120 L. De capacidad
- 1 tambo de plástico de 200 L. De capacidad
- 1 bomba sumergible con potencia: 45w, frecuencia: 60Hz y flujo máximo de 20.5 l/min
- 1 marco de lamina galvanizada cal. 22 de 129cm x 90cm x 5cm de espesor, como se especificará más adelante.
- 1 lamina de acero inoxidable con acabado superficial tipo espejo cal. 26 de 122.5cm x 85.5cm con dobleces específicos como se especificará más adelante.

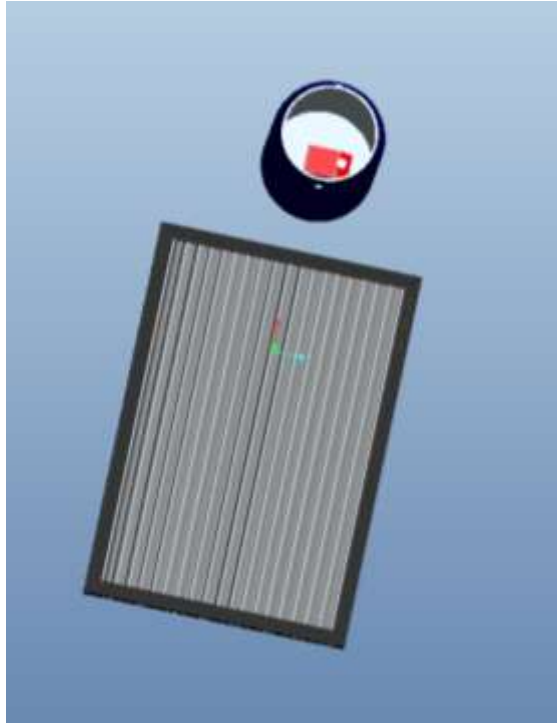
Para la construcción del colector solar plano se requiere el mismo material antes citado excluyendo la lámina de acero inoxidable con acabado superficial tipo espejo, que será sustituida por una lámina de lata de 122.5cm x 85.5cm.

### **6.3 Secuencia de producción**

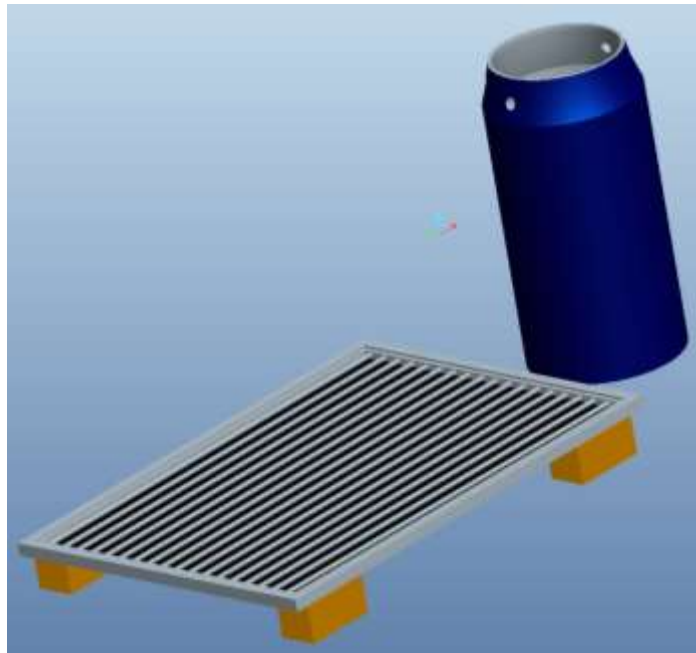
Como primer paso se cortan los tubos de cobre a las siguientes medidas requeridas: 19 pza. a 122cm de longitud, 18 pza. a 3cm y 2 pza. a 20cm de longitud y se arma uniéndolos con los codos para formar un radiador como se describió anteriormente.

Posteriormente, se dobló la lámina que funciona como concentrador a las dimensiones requeridas, se perforó el marco de lámina galvanizada que previamente se cortó y doblo para su creación para dar paso a los tubos de entrada y salida del dispositivo, se colocó la lámina de acero inoxidable dentro del marco del colector en V, usando la lámina de lata pintada con pintura de esmalte color negro mate para el caso del colector plano y sobre de estas se coloca los radiadores de tubos de cobre previamente ensamblado, soldados y pintado con pintura de esmalte negro mate para cada uno de los colectores respectivamente, en la parte superior se coloca el vidrio templando aplicando el silicón especial para altas temperaturas para su mejor aislamiento térmico.

A continuación, se procedió a realizar las respectivas conexiones de entrada y salida de agua de los dispositivos, haciendo las conexiones pertinentes y uniendo con una manguera el ducto entrada del sistema a una bomba sumergible que se colocó dentro de una tambo de plástico de 120 litros de capacidad que éste al mismo tiempo estaba dentro de uno de mayor capacidad (200 L.) que ambos tambos estaban sellados herméticamente con sus respectivas tapas. Mientras tanto el ducto de salida del colector estaba conectado por medio de otra manguera hacia el mismo recipiente de entrada, haciendo con esto un sistema de circulación de flujo constante.



**Figura 21.** Imagen del colector solar en V terminado y en operación. Fuente: propia.



**Figura 22.** Imagen del colector solar plano terminado y en funcionamiento. Fuente: propia.

Finalmente en la figura 23 se muestra una imagen de algunos detalles del prototipo construido en versión final del concentrador solar en V, así mismo se muestra en la figura 24 el concentrador solar plano.



**Figura 23.** Vista del sistema de concentración solar en V construido.



**Figura 24.** Vista del sistema de concentración solar plano construido.

#### **6.4 Medición del incremento de temperatura en el agua con recirculación y flujo constante**

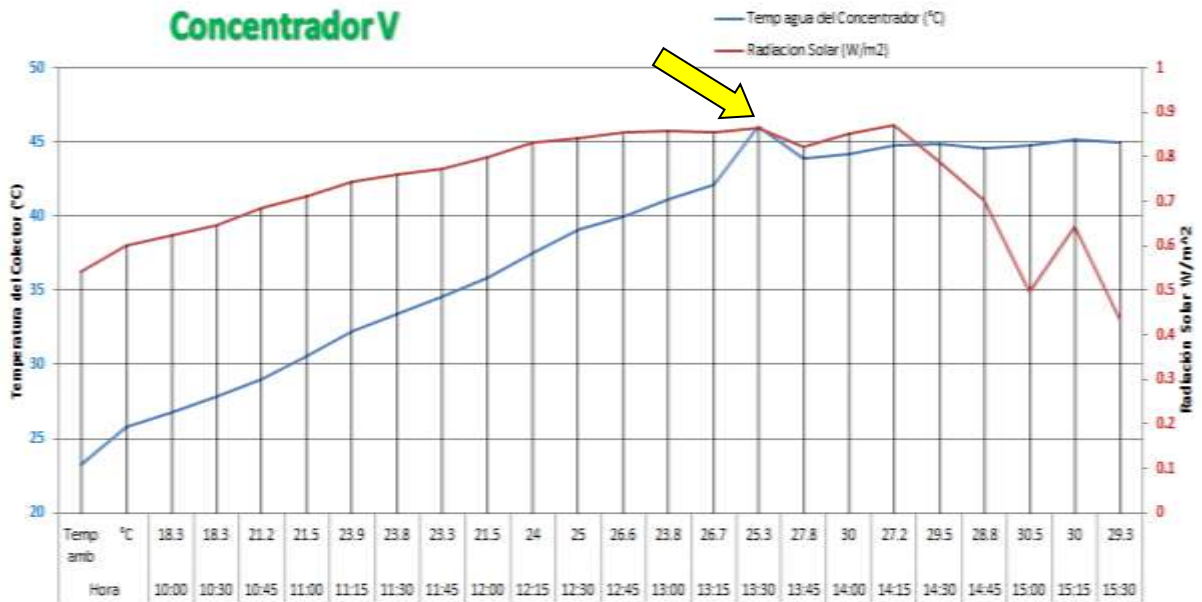
Una vez habiendo situado todo el sistema de calentador solar en el área indicada e instalados los aparatos de medición, se comenzó a realizar las pruebas, con el objetivo de determinar el incremento de temperatura en un volumen establecido de agua (100 litros), utilizando la recirculación de la misma por la tubería del calentador solar a un flujo constante de 5 l/min.

Colocando los colectores solares recostados horizontalmente a una altura de 30 centímetros del piso, primero se llenaron los tanques con 100 litros de agua de la red de agua potable midiendo su temperatura (temperatura inicial), y se conectaron las bombas para comenzar a bombear el agua por todo el sistema, en ese instante se tomó la hora del día, la radiación solar y el ángulo del sol con respecto a la línea perpendicular del calentador solar (línea vertical) y se fueron tomando los datos antes mencionados cada 15 minutos, además de tomar la temperatura que entraba y la que salía del termo-tanque.

Estas pruebas se hicieron a lo largo de una semana en el mes de abril, el clima en su mayoría estuvo nublado, por las mañanas un poco despejado y por las tardes lluvia, el tiempo de concentración fue de 7 horas, para ser más específicos, desde las 10:00 horas a 17:00 horas en su mayoría, cuando las precipitaciones pluviales no detenían las pruebas, sin embargo con los resultados obtenidos es posible tener alguna conclusión.

El primer día de pruebas se hicieron solamente al concentrador solar en V teniendo como resultados los datos mostrados en la figura 25

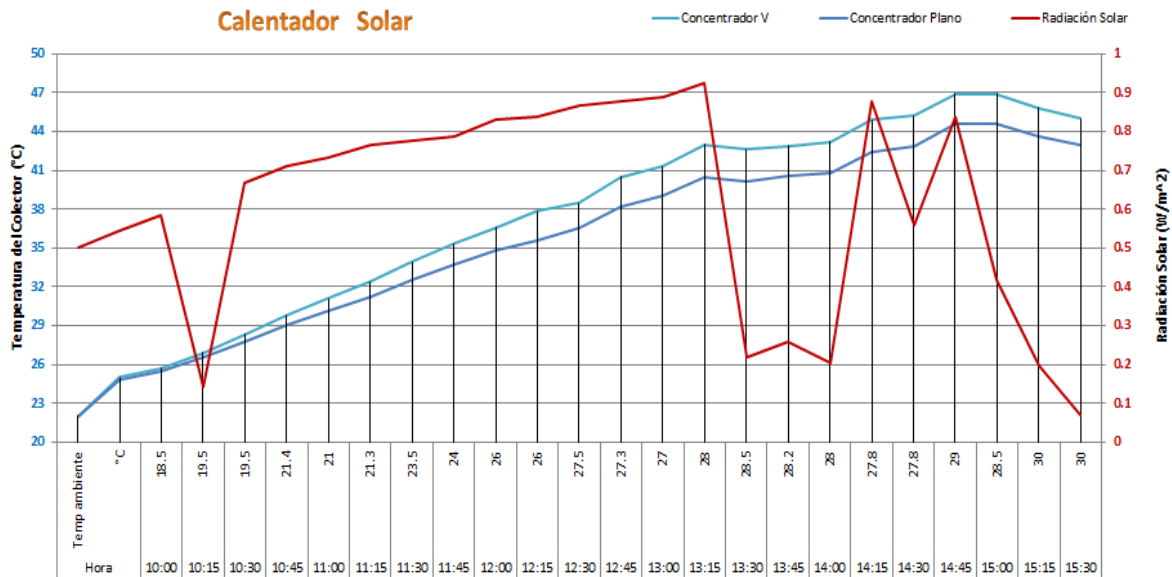




**Figura 25.** Datos y gráfica de los resultados obtenidos el primer día en el colector solar en V

Como se observan en los datos obtenidos el primer día de pruebas sobre el colector solar en V y cómo se señala en la gráfica, la mayor temperatura alcanzada del agua al pasar por el colector solar y depositarse al tanque, fue de 46°C a las 14:00 con una radiación de 0.866 W/m<sup>2</sup> y una temperatura ambiental de 30°C después de este pico, decrece la temperatura y posteriormente sigue incrementándose gradualmente hasta llegar al final del día con una temperatura de 45°C. Recordar la temperatura inicial del agua es la obtenida de la toma de la red (23.2°C).

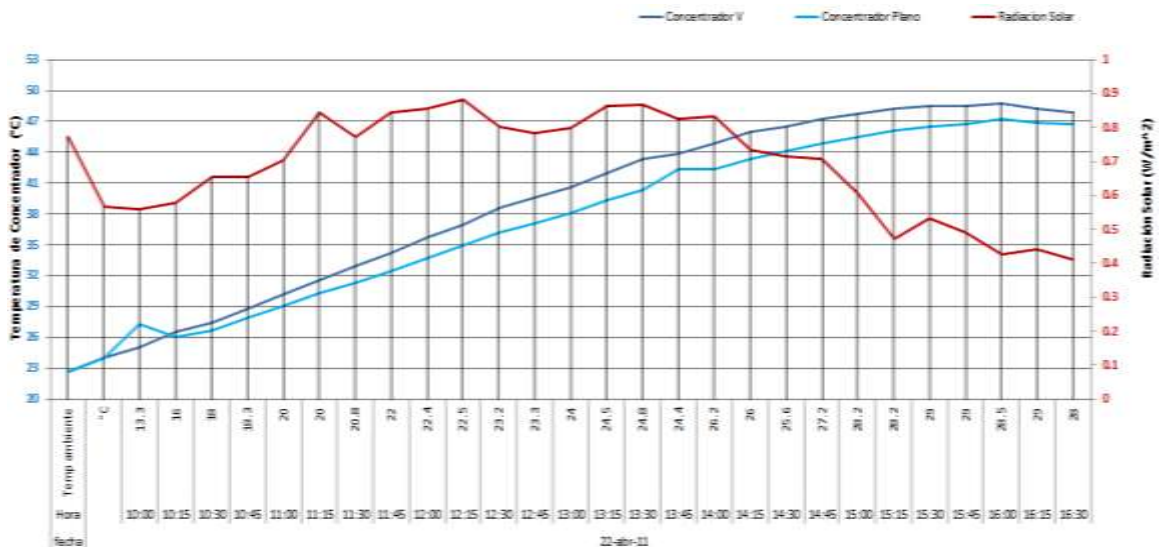
La figura 26 muestra un comportamiento de los dos dispositivos probados, así como la radiación solar de ese día.



**Figura 26.** Datos y gráfica de los resultados obtenidos el segundo día de pruebas en el colector solar en V y el colector solar Plano.

Como se observa, en esta recolección de datos comparando el Colector Solar en V (CSV) y el Colector Solar Plano (CSP), ambos alcanzaron su máxima temperatura a las 15:30 horas pero con una diferencia de 2.3°C de diferencia entre el CSV sobre el CSP, después de esa hora, la temperatura comienza a descender.

Para el tercer día se retoman las pruebas las mismas pruebas obteniendo resultados muy similares, como se muestra en la figura 27.



**Figura 27.** Datos y gráfica de los resultados obtenidos el tercer día de pruebas en el colector solar en V y el colector solar Plano.

En los datos mostrados anteriormente, se puede observar que la máxima temperatura que alcanzó el colector solar en V siguió siendo superior al colector solar Plano, en este caso por una diferencia de  $1.5^{\circ}\text{C}$  el cual sigue demostrando que el diseño del concentrador solar en V sigue siendo más eficiente que el colector Plano.

A pesar de ser más eficiente, el concentrador solar en V sabemos que se puede mejorar, es por eso que se propuso hacer una mejora al sistema agregándole dos secciones las cuáles con un estudio previo se realizó el diseño. Teniendo como resultado que la manera más es colocando las dos extensiones a los costados del colector solar inclinando dichas extensiones abiertas a un ángulo interno de  $60^{\circ}$  o que es lo mismo a un semiángulo de  $30^{\circ}$  con respecto a la vertical como lo se ilustra en la figura 28 y 29.

#### **6.4.1. Mejora del prototipo**

Como se había mencionado anteriormente, después de haber diseñado y construido un colector solar y de haberle hecho sus respectivas pruebas, el siguiente objetivo es hacerle una mejora a este primer diseño para incrementar su eficiencia. Para ello, se analizaron diferentes formas de mejorar pero sin perder los objetivos centrales del proyecto, y uno de ellos es que sea económicamente viable para hacerlo realmente rentable y poderlo aplicar a comunidades de escasos recursos.

##### **6.4.1.1. Estudio y diseño**

Para realizar la mejora en el sistema se hizo un estudio previo al diseño a elegir, el cual se optó por agregarle dos secciones al colector solar en V para poder incrementar su área de captación y así tener mayor cantidad de radiación solar. Para ello se hizo un estudio de trazado de rayos para conocer de que longitud deberían ser las secciones a agregar y en qué posición se deberían colocar.

#### **6.4.1.2. Síntesis de los materiales a elegir y su diseño**

Como se mencionó anteriormente, el principal material para la construcción de este prototipo de colector solar es de acero debido a su resistencia y practicidad de manejo, por ellos se aprovechó el mismo material de cual se elaboró el concentrador primario que consistió en una lámina de acero inoxidable con acabado espejo, del mismo modo se elaboró un marco metálico para mantener el concentrador en una cierta posición y de manera rígida.

#### **6.4.1.3. Materiales utilizados para la construcción de la mejora al colector solar en V**

El material que se requirió para realizar dicha mejora al colector solar en V fueron los siguientes:

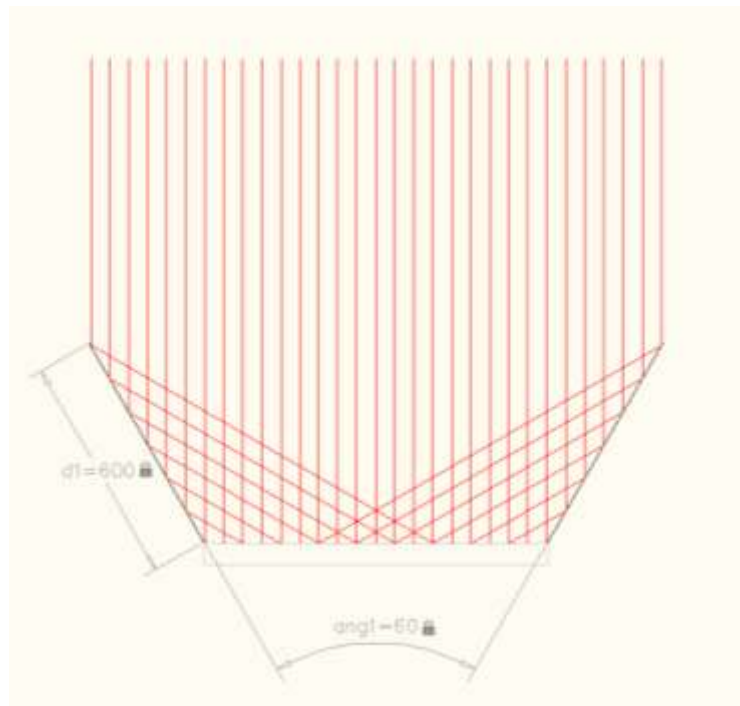
- 2 láminas de acero inoxidable con acabado tipo espejo calibre 26 de 120cm X 60cm lisa.
- 2 marcos de tubo cuadrado de R100 c-20. De 120cm X 60cm
- 6 bisagras negras de 2 ½
- Remaches pop
- Pintura.

#### **6.4.1.4. Secuencia de producción**

Teniendo el material necesario para hacer la mejora, es decir, la lámina de acero inoxidable cortada a las dimensiones requeridas y haber construido dos marcos de las mismas dimensiones que la lámina, se procedió a unir dichas piezas, colocando la lámina sobre su respectivo marco unidas por remaches. Posteriormente se prosiguió a colocarle las bisagras a los marcos para después unir los marcos a cada extremo del colector solar haciendo estas plegables para poder transportar más fácilmente el colector.



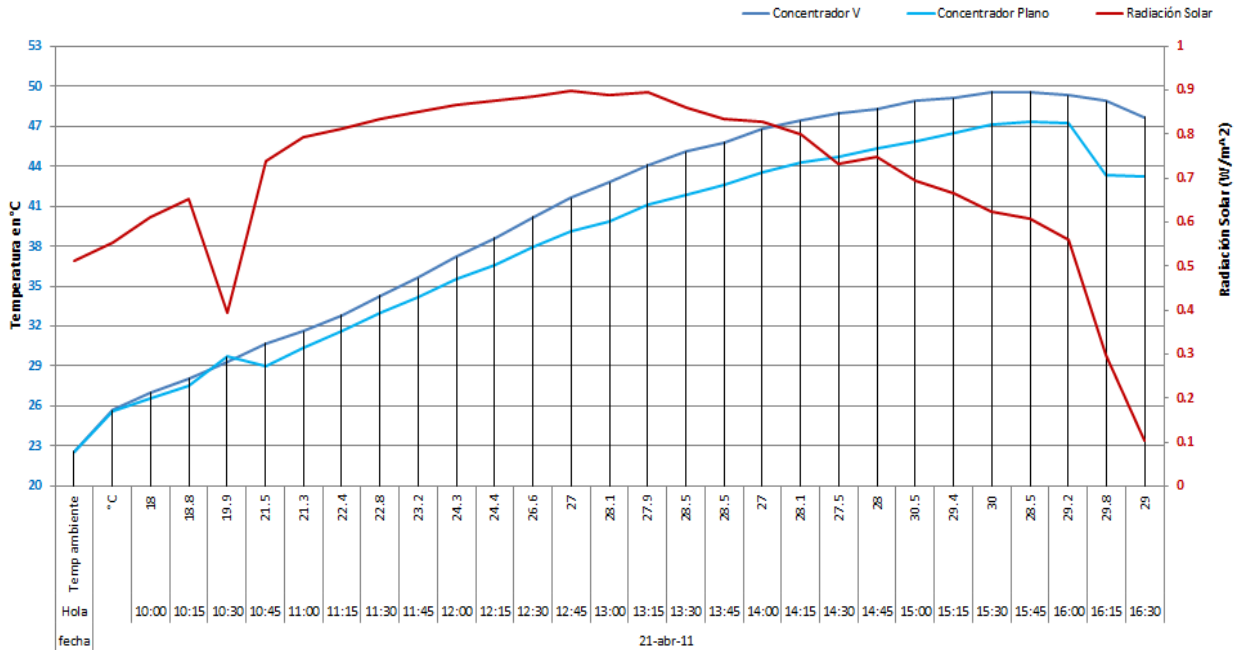
**Figura 28.** Imagen del colector solar en V mejorado. Fuente propia



**Figura 29.** Resultados del trazado de rayos para el diseño de la mejora del colector solar en V

#### **6.4.1.5. Medición del incremento de temperatura en el agua con recirculación y flujo constante con mejora**

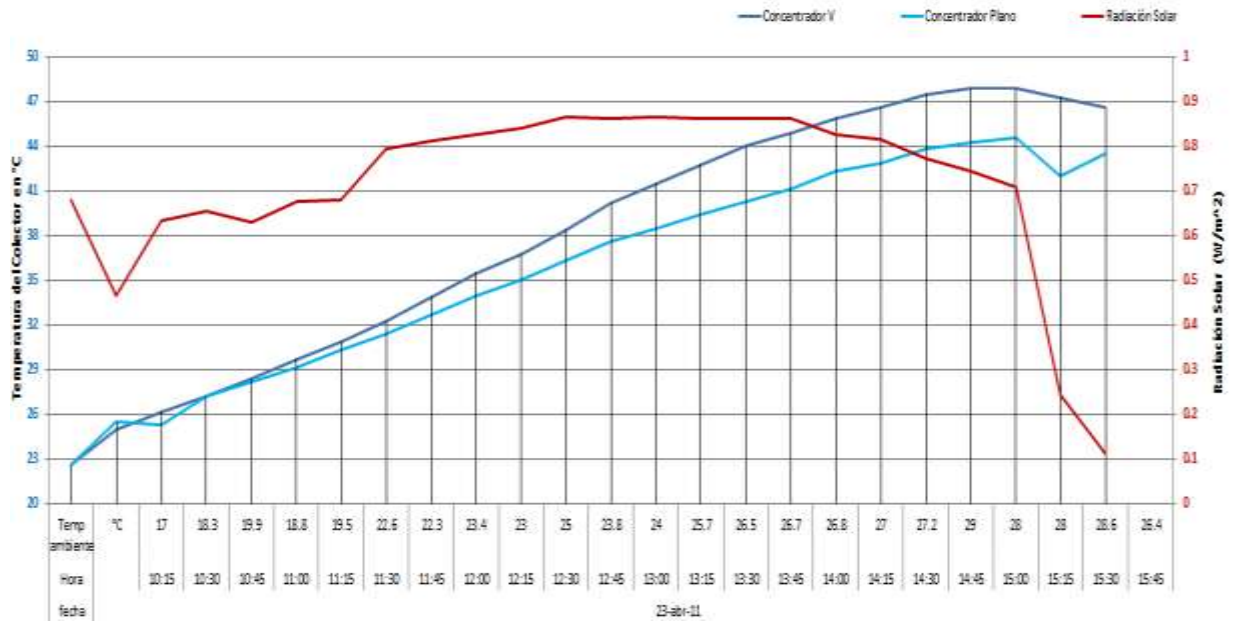
Agregados estas extensiones al concentrador solar, se procedió a realizar pruebas al sistema para ver si realmente se obtuvo algún beneficio en el calentamiento del agua. La figura 30 muestra los resultados.



**Figura 30.** Datos y gráfica de los resultados obtenidos al cuarto día de pruebas en el colector solar en V (con mejora) y el colector solar Plano.

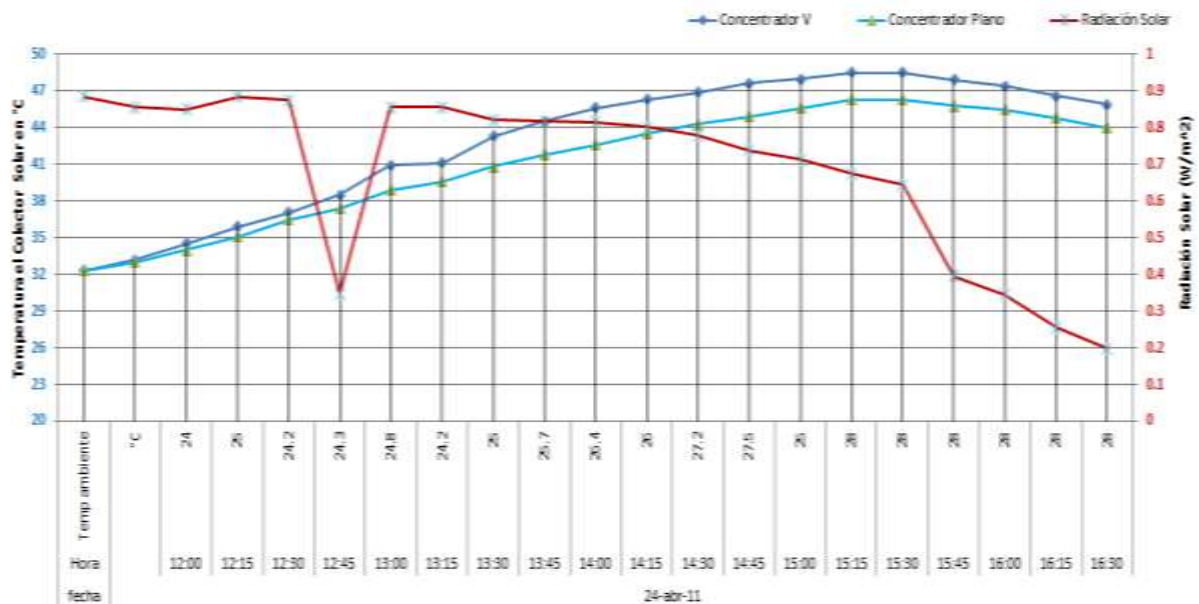
Como se observa, en el cuarto día se logra obtener una temperatura máxima de 49.6°C en el colector solar en V con la mejora aplicada y 47.3 para el colector solar Plano, lo cual muestra que la mejora aplicada al sistema funciona adecuadamente, ya que como se observa en la gráfica, en las horas en que el sol se encuentra en zenit, es decir: que el sol se encuentra formando un ángulo de 90° con respecto a la horizontal de la tierra, en este momento es cuando la temperatura del agua comienza a incrementarse en mayor velocidad a diferencia del colector Plano.

Sin embargo una sola prueba no es suficiente, por lo que se siguieron tomando pruebas en los posteriores días teniendo como resultado lo mostrado en la figura 31.



**Figura 31.** Datos y gráfica de los resultados obtenidos al quinto día de pruebas en el colector solar en V (con mejora) y el colector solar Plano.

Como se observa en los datos graficados anteriormente el colector solar en V tuvo un rendimiento de 3.3°C por arriba del colector Plano, lo cual sigue indicando que la mejora aplicada al diseño de prueba trabaja adecuadamente.



**Figura 32.** Datos y gráfica de los resultados obtenidos al sexto día de pruebas en el colector solar en V (con mejora) y el colector solar Plano.

Finalmente se muestran en los datos y la gráfica anterior, los resultados obtenidos el último día de prueba realizadas a ambos concentradores solares, mostrando que el desempeño del colector solar en V con la mejora designada es superior al colector solar Plano.