



# Universidad de Cuenca

Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Ambiental

**Proyecto de investigación previo a la obtención del título de  
Ingeniero Ambiental**

**Título:** “Diseño, construcción y comparación de la  
eficiencia de dos colectores solares  
térmicos de baja temperatura en la ciudad  
de Cuenca”

**Autor:** Santiago José González Pozo

**Tutora:** Ing. Paulina Rebeca Espinoza Hernández

Cuenca-Ecuador

2017,



## **RESUMEN**

El presente estudio plantea el cálculo, la construcción y la comparación de la eficiencia de dos colectores solares térmicos de baja temperatura. El primero es un diseño muy simple, de fácil construcción, económico, ecológico y que usa materiales reciclados. El segundo, es un colector solar térmico (CST) de placas planas, con un diseño más sofisticado y que utiliza materiales de primera calidad para aumentar la eficiencia al máximo. Para determinar y comparar la eficiencia de los dos colectores, a estos se los puso a prueba en Cuenca, Ecuador, al mismo tiempo y en iguales condiciones. En cada colector solar, se comparó la temperatura del agua, antes y después de ser calentada, con los niveles de radiación solar en el momento en que estaban en funcionamiento, y de esta forma, obtener una gráfica que compare estas variables ( $\Delta T$  y RS) para así obtener un índice de correlación entre ambas. Esta relación permite determinar la eficiencia de los colectores, comparando la energía incidente con la energía transformada y cedida en forma de calor al agua. El modelo ecológico obtuvo una eficiencia de 46% y el segundo de 62%.

El presente trabajo también presenta un pequeño análisis económico. Utilizando una base de datos con los niveles de radiación solar promedio en Cuenca, se estimó la energía ahorrada mensualmente gracias a los colectores y cuanto representa esto en costos. Se calculó el ahorro energético y económico mes a mes por acción de los colectores solares térmicos y el periodo de retorno de la inversión realizada en cada uno de los colectores solares (5,3 meses el CST de botellas y 17,1 meses el CST de placas planas). Con toda la información recolectada se pudo determinar las ventajas y desventajas, fortalezas y debilidades de cada diseño y sacar conclusiones sobre sus posibles usos y aplicaciones.

### **PALABRAS CLAVE:**

- RS: Radiación Solar
- CST: Colector Solar Térmico
- $\Delta T$ : Variación de temperatura (Temperatura final del agua menos la Temperatura inicial)
- ACS: Agua Caliente Sanitaria
- Ei: Energía solar incidente



## **ABSTRACT**

The following project involves the design, construction and comparison of the efficiency between two low temperature solar thermal collectors. The first is a very simple and economic design, easy to construct, and it uses recycled materials. The second will be a flat plate collector with a more sophisticated design, and it will use high quality materials to increase efficiency to the maximum. To determine and compare the efficiency of the two collectors, those were tested in Cuenca, Ecuador, at the same time and under the same conditions. In each solar thermal collector, the water temperature was measured, before and after being heated, and compared with the solar radiation levels at the time they were in operation. With all the data collected, it was generated a graphic comparing these variables ( $\Delta T$  and Solar radiation) and obtain a correlation index between the two of them. Using this data we can determine the efficiency of the collectors, comparing the incident solar energy with the energy given to the water in the form of heat. The first design got an efficiency of 46% and the second one has an efficiency of 62%.

This work also made a small economic analysis, estimating the energy and economical savings every month and the payback time of the investment on each solar thermal collector by using a database of average levels of solar radiation in Cuenca. With all the information collected we could determine the advantages and disadvantages, strengths and weaknesses of each design.

### **KEY WORDS:**

- Solar Radiation
- Solar Thermal Collector
- Temperature Variation
- Sanitary Hot Water
- Incident Solar Energy



## ÍNDICE

RESUMEN .....	2
ABSTRACT .....	3
INTRODUCCIÓN .....	9
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO .....	12
1.1 Fuentes de energía .....	12
1.1.1 Energías no renovables .....	12
1.1.2 Energías Renovables.....	12
1.2 Radiación e irradiancia solar .....	13
1.3 Colector solar térmico de baja temperatura.....	13
1.3.1 Superficie de captación .....	14
1.3.2 Cubierta de vidrio o plástico .....	14
1.3.3 Aislamiento térmico .....	14
1.4 Transferencia de calor.....	14
1.4.1 Conducción.....	14
1.4.2 Convección .....	15
1.4.3 Radiación .....	15
1.4.4 Ley de Fourier.....	16
1.5 Coeficiente de correlación de Pearson (r) y el coeficiente de determinación r cuadrado ( $R^2$ ).....	16
1.6 Calor Específico (c) .....	17
1.7 Termosifón Solar Simple .....	17
CAPÍTULO 2: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS COLECTORES SOLARES TÉRMICOS .....	19
2.1 Colector solar térmico de botellas .....	19
2.1.1 Superficie de captación .....	20
2.1.2 Cubierta de plástico.....	21
2.1.3 Estructura de pallets .....	22
2.2 Colector de Placas Planas .....	23
2.2.1 Superficie de captación .....	24
2.2.2 Aislamiento térmico .....	24
2.2.3 Cubierta plástica.....	25
CAPÍTULO 3: EFICIENCIA DE LOS COLECTORES SOLARES TÉRMICOS .....	27



3.1 Metodología .....	27
3.1.1 Recolección de datos y gráfica de RS vs $\Delta T$ .....	27
3.1.2 Cálculo de la eficiencia .....	29
3.2 RESULTADOS EFICIENCIA.....	30
3.2.1 Radiación Solar vs variación de temperatura del agua o $\Delta T$ .....	30
3.2.2 Eficiencia de los CST .....	32
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS ECONÓMICO .....	38
4.2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS ECONÓMICO .....	39
DISCUSIÓN.....	41
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	42
Referencias.....	44
ANEXOS .....	46
Base de datos: .....	46
Materiales y presupuesto de los CST .....	48
Radiación solar media de la ciudad de Cuenca .....	49
Datos de temperatura del agua .....	49
Emisiones evitadas de ser emanadas a la atmósfera.....	54

### Índice de Gráficas

Gráfica 1: $\Delta T$ vs RS en el CST de botellas .....	31
Gráfica 2: $\Delta T$ vs RS en el CST de placas planas.....	31
Gráfica 3: $\Delta T$ vs RS en los dos CST .....	32
Gráfica 4: Eficiencia vs RS.....	33
Gráfica 5: Eficiencia promedio.....	36
Gráfica 6: Comparación de eficiencia entre los CST .....	36
Gráfica 7: Energía por mes de cada CST .....	39
Gráfica 8: Costo de los CST      Gráfica 9: Periodo de retorno de la inversión.....	40
Gráfica 11 Emisiones de CO <sub>2</sub> no emanadas a la atmósfera. ....	54

### Índice de tablas

Tabla 1: Conductividad térmica de materiales Fuente: (Cárdenas, 2010).....	15
Tabla 2: Resultados de eficiencia .....	33
Tabla 3: Base de datos de las pruebas con los CST .....	46
Tabla 4: Materiales y presupuesto CST Botellas .....	48
Tabla 5: Materiales y presupuesto del CST de placas planas .....	48



Tabla 6: Radiación solar promedio en Cuenca, Ecuador. Fuente: Instituto de Ingeniería Solar, Universidad de Massachusetts.....	49
Tabla 7: Base de datos con la variación de la temperatura del agua.....	50

## Índice de ecuaciones

Ecuación 1: Energía solar incidente .....	29
Ecuación 2: Energía aprovechada por el CST .....	29
Ecuación 3: Eficiencia del CST .....	30
Ecuación 4: Eficiencia Promedio.....	30
Ecuación 5: Ahorro por mes .....	38
Ecuación 6: Periodo de retorno de la inversión .....	38

## Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Funcionamiento de un sistema termosifón solar.....	18
Ilustración 2: Colector solar térmico de botellas. Fuente: propia.....	20
Ilustración 3: CST de botellas, superficie de captación. Fuente: propia.....	21
Ilustración 4: Fabricación de la cubierta de plástico. Fuente: propia .....	21
Ilustración 5: Botellas PET. Fuente: propia .....	22
Ilustración 6: Pallets antes de construir la estructura. Fuente: propia .....	22
Ilustración 7: Estructura de pallets finalizada. Fuente: propia.....	23
Ilustración 8: Colector solar térmico de placas planas terminado. Fuente: propia .....	23
Ilustración 9: Superficie de captación del CST de placas planas .....	24
Ilustración 10: Aislamiento térmico del CST de placas planas .....	25
Ilustración 11: Vista lateral del aislamiento térmico del CST de placas planas.....	25
Ilustración 12: Cubierta de policarbonato siendo colocado en el CST de placas planas .....	26
Ilustración 13: CST junto a la estación meteorológica. ....	28



Universidad de Cuenca  
Clausula de propiedad intelectual

---

*Santiago José González Pozo*, autor/a de la tesis "Diseño, construcción y comparación de la eficiencia de dos colectores solares térmicos de baja temperatura en la ciudad de Cuenca", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 16 de enero de 2017

---

*Santiago José González Pozo*

C.I: 0104503446



Universidad de Cuenca  
Clausula de derechos de autor

---

*Santiago José González Pozo* autor/a de la tesis "Diseño, construcción y comparación de la eficiencia de dos colectores solares térmicos de baja temperatura en la ciudad de Cuenca", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Ambiental. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor/a

Cuenca, 16 de enero de 2017

*Santiago José González Pozo*

C.I: 0104503446





## **INTRODUCCIÓN**

Producir agua caliente requiere de una gran cantidad de energía. El consumo promedio se estima en los 40 litros por persona por día, ya sea para lavar ropa o platos, higiene personal, entre otros usos. En los países en vías de desarrollo la producción de agua caliente sanitaria (ACS) constituye del 30-40% del consumo total de energía (Dieter, 2005). Hoy en día gran parte el calentamiento de agua se lo realiza utilizando fuentes de energía fósiles, directa o indirectamente, las cuales son fuentes contaminantes y no renovables. La energía solar térmica se ha convertido en una alternativa ecológica y económicamente viable para el calentamiento de agua.

La investigación en energía solar térmica es fundamental para el avance y el desarrollo de la misma. Esta fuente de energía tiene un enorme potencial debido a su abundancia, a su disposición en cualquier parte del planeta y a que es una fuente de energía inagotable. Generar energía desde los hogares sería un gran salto hacia una revolución energética y hacia el desarrollo sustentable.

Mediante el uso de colectores solares térmicos (CST) es posible aprovechar la radiación solar (RS) para producir ACS. Existen varios diseños y modelos de CST que varían en su forma, tamaño y tipo de tecnología, pero todos ellos funcionan bajo el mismo concepto, atrapar la mayor cantidad de energía solar térmica para transferirla al agua. Encontrar un diseño eficiente, ecológico y económicamente viable constituiría un gran paso para el uso de esta tecnología a gran escala.

En el presente proyecto se construyeron dos diferentes clases de colectores solares térmicos con características distintas cada uno. Se elaboró un diseño muy ecológico, económico y simple, utilizando materiales reciclados como botellas plásticas y pallets. El segundo diseño es basado en un CST de placas planas, que son una tecnología más sofisticada, pero a la vez relativamente simples y posibles de realizarlos uno mismo en casa o en un taller artesanal.

Una vez contruidos y funcionales los CST, se procedió a hacer una comparación entre los dos para saber las ventajas y desventajas de cada modelo. Los parámetros principales a tomar en cuenta fueron su eficiencia y su costo beneficio.

Para determinar su eficiencia a éstos se los sometió a pruebas reales en Cuenca, Ecuador, una ciudad de temperatura templada, a una altura de 2500 msnm y latitud de -3. Ambos CST fueron probados al mismo tiempo y en el mismo lugar, así asegurándonos que se encuentren en las mismas condiciones de RS, temperatura, humedad, etc. A cada CST se le asignó un tanque con 23 lts de

Santiago González Pozo



agua para calentar, cantidad aproximada de agua que se necesita para tomar un baño de 5 minutos (Fuente: experimentación propia). El periodo de tiempo de prueba fue de 15 minutos, ya que mediante pruebas de ensayo y error, se determinó como un lapso de tiempo apropiado para obtener una variación de temperatura representativa y óptima. Se tomó la temperatura del agua antes de iniciar las pruebas y otra vez al finalizar los 15 minutos establecidos. Se restó la temperatura final menos la inicial para encontrar la variación de temperatura ( $\Delta T$ ). Un mayor  $\Delta T$  significa que logró calentar más el agua y que obtuvo una mayor eficacia. Para determinar el nivel de eficiencia exacto, se tomaron los datos de RS de una estación meteorológica ubicada junto a los CST. Con estos datos se pudo calcular la energía solar incidente ( $E_i$ ) y comparar con la energía necesaria para calentar los 23 lts de agua en el determinado  $\Delta T$ .

Como ya se mencionó anteriormente, el aspecto económico también es importante si se quiere aplicar esta tecnología a gran escala. Al crear y diseñar los CST, se realizó un presupuesto para determinar el precio exacto que se necesitó para construirlos. Después, utilizando los datos previamente obtenidos sobre su eficiencia y una base de datos de la RS promedio en Cuenca, se procedió a realizar una predicción de la energía generada mes a mes por los CST. Se tomó este ahorro energético y se lo transformó a términos de dinero multiplicando por el costo del KWh de energía, obteniendo así una cifra estimada sobre cuánto dinero se ahorra por mes con el uso de estos CST. Con estos datos (costo de la inversión y ahorro por mes) se pudo calcular el tiempo en que se recupera la inversión en su construcción.

Los resultados obtenidos se usarán para poder determinar las ventajas y desventajas de cada diseño de CST. El diseño del CST de placas planas obtuvo mejores valores de eficiencia debido a la mayor calidad de sus materiales y de su fabricación; por otro lado el CST de botellas fue mucho más económico de construir por lo que esto le proporciona una ventaja en el plano económico. Se podrá determinar si la energía solar térmica de baja temperatura es una opción viable y sustentable en la ciudad de Cuenca y se podrá hacer un análisis para saber qué tipo de colector es el más óptimo para su aplicación en las viviendas.

Con la metodología diseñada y la base de datos generada, se podrá seguir realizando comparaciones con otros diseños de CST a futuro y continuar con la investigación en este tema. Futuras investigaciones podrían centrarse en comparar diseños comerciales con los diseños artesanales que han sido creados en este proyecto, e igualmente tomar en cuenta los factores de la eficiencia como de su viabilidad económica. También podrían compararse con diseños totalmente nuevos o con modelos utilicen otro tipo de tecnología. Espero que el presente trabajo solo sea el inicio de algo mucho más grande y motive a otras



personas a seguir investigando en este tema y a contribuir con el desarrollo de la energía solar.



## **CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO**

### **1.1 Fuentes de energía**

Cuando hablamos de fuentes de energía a estas se las divide en dos grupos principales, los cuales detallaremos brevemente a continuación:

#### **1.1.1 Energías no renovables**

Son aquellas que se encuentran de manera limitada en la naturaleza, es decir que no se regeneran, y una vez que se consumen estas no pueden sustituirse.

La principal fuente de energía no renovable son los combustibles fósiles. Estos proceden de biomasa que ha pasado por un largo proceso de compactación y acumulación durante millones de años, es por esto que esta tiene un gran contenido energético. Los principales combustibles fósiles son el carbón, el petróleo y el gas natural. En la actualidad, gran parte de la energía que utilizamos proviene de los combustibles fósiles y se los utiliza en el sector de generación eléctrica, de transporte y por supuesto, también se los usa para producir agua caliente sanitaria, entre otros usos.

El problema con este tipo de energía es que existe de manera limitada en la naturaleza y además al utilizarlos producen grandes cantidades de CO<sub>2</sub>, entre otros contaminantes, los cuales cada vez alcanzan niveles más elevados sobre la atmósfera ocasionando graves problemas ambientales como por ejemplo el calentamiento global.

Es necesario encontrar soluciones y alternativas para estos problemas y el uso de fuentes de energías no contaminantes y renovables es la dirección hacia la que debemos caminar.

#### **1.1.2 Energías Renovables**

Las más importantes son:

**Energía Solar:** Como su nombre lo indica, es aquella que proviene de la radiación solar. Es el tipo de energía más abundante en el planeta, y está disponible en todo el mundo. Existe la energía solar térmica, que se la usa ya sea para producir agua caliente sanitaria, para la generación de electricidad o para la cocción de alimentos y la energía solar fotovoltaica que se utiliza para generar energía eléctrica.



**Energía Eólica:** Es aquella que se produce a partir de las corrientes de viento. Se utilizan aerogeneradores y turbinas de viento para su aprovechamiento.

**Biomasa:** Es la energía que proviene de la materia viva, como por ejemplo la madera o los residuos vegetales.

**Hidráulica:** Es la que aprovecha el movimiento del agua corriente. Se suelen construir represas en los ríos para almacenar agua y aprovechar de mejor manera este tipo de energía.

**Mareomotriz:** Es la que aprovecha las olas y las corrientes marinas para la generación de energía.

(Comisión Electrotécnica Internacinal, 2015)

## 1.2 Radiación e irradiancia solar

La radiación solar equivale a todo el espectro electromagnético emitido o irradiado por el sol, que va desde el espectro infrarrojo hasta el ultravioleta. No toda la radiación solar alcanza la superficie terrestre, parte de esta es reflejada o absorbida por la atmósfera.

La irradiancia mide la potencia por unidad de área de radiación solar que llega a la superficie de la Tierra, es decir, que tanta energía alcanza a la superficie. Las unidades más utilizadas para medir la irradiancia son los vatios por metro cuadrado ( $W/m^2$ ). (Lorente, 2013)

Es de suma importancia conocer la radiación solar incidente en el momento en que funcionen los colectores para determinar su eficiencia, ya que, de esta forma, podemos determinar la cantidad de energía que llega y comparar con la aprovechada por el colector.

## 1.3 Colector solar térmico de baja temperatura

Un colector solar, también llamado captador solar y panel solar térmico, es cualquier tipo de dispositivo que tenga como objetivo recoger la energía irradiada por el sol y convertirla en energía térmica (Sagahon, 2013). Cuando nos referimos a un captador de “baja temperatura”, esto quiere decir que trabaja con temperaturas no mayores a 100 grados centígrados. El propósito de este tipo de colectores casi siempre es para agua caliente sanitaria de las viviendas o para calefacción en piscinas.



Para comprender como funciona un panel solar térmico es necesario estudiar sus componentes, que en la mayoría de los casos, básicamente cuentan con una superficie de captación, una caja con aislamiento térmico y una cubierta de vidrio o plástico para generar el efecto invernadero. A continuación estudiaremos más a detalle cada uno de sus componentes:

### **1.3.1 Superficie de captación**

La superficie de captación tiene el objetivo de absorber la mayor cantidad de radiación solar, transformarla en energía térmica y transferirla al fluido de trabajo. Los materiales más utilizados para construir este componente son tuberías de PVC, tuberías de cobre y planchas metálicas. Toda el área de captación debe ser de color negro mate y estar expuesta directamente al sol para aprovechar al máximo la radiación solar incidente.

### **1.3.2 Cubierta de vidrio o plástico**

Usualmente se coloca una cubierta de vidrio o plástico por encima de la superficie de captación para así generar el efecto invernadero al interior del colector. Esto permite que la radiación solar ingrese libremente, pero no permite que la energía sea reirradiada de regreso, manteniendo así altas temperaturas al interior.

### **1.3.3 Aislamiento térmico**

La caja de aislamiento sirve para reducir las pérdidas de calor al mínimo. Estas rodean a la superficie de captación y están compuestas por materiales aislantes que no transfieren bien el calor, tales como espumas, poliestireno expandido o lana de vidrio.

## **1.4 Transferencia de calor**

La transferencia de calor busca alcanzar el equilibrio térmico transfiriendo energía en forma de un cuerpo a otro. La termodinámica nos indica que esta transferencia de energía se conoce como calor. Conocer las maneras en que se transmite el calor es muy importante cuando se construye un CST, ya que es la forma en la que el sol cederá energía al agua. (Holman, 1986)

Existen tres formas distintas en las que se trasfiere el calor:

### **1.4.1 Conducción**

Esta se da por contacto directo entre las partículas y el choque de unas moléculas con otras, en donde las partículas más cargadas entregan energía a las otras y así transfiriendo el calor a través de todo el objeto. Los mejores



materiales conductores de calor son los metales. Por el contrario los peores conductores de calor son los plásticos y materiales porosos.

Tabla 1: Conductividad térmica de materiales Fuente: (Cárdenas, 2010)

Material	Conductividad Térmica
<b>Conductores</b>	
Plata	406-418
Cobre	372-385
Aluminio	220-244
Bronce	116-186
Zinc	106-140
<b>Aislantes térmicos</b>	
Madera	0,21-0,4
Fibra de vidrio	0,03-0,07
Corcho	0,03-0,04
Poliestireno expandido	0,034-0,45

Esta forma de transferencia de calor es de suma importancia en la superficie de captación de los colectores solares ya que un material que mejor conduzca el calor, tendrá una mayor eficiencia. Por otro lado, se usan materiales de baja conducción en la caja de aislamiento térmico para evitar pérdidas de calor al exterior.

#### 1.4.2 Convección

Esta forma de transferencia de calor es exclusiva en los líquidos y en los gases. Transmite calor a través del movimiento de masa o circulación de una sustancia, es decir debido al movimiento del fluido.

La convección permite que la temperatura del agua que se va a calentar dentro del colector se transmita a toda la masa de agua uniformemente. Es por eso que toda el agua está a la misma temperatura al circular por el CST.

#### 1.4.3 Radiación

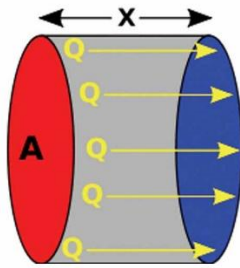
La radiación térmica es una forma de transferencia de calor que es emanada desde la fuente, en todas las direcciones, por medio de ondas electromagnéticas cargadas energéticamente que se propagan a través del vacío. Las ondas de radiación viajan a la velocidad de la luz y no necesitan de un medio físico para propagarse. (Domingo, 2011)

El sol emana enormes cantidades de radiación que llegan a la Tierra. Los captadores solares buscan captar la mayor cantidad de esta radiación solar para utilizar esta energía y calentar el agua.

#### 1.4.4 Ley de Fourier

Mediante la ley de Fourier podemos determinar el flujo o movimiento de calor en un cuerpo, del punto más caliente hasta el más frío utilizando la siguiente fórmula:

$$\frac{Q}{t} = k * A * (T_2 - T_1) / \Delta x$$



Donde:

- $Q/t$  es el flujo de calor
- $A$  es el área de transferencia
- $K$  es la constante de transferencia de calor del material
- $T_2 - T_1$  es la diferencia de temperatura
- $\Delta x$  es la distancia entre los dos puntos

#### 1.5 Coeficiente de correlación de Pearson (r) y el coeficiente de determinación r cuadrado ( $R^2$ )

La correlación lineal de Pearson nos puede mostrar si existe o no algún tipo de relación lineal entre dos variables aleatorias dándonos un parámetro de cuantificación que oscila entre -1 y 1. El signo nos indica la dirección de la correlación y el número nos indica la magnitud de la correlación. A continuación se resumen algunos criterios de interpretación de las cifras:

- -1,00 = Correlación negativa perfecta
- -0,90 = Correlación negativa muy fuerte
- -0,75 = Correlación negativa considerable
- -0,50 = Correlación negativa media
- -0,10 = Correlación negativa débil
- 0,00 = No existe correlación lineal alguna entre las variables
- 0,10 = Correlación positiva débil
- 0,50 = Correlación positiva media
- 0,75 = Correlación positiva considerable





- 0,90 = Correlación positiva muy fuerte
  - 1,00 = Correlación positiva perfecta
- (Vila, Sedano, & López, 2002)

Cuando elevamos el coeficiente de correlación de Pearson al cuadrado, el resultado nos proporciona un porcentaje de la variación de una variable debido al cambio de la otra. Es decir que  $R^2$  es la proporción de variación de la variable dependiente Y explicada por la variable independiente X. Este parámetro puede tomar valores entre 0 y 1. Mientras más cercano a 1 sea este valor significa que existe una correlación mayor entre ambas variables.

En nuestro caso de estudio en particular, utilizamos estas herramientas estadísticas para determinar que tanto la variación de la temperatura del agua está relacionada con los valores de radiación solar y mientras más cercano a 1 sea el valor de  $R^2$ , con mayor precisión se puede predecir el comportamiento de nuestros CST a distintos niveles de radiación solar.

## 1.6 Calor Específico (c)

Se denomina calor específico a la cantidad de calor o energía necesaria por unidad de masa para elevar la temperatura en una unidad. Por lo general el calor específico depende de la temperatura inicial del cuerpo. (Ayala Corona, 2015).

El calor específico del agua es de 4,186 Julios/gramo°C. Esto significa que son necesarios de 4,186 Julios, para aumentar en 1 grado centígrado 1 gramo de agua. El agua tiene uno de los calores específicos más altos comparando con cualquier tipo de sustancia común. Por ello, es necesario de una gran cantidad de energía o calor para poder aumentar en algunos grados una masa de agua.

## 1.7 Termosifón Solar Simple

El CST por termosifón es aquel que utiliza la diferencia de densidades del agua para circular el agua a través del tanque de almacenamiento y la superficie captadora.

El agua al ser calentada por el sol, se dilata a medida que va subiendo su temperatura, y por lo tanto su densidad también disminuye, haciendo que esta naturalmente suba. Por el contrario, el agua fría, que es más densa fluye hacia la parte baja del tanque de almacenamiento y del CST.

Este flujo constante permite a todo el sistema solar térmico funcionar sin necesidad de usar energía y haya circulación de agua a través del sistema.

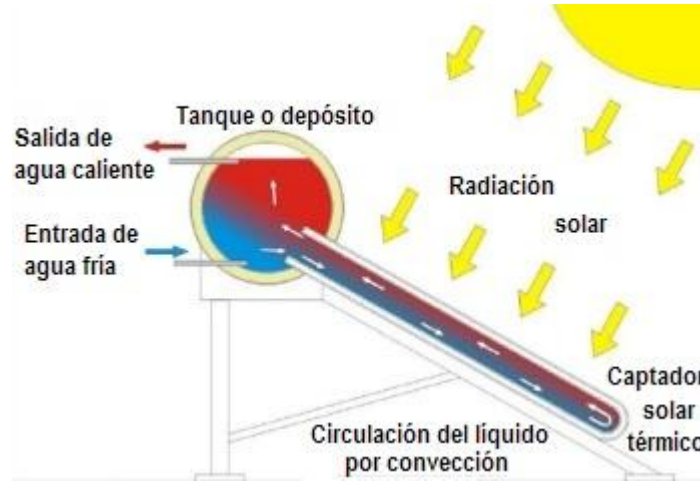


Ilustración 1: Funcionamiento de un sistema termosifón solar

Las ventajas de un sistema de termosifón simple principalmente son el ahorro de energía y que es relativamente más simple que otros sistemas ya que no requiere de métodos auxiliares ni de conexiones eléctricas. Entre sus desventajas están una mayor pérdida térmica debido a que el tanque de almacenamiento debe estar ubicado en el exterior de la vivienda.

Para fines investigativos si queremos determinar la eficiencia de un CST, el sistema de termosifón simple resulta ser no muy adecuado y presenta algunos inconvenientes. El primero es que para que pueda funcionar correctamente el termosifón, es necesario de un sistema presurizado, es decir que no existan pérdidas ni ganancias de presión en el tanque de almacenamiento o en las tuberías del colector, lo cual es difícil de lograr. Otro problema es la medición de la temperatura del agua, ya que sería necesario colocar un sensor interno de temperatura resistente al agua. Por último, en un sistema termosifón simple no se puede controlar el flujo de agua que circula a través de las tuberías del CST. Por estas razones, se ha decidido en el presente trabajo a no utilizar el sistema termosifón simple para determinar la eficiencia de los CST. La metodología se la describe a detalle en el capítulo 3.



## **CAPÍTULO 2: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS COLECTORES SOLARES TÉRMICOS**

En el presente trabajo se diseñaron y construyeron dos modelos distintos de CST con características distintas. El primero es un diseño ecológico, simple, que utilizó materiales reciclados para su construcción y se lo realizó a un muy bajo costo. El segundo tiene un mayor grado de sofisticación, utiliza materiales de alta calidad y tiene un costo de construcción más elevado.

Al momento de diseñar y construir los captadores solares se tomaron en cuenta varios factores, tales como:

- Disponibilidad de los materiales en el mercado local
- El costo de los materiales
- Herramientas necesarias para la construcción del diseño
- Resistencia, durabilidad y peso de los materiales
- Conductividad térmica de los materiales

### **2.1 Colector solar térmico de botellas**

Aunque el diseño en si es propio, la idea fue tomada del manual de construcción de José Alcino Alano para la construcción e instalación de un colector solar (Alcino, 2004). Este modelo trató de ser lo más ecológico, económico y lo más simple de construir para que sea accesible económicamente para cualquier familia o comunidad. La siguiente imagen muestra el CST de botellas ya construido, terminado y funcional.



Ilustración 2: Colector solar térmico de botellas. Fuente: propia.

En este diseño se utilizaron tubos de plástico, uniones en T, bridas y materiales reciclados como botellas PET y pallets.

Para explicar cómo se hizo el colector iremos describiendo cada uno de sus componentes:

### **2.1.1 Superficie de captación**

Como se muestra en la ilustración 3, la superficie de captación está compuesta por politubo de color negro, que es tubería de plástico para agua que soporta altas temperaturas. Se colocaron en paralelo 8 filas de politubo de media pulgada de dos metros de largo utilizando uniones en T y bridas. Nuestra superficie de captación al ser de color negro mate, absorbe efectivamente gran parte de la radiación solar incidente y la transfiere al agua que circula a través de las tuberías.





Ilustración 3: CST de botellas, superficie de captación. Fuente: propia

### 2.1.2 Cubierta de plástico

Con el fin de generar el efecto invernadero en la superficie de captación, se atravesaron botellas de plástico PET a lo largo de las tuberías. A estas se les hizo un corte y se colocaron una después de otra hasta cubrir toda la superficie.



Ilustración 4: Fabricación de la cubierta de plástico. Fuente: propia



Ilustración 5: Botellas PET. Fuente: propia

### 2.1.3 Estructura de pallets

Con el fin de dar forma, firmeza y estructura al colector, se construyó una caja de madera utilizando dos pallets reciclados. Primero hubo que lijarlos, pintarlos y desarmarlos parcialmente, después se los volvió a reconstruir, esta vez, formando una sola estructura de dos metros cuadrados en donde se colocó el colector solar. La estructura terminada se puede ver en la ilustración 7.



Ilustración 6: Pallets antes de construir la estructura. Fuente: propia



Ilustración 7: Estructura de pallets finalizada. Fuente: propia

## 2.2 Colector de Placas Planas

Al diseñar y construir este modelo de captador solar, se tomaron ideas y conceptos de varios tipos y modelos de colectores solares de placas planas, adaptándolos a los materiales y las herramientas que se tenían a disposición.



Ilustración 8: Colector solar térmico de placas planas terminado. Fuente: propia



Para comprender de mejor manera su funcionamiento a continuación se detallaran sus tres componentes principales:

### 2.2.1 Superficie de captación

La superficie de captación está compuesta por materiales de alta conductividad térmica para incrementar al máximo la transferencia de calor. Se utilizaron tuberías de cobre de media pulgada que fueron soldadas y colocadas en una distribución paralela utilizando uniones en T. Posteriormente, a las tuberías se las unió con arcos, ángulos y remaches a una plancha de aluminio de 1,5 mm de espesor, obteniendo la mayor cantidad de contacto posible para facilitar la transferencia de calor de un material a otro, con el objetivo de aumentar la superficie que va a recibir la radiación solar y por lo tanto la eficiencia. Finalmente, se colocó una capa de pintura negra mate resistente a altas temperaturas. En la ilustración 9 se puede apreciar la superficie de captación terminada.

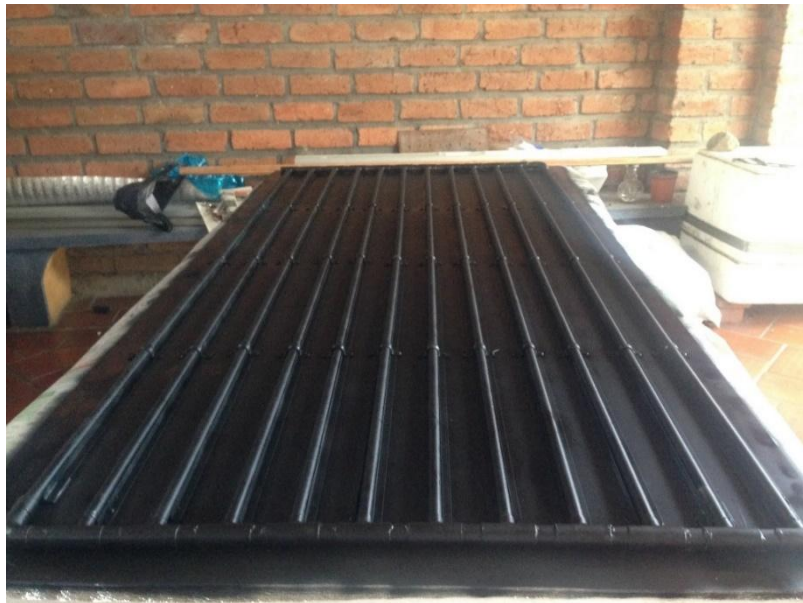


Ilustración 9: Superficie de captación del CST de placas planas

### 2.2.2 Aislamiento térmico

Debajo de la superficie de captación, se instaló una capa de aislamiento térmico compuesta por una lámina de thermolon (aislante compuesto por una hoja delgada de aluminio y medio centímetro de espuma) seguida de una capa de



tres centímetros de poliestireno expandido. Con esto, se espera reducir la mayor parte de las pérdidas de calor tanto por convección, radiación y conducción.



Ilustración 10: Aislamiento térmico del CST de placas planas



Ilustración 11: Vista lateral del aislamiento térmico del CST de placas planas

### 2.2.3 Cubierta plástica

Para obtener el deseado efecto invernadero y aumentar la temperatura en el interior del colector y en la superficie de captación, se instaló una plancha de policarbonato, un material plástico de doble capa, liviano, resistente y flexible tal y como se muestra en la ilustración 12.



Ilustración 12: Cubierta de policarbonato siendo colocado en el CST de placas planas



## **CAPÍTULO 3: EFICIENCIA DE LOS COLECTORES SOLARES TÉRMICOS**

### **3.1 Metodología**

Para obtener la eficiencia hicieron falta dos etapas, la primera fue la recolección de datos mediante pruebas y la segunda fue el cálculo matemático. A continuación se explica más a detalle cada una de las etapas:

#### **3.1.1 Recolección de datos y gráfica de $RS$ vs $\Delta T$**

Para calcular la eficiencia de los CST, a estos se los sometió a pruebas reales. Los dos colectores estuvieron en funcionamiento al mismo tiempo y en el mismo lugar, para así asegurarnos que todos ellos se encuentren bajo las mismas condiciones (radiación solar, temperatura ambiental, humedad, etc.). Ambos colectores tenían 2 m<sup>2</sup> de área de captación.

Para captar la mayor cantidad de energía solar, la orientación de los colectores debe ser perpendicular a la dirección del sol y con un ángulo de inclinación igual a la latitud más 10 grados. (San Juan & Gramático, 2007) En Cuenca, nuestro sitio de prueba, ambos colectores fueron colocados en dirección norte, con una inclinación de 13 grados con respecto al suelo ya que así se puede aprovechar más eficientemente la energía solar durante todo el día, tomando en cuenta que la latitud de la ciudad es de -3° (Mapas América, 2016).

A cada colector se le asignó un tanque con 23 lts de agua para calentar (cantidad aproximada de agua que se necesita para tomar un baño de 5 minutos. Fuente: experimentación propia). El agua recorrió a través de los colectores, por circulación forzada, con ayuda de una bomba de agua, durante 15 minutos.

Se utilizó un tiempo de 15 minutos debido a que se pudo observar que hubo  $\Delta T$  significativo y representativo una vez transcurrido este tiempo, tomando en cuenta condiciones climáticas nubladas y despejadas (Fuente: Experimentación propia).

Antes de comenzar con las pruebas, se tomó datos sobre la temperatura inicial del agua (antes de ser calentada) y una vez finalizados los 15 minutos nuevamente se tomó la temperatura del agua (después de ser calentada). Posteriormente, se calculó el promedio de la radiación solar durante el tiempo en que los CST estuvieron en funcionamiento; estos datos fueron tomados por un piranómetro de una estación meteorológica, que se encontraba junto al sitio de



prueba tal y como se muestra en la ilustración 13. Para finalizar, se restó la temperatura final del agua menos la temperatura inicial, para así obtener la variación de temperatura o  $\Delta T$ . Este proceso se repitió varias veces con diferentes niveles de radiación solar y de condiciones climáticas con el fin de obtener la mayor cantidad de datos y así poder saber la correlación que existe entre estos dos parámetros (RS y  $\Delta T$ ). Con los datos obtenidos se realizó una base de datos comparando la RS con el  $\Delta T$  de cada colector (Ver la tabla 3 en Anexos).

Resumiendo lo que ya se ha explicado, en cada colector se calentaron 23 lts de agua durante 15 minutos y se calculó el  $\Delta T$  (Temperatura final – Temperatura inicial). Al  $\Delta T$  se lo comparó con los datos de radiación solar para poder sacar una correlación entre las dos variables y poder comparar fácilmente entre ambos diseños.



Ilustración 13: CST junto a la estación meteorológica.



### 3.1.2 Cálculo de la eficiencia

Con los niveles de radiación solar, se pudo calcular la cantidad de energía solar incidente. Se multiplicó los niveles de radiación solar promedio en los 15 minutos en los que estuvieron funcionando los colectores, y posteriormente se los multiplicó por el tiempo para obtener la energía por unidad de área durante los 15 minutos y por 2 m<sup>2</sup>, el área de los CST. A continuación se muestra un ejemplo real de cómo se calculó de la energía incidente:

$$E_i = RS * t * AC$$

Ecuación 1: Energía solar incidente

$$E_i = \left( \frac{790W}{m^2} \right) * 15min * 2m^2$$

$$E_i = \left( \frac{790J}{m^2s} \right) * 900s * 2m^2$$

$$E_i = 1422 KJ$$

$$E_i = 395 Wh$$

En donde:

- $E_i$  es la energía solar incidente en 2 m<sup>2</sup>
- RS es la radiación solar promedio en 15 min
- t es el tiempo (15 min)
- AC es el área de captación (2 m<sup>2</sup>)

Una vez calculada la energía solar incidente, se procedió a calcular que porcentaje de esta fue aprovechada por los CST. Se utilizó el calor específico del agua, se lo multiplicó por el  $\Delta T$  y por la masa de agua calentada, es decir 23Kg. Veamos otro ejemplo:

$$ECST = (c * m * \Delta T)$$

Ecuación 2: Energía aprovechada por el CST

$$ECST = \frac{4,18KJ}{Kg^{\circ}C} * 23Kg * 8^{\circ}C$$

$$ECST = 769,12 KJ$$

$$ECST = 213,64 Wh$$

En donde:

- ECST es la energía aprovechada por el colector solar térmico.
- c es el calor específico del agua, que es una constante.
- m es la masa del agua (23 Kg en todas las pruebas).
- $\Delta T$  es la variación de la temperatura del agua.



Finalmente, podemos obtener el porcentaje de la eficiencia, dividiendo la energía aprovechada por el colector solar térmico (ECST) para la energía incidente (Ei) y así obtendremos un porcentaje de la energía total aprovechada. Sigamos con el ejemplo anterior:

$$Ef1 = \frac{ECST}{Ei}$$

Ecuación 3: Eficiencia del CST

$$Ef1 = \frac{213,64 \text{ Wh}}{395 \text{ Wh}} * 100\%$$

$$Ef1 = 54\%$$

Con esto se ha obtenido el primer valor de eficiencia o Ef1, el cual nos indica el rendimiento puntual en una de las pruebas realizadas. Para obtener la eficiencia promedio, este procedimiento se realizó con toda la base de datos generada, con todos los niveles de RS y en cada CST. Sumando todos los valores y dividiéndolos para el número total de datos, se obtuvo la eficiencia promedio de cada CST. La fórmula de la eficiencia promedio la mostramos a continuación:

$$Ef \text{ Promedio} = (Ef1 + Ef2 + Ef3 + \dots + Efn)/n$$

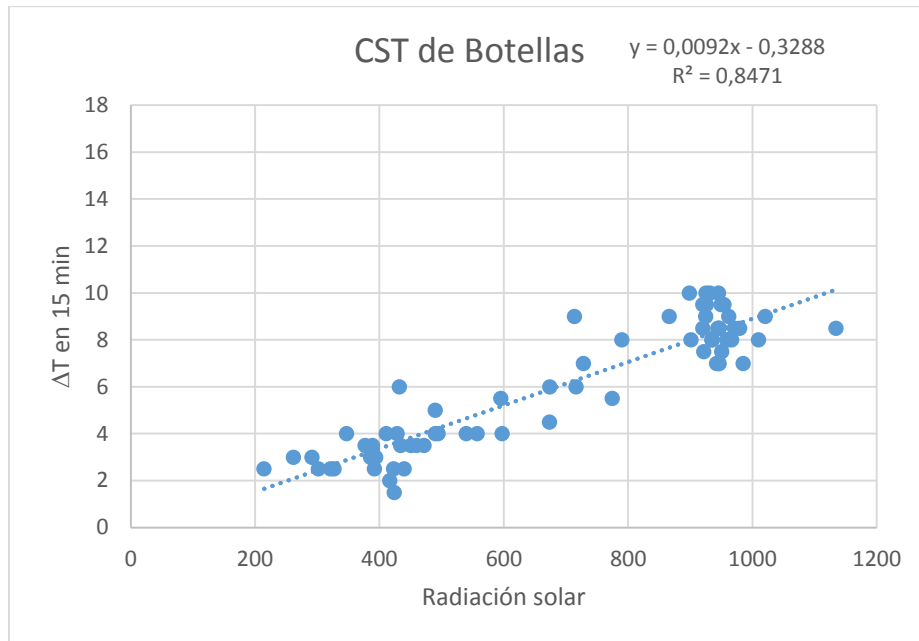
Ecuación 4: Eficiencia Promedio

A continuación se mostrarán los resultados del estudio:

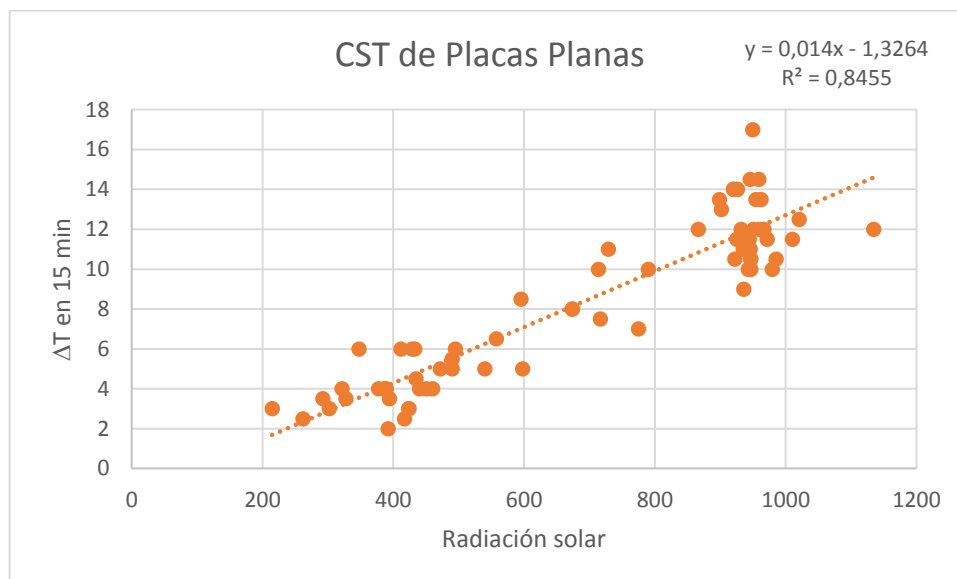
## 3.2 RESULTADOS EFICIENCIA

### 3.2.1 Radiación Solar vs variación de temperatura del agua o $\Delta T$

Las siguientes gráficas comparan el  $\Delta T$  (Temperatura final – Temperatura inicial) del agua en 15 minutos, a distintos niveles de radiación solar:



Gráfica 1:  $\Delta T$  vs RS en el CST de botellas

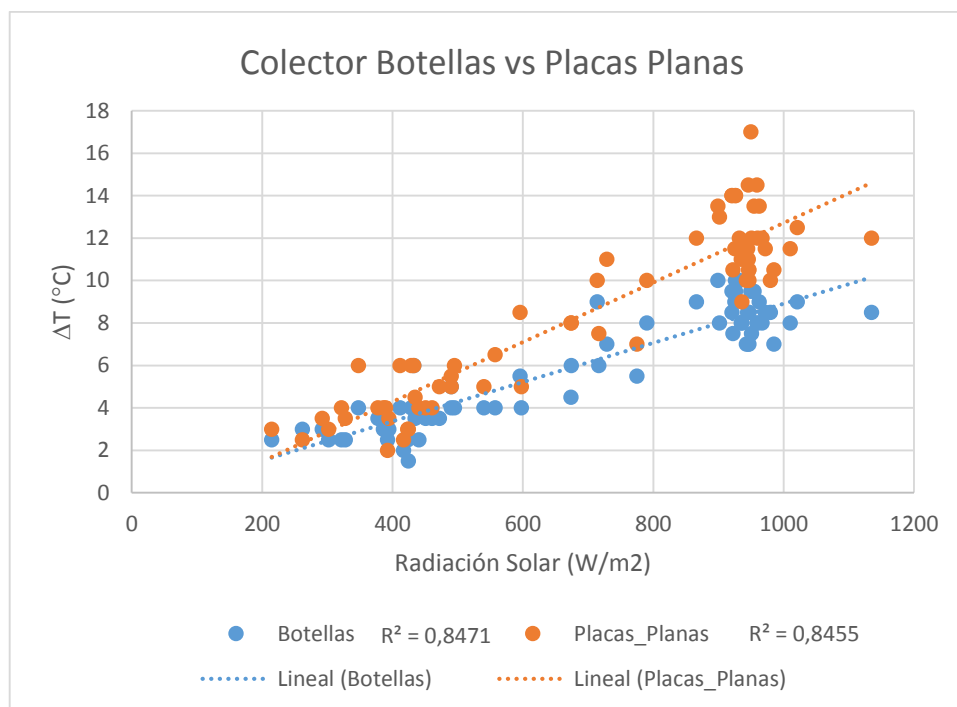


Gráfica 2:  $\Delta T$  vs RS en el CST de placas planas

En las gráficas de dispersión generada por la base de datos, se incluyó un modelo lineal de la ecuación de la recta y el coeficiente de determinación  $r$  cuadrado. Como podemos observar en la gráfica 1 y 2, en ambos CST, el  $\Delta T$  varía directamente proporcional a la radiación solar, es decir, a mayor radiación solar un mayor  $\Delta T$ .

En ambos casos, el  $R^2$  es superior a 0,84, esto nos indica que existe una relación fuerte entre ambas variables y que el  $\Delta T$  varía proporcional a los niveles de radiación solar.

Debido a su alto índice de correlación, con la ecuación de la recta podemos estimar el  $\Delta T$  que obtendremos con cualquier nivel de radiación solar supuesto.



Gráfica 3:  $\Delta T$  vs RS en los dos CST

Colocando a los dos CST, el de botellas (celeste) y el de placas planas (naranja), en una misma gráfica, se puede apreciar una clara superioridad del CST de placas planas.

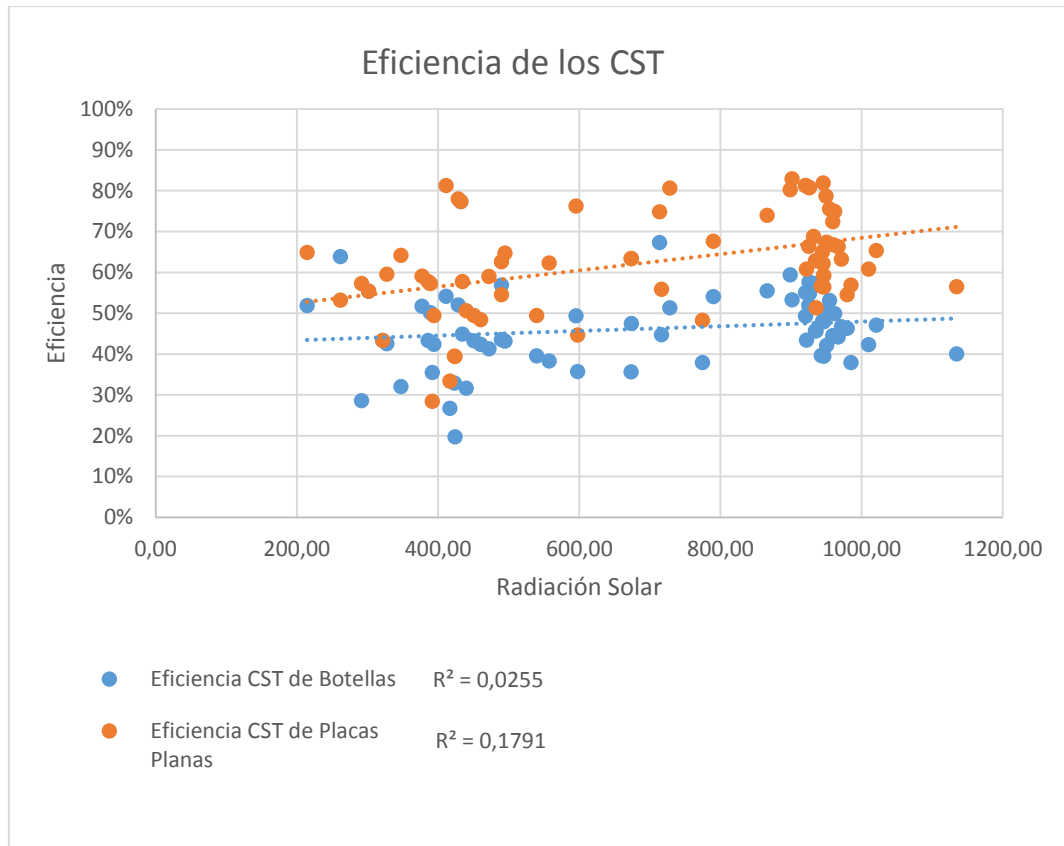
A bajos niveles de radiación solar, inferiores a  $450 W/m^2$ , se puede observar que no existe una diferencia muy marcada entre el CST de botellas y el de placas planas. Esto significa que en días muy nublados, al amanecer y al atardecer, cuando los niveles de RS son bajos, ambos colectores tendrán similares niveles de eficiencia.

### 3.2.2 Eficiencia de los CST

Al hablar de eficiencia, nos referimos a que porcentaje de la energía solar incidente se la pudo transformar en energía térmica. Primero, veamos como varió la eficiencia a distintos niveles de radiación solar:

Santiago González Pozo





Gráfica 4: Eficiencia vs RS

La gráfica 4 nos muestra la eficiencia de los CST a distintos niveles de RS.

En el colector solar de placas planas, se puede notar una ligera tendencia en aumentar la eficiencia con mayores niveles de radiación solar, sin embargo su  $R^2$  que es de 0,18 es muy bajo como para poder concluir que existe una relación entre las dos variables. En el caso del colector de botellas, se puede decir que no es nada significativa la relación y su  $R^2 = 0,025$  lo confirma.

Para tener una idea clara de la eficiencia de cada colector, se hizo un promedio de todos los niveles de eficiencia a distintos los niveles de RS para obtener la eficiencia global. Este fue el resultado:

Tabla 2: Resultados de eficiencia

#Eficiencia	Eficiencia CST de Botellas	Eficiencia CST de Placas Planas
Ef 1	52%	65%
Ef 2	64%	53%
Ef 3	29%	57%

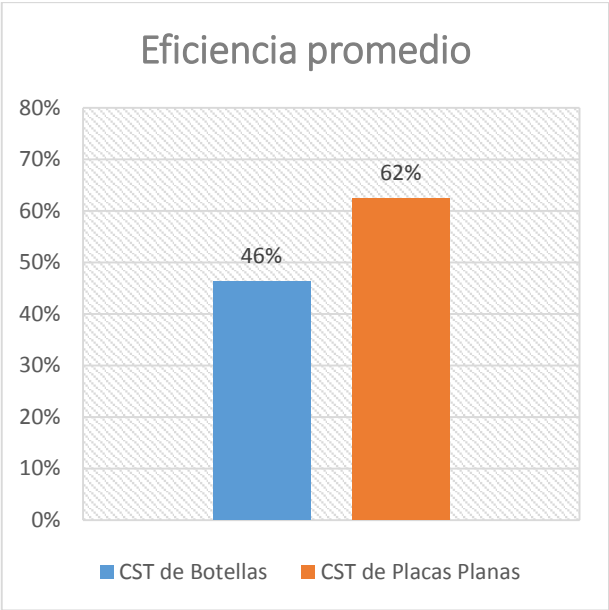


#Eficiencia	Eficiencia CST de Botellas	Eficiencia CST de Placas Planas
Ef 4	55%	55%
Ef 5	43%	43%
Ef 6	43%	60%
Ef 7	32%	64%
Ef 8	52%	59%
Ef 9	43%	58%
Ef 10	50%	57%
Ef 11	36%	28%
Ef 12	42%	50%
Ef 13	54%	81%
Ef 14	27%	33%
Ef 15	33%	40%
Ef 16	20%	39%
Ef 17	52%	78%
Ef 18	77%	77%
Ef 19	45%	58%
Ef 20	32%	51%
Ef 21	43%	49%
Ef 22	42%	48%
Ef 23	41%	59%
Ef 24	57%	63%
Ef 25	44%	55%
Ef 26	43%	65%
Ef 27	40%	49%
Ef 28	38%	62%
Ef 29	49%	76%
Ef 30	36%	45%
Ef 31	36%	63%
Ef 32	48%	63%
Ef 33	67%	75%
Ef 34	45%	56%
Ef 35	51%	81%
Ef 36	38%	48%
Ef 37	54%	68%
Ef 38	55%	74%
Ef 39	59%	80%
Ef 40	53%	83%
Ef 41	49%	81%
Ef 42	55%	81%
Ef 43	43%	61%
Ef 44	52%	66%



#Eficiencia	Eficiencia CST de Botellas	Eficiencia CST de Placas Planas
Ef 45	58%	81%
Ef 46	55%	81%
Ef 47	57%	69%
Ef 48	46%	63%
Ef 49	46%	51%
Ef 50	40%	57%
Ef 51	48%	65%
Ef 52	40%	62%
Ef 53	56%	82%
Ef 54	48%	59%
Ef 55	48%	56%
Ef 56	40%	59%
Ef 57	51%	79%
Ef 58	42%	67%
Ef 59	53%	76%
Ef 60	45%	72%
Ef 61	45%	67%
Ef 62	50%	75%
Ef 63	44%	66%
Ef 64	47%	63%
Ef 65	46%	55%
Ef 66	38%	57%
Ef 67	42%	61%
Ef 68	47%	65%
Ef 69	40%	57%
<b>Ef Promedio</b>	<b>46%</b>	<b>62%</b>

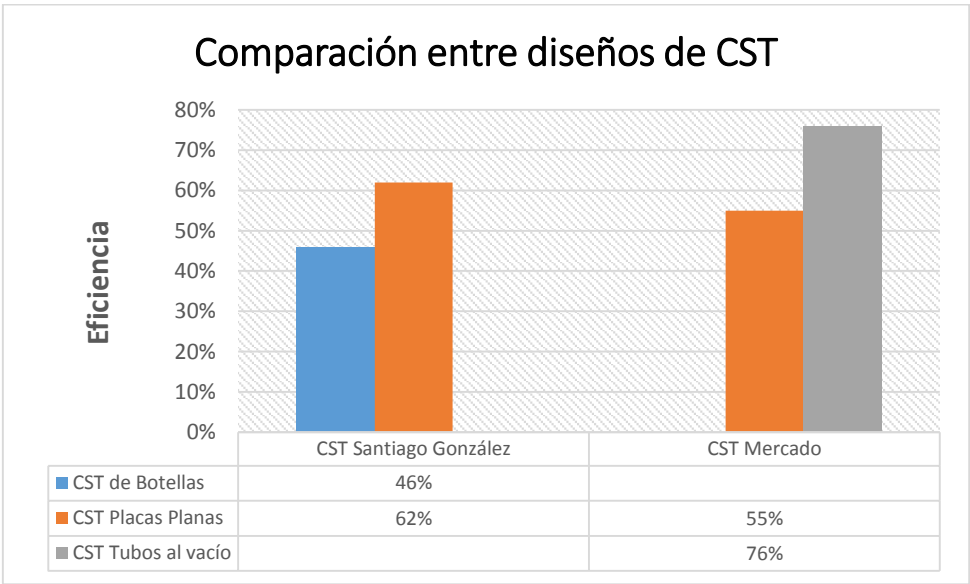
Como se puede observar en la tabla 2, se realizaron pruebas y cálculos de la eficiencia 69 veces, esto con el objetivo de obtener una eficiencia promedio, la cual nos da un resultado mucho más preciso y con un menor margen de error.



Gráfica 5: Eficiencia promedio

La eficiencia promedio del CST de botellas fue del 46% y la del CST de placas planas fue del 62%, un 16% superior.

Con el fin de tener una referencia de comparación de los colectores diseñados y construidos en esta tesis, en la gráfica 6 se muestra la eficiencia de otros dos modelos comerciales de CST que existen a la venta en el mercado, uno de tecnología de placas planas y otro de tecnología de tubos al vacío.



Gráfica 6: Comparación de eficiencia entre los CST



Como podemos ver en el gráfico 6, el diseño de CST de Placas Planas diseñado por el autor de este trabajo, obtuvo valores de eficiencia 7% superior al modelo de placas planas comercial. También se puede apreciar que la tecnología de los CST de tubos al vacío tiene un mayor grado de sofisticación y su alto nivel de eficiencia lo demuestra.

Cabe recalcar que los valores de eficiencia de los CST comerciales fueron obtenidos utilizando una metodología propia de los fabricantes y la cual es distinta a la descrita en este proyecto. De haber sido usada la misma metodología planteada en este proyecto y puestos a prueba a los mismos CST probablemente estos hubiesen arrojado resultados distintos. Sin embargo, podemos utilizar estos valores como una referencia comparativa y sacar conclusiones sobre los resultados obtenidos en este proyecto.

Como ya nos habíamos percatado, el colector de placas planas, es más eficiente que el de botellas, sin embargo, el que sea más eficiente no necesariamente le convierte en la mejor opción ya que existen otros factores a considerar que son de vital importancia, uno de ellos, quizá el más importante, es el aspecto económico, el cual revisaremos a continuación.

## **CAPÍTULO 4: ANÁLISIS ECONÓMICO**

En este capítulo se realizó un cálculo de la energía promedio aprovechada en todos los meses del año, una proyección de ahorro de dinero mes a mes y se obtuvo el periodo de retorno de la inversión realizada en cada CST.

Utilizando la base de datos de las pruebas con los CST que se encuentra en la tabla 3 (ver en anexos), se pudo crear una gráfica que compara los niveles de RS con los de  $\Delta T$  como ya hemos revisado en la gráfica 1, 2 y 3. Utilizando dichas gráficas se pudo obtener una línea de tendencia para predecir el comportamiento de los CST a distintos niveles de radiación solar. Accediendo a una base de datos de RS media en la ciudad de Cuenca, se pudo estimar el  $\Delta T$  con dichos niveles de radiación. Finalmente, utilizando nuevamente la ecuación 2, se pudo calcular la energía producida (o ahorrada) por los CST.

Con la RS media mensual y anual de la ciudad de Cuenca de la tabla 6 (ver en anexos), se calculó el promedio de energía ahorrada por mes en KWh. Después se multiplicó por el costo de la energía eléctrica para uso residencial, que es de 0,101\$/KWh (Cuenca, 2016; Fuente: Centrosur) y así obteniendo el ahorro promedio por mes. Véase el siguiente ejemplo:

$$\text{Ahorro \$ / mes} = \text{ECST} * \frac{0,101 \$}{\text{KWh}}$$

Ecuación 5: Ahorro por mes

$$\begin{aligned} \text{Ahorro \$ / mes} &= 202,9 \text{ KWh} * \frac{0,101 \$}{\text{KWh}} \\ \text{Ahorro \$ / mes} &= 20,49 \$ \end{aligned}$$

Una vez obtenido el ahorro promedio, se puede utilizar la ecuación 6 para calcular el periodo de retorno de la inversión realizada en la construcción de los CST, tal y como se muestra en el siguiente ejemplo:

$$\text{PR} = \frac{\text{Costo del CST}}{\text{Ahorro \$ / mes}}$$

Ecuación 6: Periodo de retorno de la inversión

$$\begin{aligned} \text{PR} &= \frac{318,89 \$}{20,49 \$ / \text{mes}} \\ \text{PR} &= 15,6 \text{ meses} \end{aligned}$$

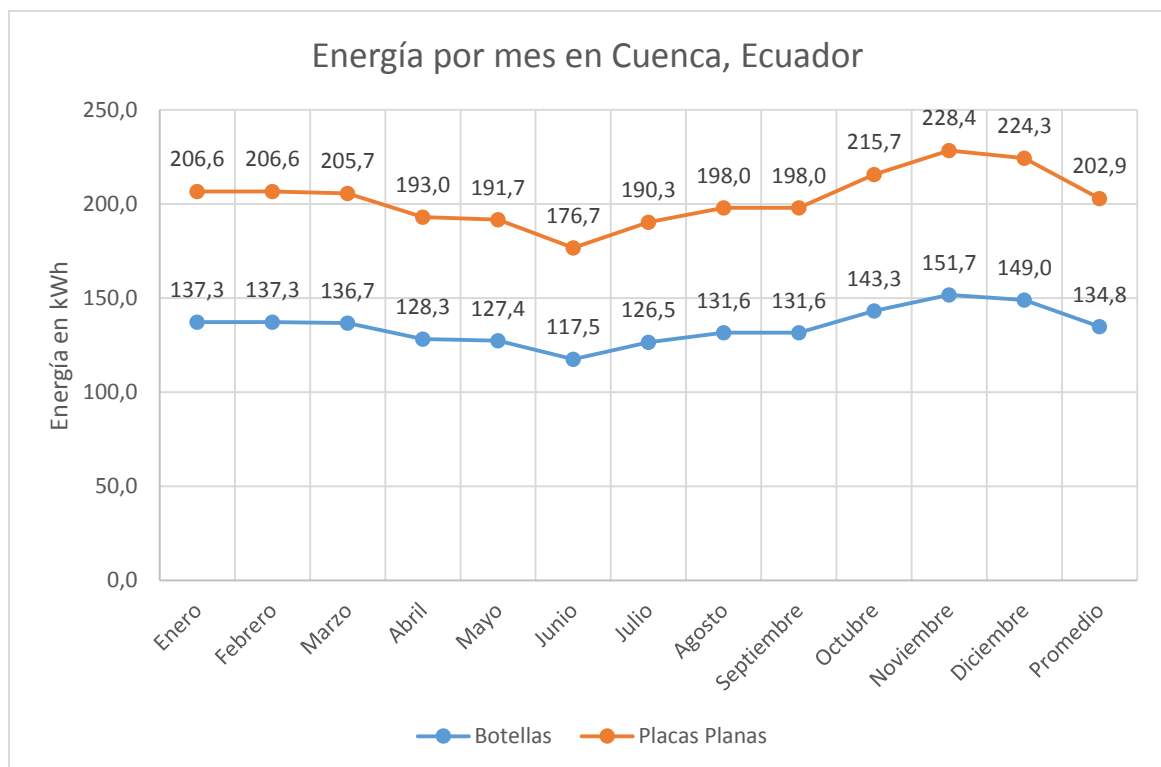
El costo y el consumo de la energía eléctrica que demanda la bomba de agua no está contemplado en este análisis económico ya que a esta se la usó solo con fines investigativos. En un caso real y práctico, los CST fueron diseñados para

funcionar en un sistema de termosifón simple (descrito en el marco teórico), el cual no demanda ningún tipo de energía para funcionar.

Con la información recolectada se podrán obtener conclusiones sobre qué colector es económicamente más viable. A continuación mostraremos los resultados.

## 4.2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS ECONÓMICO

Ahora veremos el potencial de generación de energía de los colectores solares mes a mes en la gráfica 7:



Gráfica 7: Energía por mes de cada CST

En la gráfica 6 podemos ver que el promedio de generación del CST de botellas es de 134,8 KWh/mes y del CST de placas planas es de 202,9 KWh/mes.

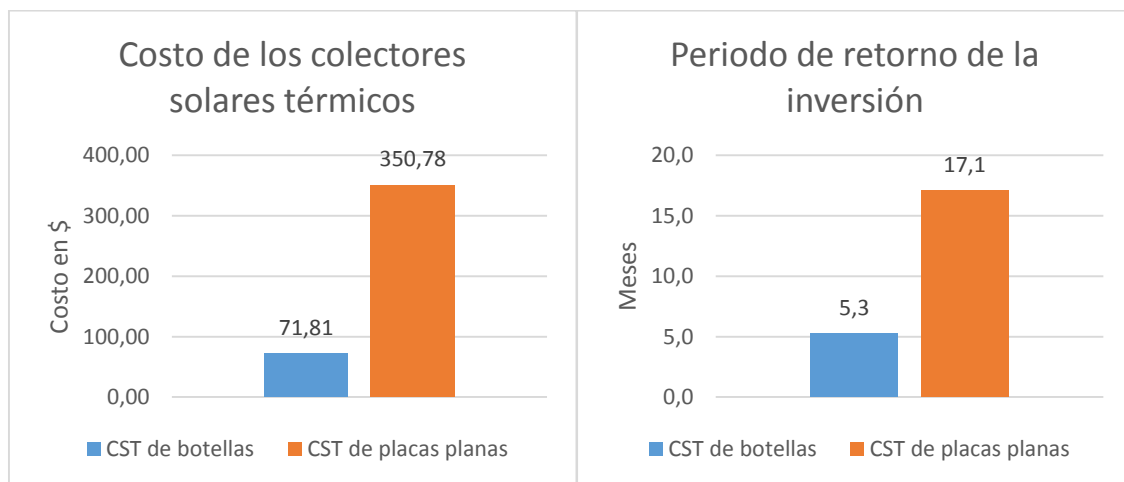
Al multiplicar el ahorro energético por el costo del KWh (0,101\$) obtenemos el ahorro de dinero por mes. En el CST de botellas resultó de 13,62\$/mes y en el de placas planas es de 20,50\$/mes.

Debido a que en este estudio los colectores son diseños nuevos, no se ha considerado el tiempo de vida útil de los mismos para contemplarlo en el análisis económico, debido a que no se puede saber con certeza y precisión.

Con el precio de construcción de cada colector solar (ver en anexos tabla 4 y 5) obtuvimos el periodo de retorno de la inversión o plazo de recuperación, es decir, en cuantos meses el ahorro iguala y supera al precio de la inversión.

En caso de que surja algún imprevisto, ya sea cambiar una pieza del CST, dar mantenimiento, entre otros sucesos no previstos, se ha decidido añadir un 10% al precio real de los colectores solares térmicos para cubrir dichos gastos.

Veamos los siguientes gráficos con el precio y el periodo de retorno de la inversión de los CST:



Gráfica 8: Costo de los CST

Gráfica 9: Periodo de retorno de la inversión

El periodo de retorno del CST de botellas y el CST de placas planas es de 5,3 y 17,1 meses respectivamente. Debido a que el CST de placas planas es varias veces más costoso que el de botellas, su periodo de retorno también resulta mayor a pesar de haber mostrado un mayor ahorro energético.

Inversiones con un periodo de retorno o plazo de recuperación menor a dos años o 24 meses son considerados como muy rentables. Esto demuestra que los CST, en ambos casos, son económicamente viables.





## **DISCUSIÓN**

Durante el desarrollo del trabajo, se planteó incluir un diseño comercial de CST que exista a la venta para comparar con los que se construyeron. Esto no resultó posible debido a sus elevados precios, que iban más allá del presupuesto disponible para este proyecto. Es por esto que se investigó sobre opciones de CST disponibles para la venta en el mercado local, para poder usar como referencia y punto de comparación los valores de eficiencia proporcionados por el fabricante, que en este caso fue Photons.

Es de gran importancia recalcar que la metodología para el cálculo de la eficiencia de los CST utilizada en este proyecto fue distinta a la utilizada por los fabricantes del otro CST. Es posible que entre una u otra forma de calcular la eficiencia, se obtengan distintos resultados de eficiencia.

Para poder hacer una comparación mucho más precisa y fiable, debería utilizarse la misma metodología de cálculo de la eficiencia y los CST deberían probarse en el mismo lugar y al mismo tiempo.



## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Cuando hablamos de energías renovables, la eficiencia siempre será un factor importante y permanentemente se buscará obtener el mayor valor posible. Para fines prácticos y para poder extender esta tecnología también es necesario que sea económicamente viable. Una combinación de ambos factores podría hacer que la energía solar térmica sea una opción atractiva y que sustituya a fuentes convencionales de energía.

Ambos CST obtuvieron valores muy elevados de eficiencia, 46% el CST de Botellas y 62% el CST de Placas Planas, demostrando que una tecnología relativamente simple puede aprovechar excepcionalmente la mayor fuente de energía del planeta, el sol. El CST de Placas Planas fue más eficiente que el CST de Botellas y esto fue debido a que este utiliza materiales de mejor calidad y de mayor conductividad térmica, factores que fueron determinantes en el resultado final.

Las energías renovables tienen que competir con otros tipos de energía como los combustibles fósiles y una forma de hacerlos más atractivos, es abaratando precios lo más que se pueda. Si hablamos en el costo de construcción, el CST de botellas resultó casi cinco veces más económico que el de placas planas, esto sin duda le da un gran punto a favor a este diseño. El CST de placas planas también tiene méritos en este aspecto ya que mostró tener un precio accesible para gran parte de la población.

A pesar de su menor capacidad de aprovechamiento de la energía, el periodo de retorno o tiempo de recuperación de la inversión en el CST de botellas fue alrededor de tres veces menor al colector de placas planas, siendo solamente de 5,3 meses, lo cual significa que con un bajo capital se pudo hacer una inversión muy rentable. Hay que considerar que el CST de placas planas con 17,1 meses de periodo de retorno también es una inversión muy atractiva, y que en un mediano y largo plazo, genera un mayor ahorro de dinero.

En comparación con el CST de placas planas, el diseño de botellas fue mucho más sencillo y fácil de construir. Se necesitaron materiales que se pueden conseguir fácilmente en cualquier ferretería y las herramientas utilizadas fueron muy básicas. Pienso que es posible para gente con poca experiencia, aprender a construir eficiente y eficazmente estos modelos en sus hogares en poco tiempo. En cuanto al diseño de placas planas, este resulta más complicado de realizar ya que requiere de herramientas que no todas las personas poseen y también demanda de materiales que son un poco más complicados de encontrar. El proceso de fabricación es delicado y preciso, admitiendo poco margen de



error, pero con un poco de empeño y motivación, incluso sin experiencia previa, se puede lograr.

Una de las desventajas de los CST en general, es que cuando los niveles de RS son muy bajos, durante un largo periodo de tiempo, es probable que el agua no alcance temperaturas óptimas para sus fines prácticos. Siempre será necesario de un sistema de apoyo en caso de que esto suceda, ya sea a eléctrico o a gas.

Después de revisar exhaustivamente la información y los resultados obtenidos, no he podido llegar a concluir que un diseño es mejor al otro. Cada uno presenta ventajas y desventajas y cada uno de los modelos se adapta mejor dependiendo de las necesidades de cada familia. El CST de botellas, es sin duda una mejor opción para personas o comunidades de bajos recursos económicos, su precio es accesible y su simpleza le proporciona una clara ventaja. Para familias con una mejor situación económica el CST de placas planas sería una mejor inversión debido a su mayor eficiencia y durabilidad.

Todavía queda mucho camino que se puede recorrer en cuanto a investigación sobre colectores solares térmicos. La base de datos de los resultados obtenidos con estos dos diseños, está disponible en los anexos, para motivar a que en futuras investigaciones se puedan comparar con cualquier otro tipo de diseño, ya sea artesanal o comercial o que use otro tipo de tecnología.

Espero que la metodología y el experimento diseñado para calcular la eficiencia, se siga utilizando para añadir dos o tres CST más a la investigación, así podremos determinar de mejor manera los mejores diseños y cuales se adaptan mejor a nuestra realidad. Mientras más investiguemos, más pasos podremos dar hacia un futuro con energías renovables, libre de contaminación y hacia un desarrollo sostenible.



## **Referencias**

- Alcino, J. (2004). *Manual na construção e instalação do aquecedor solar com descartáveis*. Santa Catarina.
- American Solartechncs. (2016). *American Solartechncs*. Obtenido de <http://www.americansolartechncs.com>
- Arab, M., Soltanieh, M., & Shafii, M. (2012). Experimental investigation of extra-long pulsating heat pipe application. *ScienceDirect*.
- Ayala Corona, A. (2015). *Calores específicos*.
- Camargo Macías, A. A. (2013). *Diseño y construccion de un colector solar con botellas reciclables PET y análisis comparativo con otros colectores*. Pereira, Colombia.
- Cárdenas, L. (2010). *Conductividad térmica*.
- Comisión Electrotécnica Internacinal. (2015). *Energías Renovables*. Ginebra.
- Dieter, H. (2005). Un Futuro Para el Mundo en Desarrollo Basada en las Fuentes Renovables de Energía. ISES (Internacional Solar Energy Society)-.
- Domingo, A. M. (2011). *Apuntes de Transmisión de Calor*. Madrid.
- Harlamert, S., & Harlament, P. (1973). *Flat-Plate collector performance evaluation. The case for a solar simulation a approach*. NASA, Cleveland.
- Holman, J. P. (1986). *Transferencia de calor. 8va edición*.
- Lorente, J. (2013). *Curso de fotoprotección*.
- M. Raisul Islam, K. S. (2013). Solar waterheatingsystemsandtheirmarkettrends. *ScienceDirect*.
- Mapas América. (2016). Obtenido de <http://mapasamerica.dices.net/ecuador/mapa.php?id=3332>
- Peláez Samaniego, M., & Espinoza Abad, J. (2015). *Energías renovables en el Ecuador, Situación actual, tendencias y perspectivas*. Universidad de Cuenca, Cuenca.
- Ruchi Shukula, P. E. (2013). Recent advances in the solar water heating systems: A review. *ScienceDirect*.
- Sagahon, I. Y. (2013). *Energía solar térmica y fotovoltaica aislada para pequeñas comunidades en Perú*. Barcelona.
- San Juan , G. (2008). *Calentador Solar de Agua: Manual del usuario. Tecnología sencilla*. La Plata.



Universidad de Cuenca

San Juan, G., & Gramático, J. (2007). *Calentador Solar de Agua; Manual del Usuario Tecnología Sencilla*. La Plata.

Vila, A., Sedano, M., & López, A. (2002). *Correlación lineal y análisis de regresión*.

## ANEXOS

### Base de datos:

Tabla 3: Base de datos de las pruebas con los CST

Radiación Promedio en 15 min	Energía durante 15 min (Wh/m <sup>2</sup> ) en 2m <sup>2</sup>	ΔT en 15 min CST Botellas	ΔT en 15 min CST Placas Planas	Energía CST botellas (Wh/m <sup>2</sup> )	Energía CST de Placas Planas (Wh/m <sup>2</sup> )	Eficiencia CST de Botellas	Eficiencia CST de Placas Planas
214,63	107,32	2	2,5	55,73	69,67	52%	65%
261,63	130,82	3	2,5	83,60	69,67	64%	53%
291,87	145,93	1,5	3	41,80	83,60	29%	57%
301,90	150,95	3	3	83,60	83,60	55%	55%
321,60	160,80	2,5	2,5	69,67	69,67	43%	43%
327,40	163,70	2,5	3,5	69,67	97,53	43%	60%
347,27	173,63	2	4	55,73	111,47	32%	64%
377,27	188,63	3,5	4	97,53	111,47	52%	59%
385,80	192,90	3	4	83,60	111,47	43%	58%
389,07	194,53	3,5	4	97,53	111,47	50%	57%
391,93	195,97	2,5	2	69,67	55,73	36%	28%
394,07	197,03	3	3,5	83,60	97,53	42%	50%
411,33	205,67	4	6	111,47	167,20	54%	81%
416,93	208,47	2	2,5	55,73	69,67	27%	33%
423,13	211,57	2,5	3	69,67	83,60	33%	40%
423,90	211,95	1,5	3	41,80	83,60	20%	39%
428,60	214,30	4	6	111,47	167,20	52%	78%
432,43	216,22	6	6	167,20	167,20	77%	77%
434,40	217,20	3,5	4,5	97,53	125,40	45%	58%
440,10	220,05	2,5	4	69,67	111,47	32%	51%
450,77	225,38	3,5	4	97,53	111,47	43%	49%
460,17	230,08	3,5	4	97,53	111,47	42%	48%
471,93	235,97	3,5	5	97,53	139,33	41%	59%
489,63	244,82	5	5,5	139,33	153,27	57%	63%
489,77	244,88	4	5	106,82	133,53	44%	55%
494,73	247,37	4	6	106,82	160,23	43%	65%
539,73	269,87	4	5	106,82	133,53	40%	49%
557,30	278,65	4	6,5	106,82	173,58	38%	62%
595,27	297,63	5,5	8,5	146,88	227,00	49%	76%
597,57	298,78	4	5	106,82	133,53	36%	45%
673,63	336,82	4,5	8	120,17	213,64	36%	63%
674,10	337,05	6	8	160,23	213,64	48%	63%



Radiación Promedio en 15 min	Energía durante 15 min (Wh/m <sup>2</sup> ) en 2m <sup>2</sup>	ΔT en 15 min CST Botellas	ΔT en 15 min CST Placas Planas	Energía CST botellas (Wh/m <sup>2</sup> )	Energía CST de Placas Planas (Wh/m <sup>2</sup> )	Eficiencia CST de Botellas	Eficiencia CST de Placas Planas
713,67	356,83	9	10	240,35	267,05	67%	75%
716,30	358,15	6	7,5	160,23	200,29	45%	56%
728,50	364,25	7	11	186,94	293,76	51%	81%
774,53	387,27	5,5	7	146,88	186,94	38%	48%
789,90	394,95	8	10	213,64	267,05	54%	68%
866,23	433,12	9	12	240,35	320,46	55%	74%
898,67	449,33	10	13,5	267,05	360,52	59%	80%
901,37	450,68	9	14	240,35	373,87	53%	83%
920,33	460,17	8,5	14	227,00	373,87	49%	81%
920,33	460,17	9,5	14	253,70	373,87	55%	81%
922,00	461,00	7,5	10,5	200,29	280,41	43%	61%
925,00	462,50	9	11,5	240,35	307,11	52%	66%
925,67	462,83	10	14	267,05	373,87	58%	81%
925,83	462,92	9,5	14	253,70	373,87	55%	81%
931,67	465,83	10	12	267,05	320,46	57%	69%
934,67	467,33	8	11	213,64	293,76	46%	63%
935,67	467,83	8	9	213,64	240,35	46%	51%
942,67	471,33	7	10	186,94	267,05	40%	57%
944,33	472,17	8,5	11,5	227,00	307,11	48%	65%
945,33	472,67	7	11	186,94	293,76	40%	62%
945,67	472,83	10	14,5	267,05	387,23	56%	82%
946,00	473,00	8,5	10,5	227,00	280,41	48%	59%
946,33	473,17	8,5	10	227,00	267,05	48%	56%
946,33	473,17	7	10,5	186,94	280,41	40%	59%
949,67	474,83	9	14	240,35	373,87	51%	79%
950,67	475,33	7,5	12	200,29	320,46	42%	67%
954,33	477,17	9,5	13,5	253,70	360,52	53%	76%
959,00	479,50	8	13	213,64	347,17	45%	72%
960,00	480,00	8	12	213,64	320,46	45%	67%
962,00	481,00	9	13,5	240,35	360,52	50%	75%
966,67	483,33	8	12	213,64	320,46	44%	66%
971,33	485,67	8,5	11,5	227,00	307,11	47%	63%
979,30	489,65	8,5	10	227,00	267,05	46%	55%
985,00	492,50	7	10,5	186,94	280,41	38%	57%
1010,00	505,00	8	11,5	213,64	307,11	42%	61%
1020,67	510,33	9	12,5	240,35	333,82	47%	65%
1134,33	567,17	8,5	12	227,00	320,46	40%	57%
					<b>PROMEDIO</b>	46%	62%



## Materiales y presupuesto de los CST

Tabla 4: Materiales y presupuesto CST Botellas

Elemento	Cantidad	Costo \$	TOTAL \$
Reductores T de plastico de 1 a 1/2 pulgada	18	1,11	19,98
Politubo negro 1 y 1/2 pulgada	1	18,00	18,00
Bridas 1 y 1/2 pulgada	50	0,35	17,50
Thermolon /m2	2	3,65	7,30
Brea y tornillos	1	2,50	2,50
Pallets	2	0,00	0,00
Botellas	90	0,00	0,00
		<b>TOTAL</b>	65,28

Tabla 5: Materiales y presupuesto del CST de placas planas

Elemento	Cantidad	Costo \$	TOTAL \$
Tubo cobre tipo M 1/2 6 MT nanocobre/metro	24	3,40	81,60
Te de cobre reductora 3/4 a 1/2	22	1,76	38,72
Plancha de aluminio 1,5 mm	1	37,86	37,86
Ángulo de 1/2 * 1/2 in (6m)	8	3,00	24,00
Plancha de policarbonato / m2	2	11,54	23,08
Marco de aluminio	1	22,95	22,95
Tubo de cobre tipo M 3/4 in/metro	2	10,64	21,28
Pintura negra mate resistente a alta temperatura	3	4,40	13,20
Plancha de zinc de 2 m2	1	11,16	11,16
Thermolon /m2	2	3,65	7,30
Ángulo de 1* 1 in (6m)	1	7,00	7,00



Suelda de Estaño	2	2,74	5,48
Plancha de espuma flex de 2 m2 y 3cm espesor	1	5,10	5,10
Arcos 1/2 in	36	0,14	5,04
Cinta doble faz para exteriores	2	2,42	4,84
Sellador de silicón	1	2,76	2,76
Adaptador cobre en rosca 3/4 in	2	1,30	2,60
Codo de 3/4 in	2	1,23	2,46
Reductor de cobre de 3/4 a 1/2 in	2	1,23	2,46
		<b>TOTAL</b>	318,89

## Radiación solar media de la ciudad de Cuenca

Tabla 6: Radiación solar promedio en Cuenca, Ecuador. Fuente: Instituto de Ingeniería Solar, Universidad de Massachusetts

Mes	En	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom
<b>RS</b>	4,58	4,58	4,56	4,28	4,25	3,92	4,22	4,39	4,39	4,78	5,06	4,97	4,50

## Datos de temperatura del agua

La siguiente tabla nos muestra cómo fue variando la temperatura del agua en el tanque de almacenamiento de cada CST a medida que avanzaba el tiempo. En cada prueba, se tomaron datos de temperatura cada 5 minutos y al finalizar se cambiaba el agua del tanque de almacenamiento por una nueva o sin calentar.

Esta tabla también nos indica la fecha y hora exacta en que se tomaron los datos y la radiación solar del momento. Esto nos permite apreciar el proceso de calentamiento del agua en cada CST y como está influenciado por la radiación solar.

Tabla 7: Base de datos con la variación de la temperatura del agua

Fecha y Hora	Radiación Promedio (W/m2)	Temperatura del agua en el tanque de acumulación del CST Botellas (°C)	Temperatura del agua en el tanque de acumulación del CST Placas Planas (°C)
20/4/2016 10:00	222,1	18	18
20/4/2016 10:05	197,8	19	21
20/4/2016 10:10	201,4	20	21
20/4/2016 10:15	244,7	20,5	22
20/4/2016 10:20	338,8	22	23,5
20/4/2016 10:25	398,7	22,5	24,5
20/4/2016 10:30	394,3	24	26
20/4/2016 10:35	389,2	25	27
20/4/2016 10:40	383,7	26	28,5
20/4/2016 10:45	384,5	27	30
20/4/2016 12:00	398,4	26	27
20/4/2016 12:05	376,6	28	30
20/4/2016 12:10	365,3	29	31
20/4/2016 12:15	492,1	30	33
20/4/2016 12:20	412	30,5	33
20/4/2016 12:25	346,7	31	33,5
20/4/2016 12:30	417,1	32,5	35
20/4/2016 12:40	305,8	19	19
20/4/2016 12:45	466,2	24	26
20/4/2016 12:50	759	26	29
20/4/2016 12:55	305,7	26,5	30
20/4/2016 13:00	238,5	27,5	30,5
21/4/2016 11:00	441	27	31
21/4/2016 11:05	326,7	30,5	34
21/4/2016 11:10	448,7	32	36
21/4/2016 11:15	521,9	33	37
21/4/2016 11:30	396,7	20	20
21/4/2016 11:35	385,1	22	23
21/4/2016 11:40	380,2	23	25
21/4/2016 11:45	276,5	24	26
21/4/2016 11:50	308,1	24,5	27
21/4/2016 11:55	291	26	28,5
21/4/2016 12:00	306,6	26,5	29
21/4/2016 12:15	332,7	20	20
21/4/2016 12:20	244,3	21	22
21/4/2016 12:25	433,8	22	23,5
21/4/2016 12:30	607,7	24	26
21/4/2016 12:35	427,8	25	27
21/4/2016 12:40	433,4	27	29



Fecha y Hora	Radiación Promedio (W/m2)	Temperatura del agua en el tanque de acumulación del CST Botellas (°C)	Temperatura del agua en el tanque de acumulación del CST Placas Planas (°C)
21/4/2016 12:45	491,1	27,5	30
25/4/2016 11:45	937	27,5	28
25/4/2016 11:50	933	34	35,5
25/4/2016 11:55	928	37	39
25/4/2016 12:00	934	39	42
25/4/2016 12:05	942	42	46,5
25/4/2016 12:10	952	44	49
25/4/2016 12:15	942	46	53
25/4/2016 12:30	930	23	24
25/4/2016 12:35	920	26	31
25/4/2016 12:40	927	29	34,5
25/4/2016 12:45	914	31,5	38
25/4/2016 13:00	927	20,5	20,5
25/4/2016 13:05	922	25	28
25/4/2016 13:10	924	28	32
25/4/2016 13:15	915	30	34,5
25/4/2016 13:30	911	20	22,5
25/4/2016 13:35	897	24	28
25/4/2016 13:40	899	27	32
25/4/2016 13:45	900	30	36
25/4/2016 13:55	879	19	21
25/4/2016 14:00	882	23	25,5
25/4/2016 14:05	786,7	25,5	29,5
25/4/2016 14:10	930	28	33
25/4/2016 14:30	956	24,5	24,5
25/4/2016 14:35	964	28	30
25/4/2016 14:40	282,5	29	31
25/4/2016 14:45	539,3	30	33
25/4/2016 14:50	797,4	32	35
25/4/2016 14:55	456	33	36
25/4/2016 15:00	127,1	33,5	37
26/4/2016 9:50	396	22	22
26/4/2016 9:55	511,6	23	24
26/4/2016 10:00	550,5	24,5	26
26/4/2016 10:05	422,1	26	28
26/4/2016 10:10	443,2	26,5	29
26/4/2016 10:15	455	27	30
26/4/2016 10:20	373,5	27,5	31
26/4/2016 10:40	921	20	21
26/4/2016 10:45	1081	24	25,5



Fecha y Hora	Radiación Promedio (W/m2)	Temperatura del agua en el tanque de acumulación del CST Botellas (°C)	Temperatura del agua en el tanque de acumulación del CST Placas Planas (°C)
26/4/2016 10:50	1061	26	29
26/4/2016 10:55	888	28	32,5
26/4/2016 11:00	1006	31	36
26/4/2016 11:15	854	20	21
26/4/2016 11:20	861	23	26
26/4/2016 11:25	677,4	25	29
26/4/2016 11:30	647,1	27	32
26/4/2016 11:35	697,8	29	34
26/4/2016 11:40	804	31	36,5
26/4/2016 11:55	656,6	20	21
26/4/2016 12:00	691,8	22,5	26
26/4/2016 12:05	707,9	25	28
26/4/2016 12:10	970	28	31
26/4/2016 12:15	1260	31	36
26/4/2016 12:20	1173	33,5	40
26/4/2016 12:35	1099	21	21,5
26/4/2016 12:40	1111	26	29
26/4/2016 12:45	976	28	33
26/4/2016 12:50	617,1	30	35,5
26/4/2016 12:55	427,8	30,5	37
26/4/2016 13:00	627	32	39,5
27/4/2016 11:50	937	22	23
27/4/2016 11:55	962	25	29
27/4/2016 12:00	966	28	34
27/4/2016 12:05	949	30	37,5
27/4/2016 12:10	965	33	41
27/4/2016 12:25	960	20	21,5
27/4/2016 12:30	964	24	27
27/4/2016 12:35	958	26	31,5
27/4/2016 12:40	964	29	35
27/4/2016 12:45	978	32	39
27/4/2016 12:50	972	34,5	43
27/4/2016 13:05	958	21	21,5
27/4/2016 13:10	964	24,5	28
27/4/2016 13:15	959	28	32
27/4/2016 13:20	940	30,5	35
27/4/2016 13:25	940	33	38
27/4/2016 13:30	927	36	41
29/4/2016 11:40	937	23	23
29/4/2016 11:45	947	27	31,5

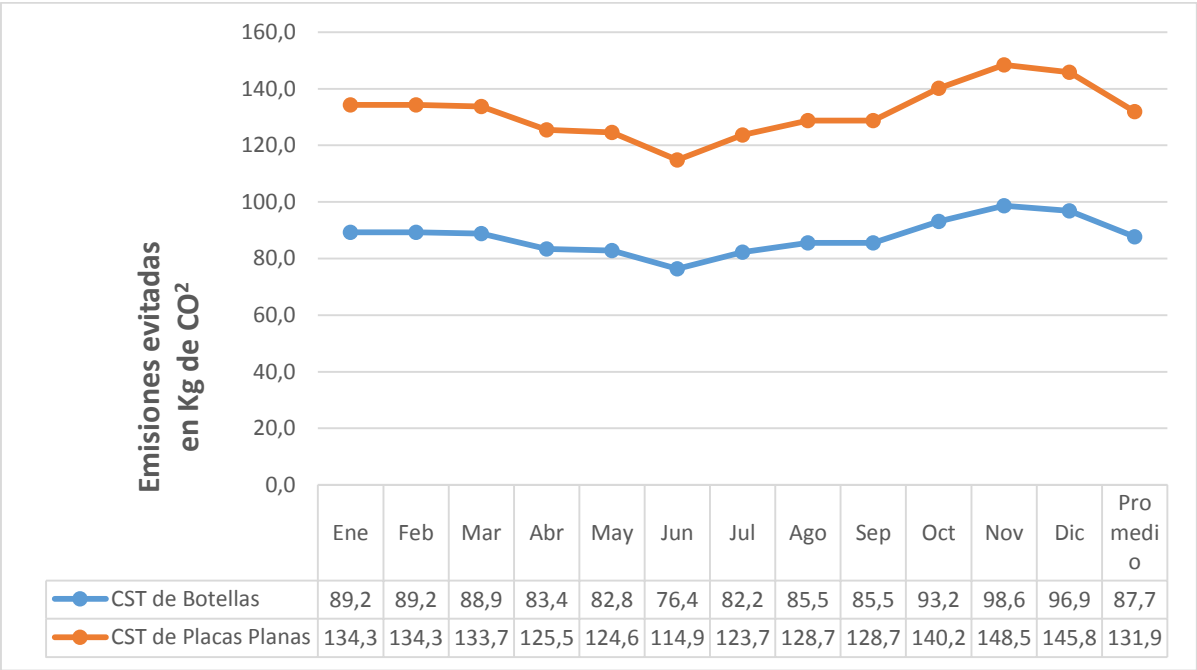


Fecha y Hora	Radiación Promedio (W/m2)	Temperatura del agua en el tanque de acumulación del CST Botellas (°C)	Temperatura del agua en el tanque de acumulación del CST Placas Planas (°C)
29/4/2016 11:50	951	30	36
29/4/2016 11:55	951	32,5	40
29/4/2016 12:00	950	34,5	43,5
29/4/2016 12:15	948	19	19,5
29/4/2016 12:20	950	22,5	25,5
29/4/2016 12:25	946	25,5	29,5
29/4/2016 12:30	941	29	34
29/4/2016 12:35	946	31	37
29/4/2016 12:40	951	34	40
29/4/2016 12:55	926	19	20
29/4/2016 13:00	929	23	26,5
29/4/2016 13:05	921	27	31
29/4/2016 13:10	927	29	34
29/4/2016 13:15	927	32	38
29/4/2016 13:20	912	34,5	41,5
3/5/2016 11:00	602,9	24,5	23
3/5/2016 11:05	771,3	27	27
3/5/2016 11:10	265,2	33	34
3/5/2016 11:15	1089	35,5	36,5
3/5/2016 11:20	786,8	36	37
3/5/2016 11:35	955	19,5	20
3/5/2016 11:40	741,5	22	24,5
3/5/2016 11:45	1064	26	29
3/5/2016 11:50	972	29	34
3/5/2016 11:55	1026	31	37
3/5/2016 12:00	841	33	39,5
3/5/2016 12:05	456,6	34,5	41



Emisiones evitadas de ser emanadas a la atmósfera

Considerando que 1 KWh de producción de energía eléctrica genera 0,65 Kg de CO<sub>2</sub> (Fuente: Comisión Europea 2015) las emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas de ser emanadas por acción de los CST se muestran en la siguiente gráfica:



Gráfica 10 Emisiones de CO2 no emanadas a la atmósfera.