



**FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

TRABAJO DE DIPLOMA

En opción al título de Ingeniero Mecánico

**Construcción y evaluación de un calentador solar
realizado a partir de materiales reciclados**

Autor: Luis Miguel Peña Girón

Tutor (es): Ms. C. Rodney Martínez Rojas

Dr. C. Ever Góngora Leyva

Ing. Rolando Mario Coba García

Moa, Holguín

“Año 61 de la Revolución”

Declaración de autoridad

Yo: Luis Miguel Peña Girón autor de este Trabajo de Diploma y el Ms. C. Rodney Martínez Rojas, el Dr.C. Ever Góngora Leyva y el Ing. Rolando Mario Coba García declaramos la propiedad intelectual de este servicio a la Universidad de Moa para que disponga de su uso cuando estime conveniente.

Firma del Diplomante

Firma del Tutor

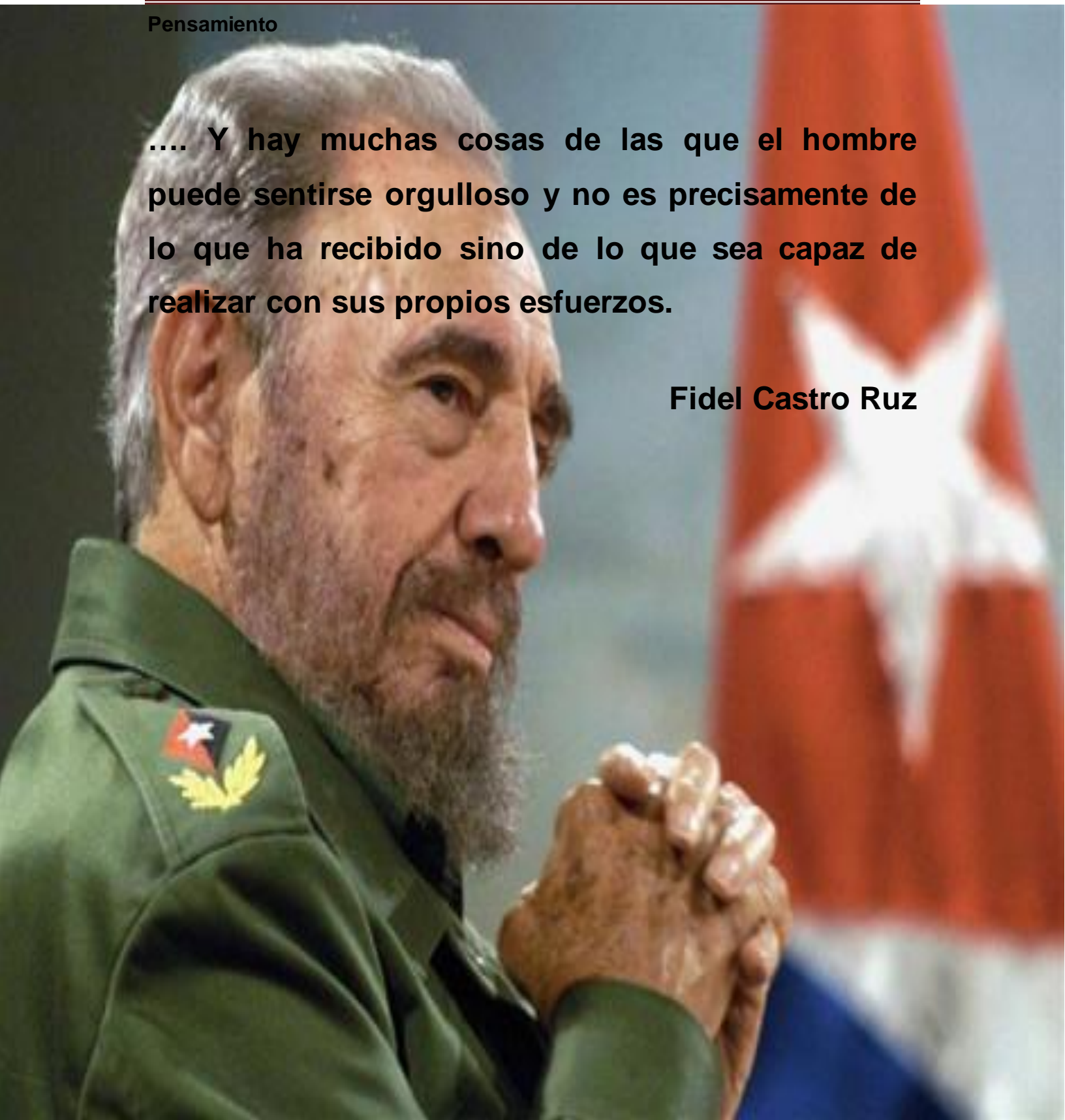
Firma del Tutor

Firma del Tutor

Pensamiento

.... Y hay muchas cosas de las que el hombre puede sentirse orgulloso y no es precisamente de lo que ha recibido sino de lo que sea capaz de realizar con sus propios esfuerzos.

Fidel Castro Ruz



Agradecimientos

1. A Dios por darme la oportunidad de vivir y ser lo que soy.
2. A la revolución y a la universidad que me permitieron estudiar esta carrera.
3. A todos mis profesores por los conocimientos transmitidos durante el aprendizaje como estudiante de la carrera que me ocupa.
4. A mis tutores en especial al Ms. C. Rodney Martínez Rojas por no escatimar tiempo ni esfuerzo en este trabajo de diploma ya que sin su supervisión y dedicación no se habría podido desarrollar dicho trabajo.
5. A mi madre y mi padrastro por aconsejarme y motivarme siempre a lograr mis metas.
6. A mi padrastro y padre que siempre estuvo a mi lado y me aconsejó y apoyó.
7. A mi familia que siempre creyeron en mí y fueron ese impulso que me llevó a realizarme en mi vida profesional.
8. A todos mis vecinos en especial a los compañeros Evelio, Carlo y Yudennis.
9. A mis primos más cercanos Yanquiel, Eric, Marlon, Mark, Conradito, Gleydis, Leidis, Yaime, Yulianela, Yaqubir, Ñeco Arasay y mis amigos, Nilder, Luis Mario y Danner.
10. A mis compañeros de aula Luis Enrique, José David, Rolando, Carlo Abdiel, Robert, Ramón, Norlandis, Orleydis, Raydel, Manuel Alejandro, Ruslen, Carlo, Obet, Luis Mar, Eudis, Lorenzo, Yasser, Luis Yunier, Keiler, Nora Luisa, Ledennis, Aliuska, Mariannis y Iliannis en fin todos aquellos que de alguna manera u otra colaboraron para poderme graduar.

Dedicatoria

Dedico esta obra en primer lugar a La Revolución Cubana por hacer posible nuestros sueños. También deseo dedicar este trabajo:

1. A mi hijo Miguel Alejandro como muestra de esfuerzo para que vea que todo en la vida se puede lograr.
2. A mi madre como muestra del amor infinito y por constituir la fuente de inspiración en todo lo que hago.
3. A mi padrastro por estar conmigo en las buenas y en las malas.
4. A mi hermana Marisleydis y mis sobrinos Edgar y Luciana.
5. A todos mis tíos Birilo, Placido, Maribel, Rosa, Dulce María, Silvano y Elio Eulalio.

A las personas nombradas en esta página y a quienes involuntariamente no he recordado, pero que han contribuido con mi educación, instrucción y formación científico-técnica. A todas, les dedico esta obra.

Resumen

La investigación se fundamenta en la construcción y evaluación de un calentador solar realizado con materiales reciclados, los cuáles se deducen aplicando procedimientos de cálculos teóricos y experimentales que incluyen la eficiencia del colector y el calculo de números de colectores. Para realizar esta evaluación se construyó un calentador solar hecho con materiales no convencionales como: botellas de tereftalato de polietileno (PET) de 1 500 mL, tubos de PVC, pegamento PVC y un tanque de almacenamiento de 25 litros. Se realizo la toma de datos en el mes de mayo del presente año. Se comprobó que el calentado podía lograr una temperatura del agua de salida en un rango de $40 - 60^{\circ} \text{C}$. Se determinó la eficiencia por medio de la energía térmica ganada y la energía solar recibida el cual fue calculada como el área bajo la curva de la radiación solar vs tiempo dando como resultado una eficiencia diaria de un 33%, se calculo el número de colectores que debe tener la instalación, como resultado se demostró que el número de colectores es de uno. Se dio a conocer el impacto medio ambiental y el costo total de dicho calentador dando como resultado final 529,00 CUP.

Abstract

Investigation is based on the construction and evaluation of a solar heater sold off with recycled materials, then which ones deduce themselves applying procedures of theoretic and experimental calculations that include the collector's efficiency and the I calculate of collectors' numbers. You built for yourself a solar heater made with unconventional materials in order to accomplish this evaluation like: Tereftalato's bottles of polyethylene (PET) of 1 500 mL, PVC, glue pipes PVC and a tank of storage of 25 liters. Himself I accomplish the overtaking of data in the month of May of the present year, It Was Checked than the heated could achieve a temperature of the water of exit in a range of $40 - 60^{\circ} \text{C}$. Se determined the efficiency by means of the won steam-generated power and the received solar energy which was calculated like the softly area curved of the solar radiation vs time giving as a result a 33 %'s daily efficiency, from now on himself I calculate collectors' number that must have the installation, as a result it was proven that collectors' number is of one. It was told someone to know the half environmental impact and the total cost of the aforementioned heater giving 529.00 CUP as a result final.

Índice

Introducción.....	1
Capítulo I. Marco Teórico	4
1.1.Introducción.....	4
1.2.Reseña histórica.....	4
1.3.Energía, tipos de manifestación y clasificación.....	8
1.4.Energía solar.....	10
1.4.1.Ventajas y desventajas de la energía solar	11
1.4.2 Radiación solar	12
1.5.Transferencia de Calor.....	13
1.5.1 .Transferencia de calor en la ingeniería	14
1.6.Calentamiento de agua	17
1.7.Calentadores solares.....	18
1.7.1Partes del calentador solar	19
1.7.2.Tipos de colectores solares para calentar agua.....	20
1.8.Principio de funcionamiento del sistema	23
1.9.Calentamiento de agua para uso hogareño	24
1.10.Requisitos para su instalación	25
1.11.Conclusiones del capítulo I	26
Capítulo II. Materiales y Métodos	28
2.1.Introducción.....	28
2.2.Aspectos iniciales.....	28
2.3.Diseño del colector	30
2.4.Materiales a emplear en la construcción del calentador solar doméstico.	31
2.5. Procedimiento para la construcción, preparación y ensamble del calentador solar.....	31
2.6.Aislante térmico para el termotanque	33
2.6.1.Poliespuma como aislante térmico.....	33
2.7.Orientación e inclinación del colector	34

2.8.Procedimiento de cálculo para determinar la eficiencia térmica del colector solar.....	35
2.8.1.Cálculo de la eficiencia del colector solar plano	36
2.8.2.Cálculo del número de colectores	40
2.9.Instrumentos de medición.....	42
2.9.1.Termómetros	42
2.9.2.Medición del caudal.....	42
2.9.3.Medición de las condiciones meteorológicas.....	43
2.10 Conclusiones de capítulo II	43
Capitulo III: Análisis de los resultados	45
3.1.Introducción.....	45
3.2.Calentador solar diseñado con botellas PET	45
3.3.Localización y orientación.	46
3.4.Procedimiento para determinación del flujo de agua del colector de botellas reciclables	46
3.5.Determinación del comportamiento ^{oo} del colector, en función de la radiación solar presente.	48
3.6.Datos técnicos del calentador solar de botella PET construido	51
3.7.Cálculo del rendimiento del colector solar	51
3.8.Número de colectores	53
3.9.Valoración Económica	53
3.10.Impacto Medio Ambiental	54
3.11.Conclusiones del capítulo III	55
Conclusiones Generales.....	56
Recomendaciones.....	57
Referencia Bibliográfica.....	58
Anexos	

Introducción

Es imposible pensar en el desarrollo contemporáneo, y mucho menos en el desarrollo sostenible, sin tener en cuenta el factor energía. El consumo de energía eléctrica es uno de los principales índices que se mide en todos los países para caracterizar el desarrollo. Mientras más electricidad se consuma, menos desarrollado se puede alcanzar. En el mundo actual hay una fuerte tendencia en el aprovechamiento de las fuentes renovables de energía, dígase energía solar térmica y fotoeléctrica, la eólica, la hidroeléctrica, entre otras. La revolución energética cubana hace énfasis en el empleo de estas fuentes ya que son estables y económicas esto se evidencia en la aplicación de los parques eólicos en lugares donde hay fuertes velocidades de viento, pero esta manera de utilizar esta energía no es aplicable en todos los lugares. Cuba es un país tropical y el potencial solar es parejo en todo el territorio nacional por lo que se puede pensar mucho en el aprovechamiento de este recurso renovable mediante los calentadores solares.

Los calentadores solares de agua son sistemas que calientan el agua sólo con la energía proveniente del sol y de la claridad, lo interesante es que no consume ninguna clase de combustible, estas unidades son aparatos que utilizan el calor del sol para funcionar, el uso más común y totalmente práctico se lo aplica en ambientes domésticos, en hoteles, industrias o en otros sectores que contribuyan a mejorar la calidad de vida del planeta.

El calentamiento solar de agua realizados con materiales reciclables para consumo doméstico, como alternativa para sustituir los calentadores tradicionales (eléctricos, gas), es una opción desde el punto de vista de ahorro energético donde es la más favorable, ya que en estos sistemas, la fuente de calor es la radiación solar, la cual sustituye los combustibles fósiles ó la electricidad.

Al reducir el uso de combustible fósiles y utilizar esta energía orientada a la eficiencia, se lograra crear un futuro mejor, he aquí la importancia de aprovechar la luz del sol como fuente energética gratuita, que puede liberar a las personas de

la dependencia de combustibles o otra alternativas que no contaminan nuestro entorno.

A partir de las cuestiones planteadas puede afirmarse como **situación problémica** hoy en día, el consumo de energía proveniente de los hidrocarburos y la electricidad ha incrementado sus costos económicos y ambientales, debido al agotamiento de estos recursos naturales no renovables es necesario buscar métodos para el uso de la energía renovable como es la energía solar. Según Santana (2013) Cuba por su ubicación recibe una radiación promedio anual de 5 kW/hm², se considera además que en un hogar cubano se consume aproximadamente el 14 % de la energía eléctrica para calentar agua en las casas, en cuanto a un calentador solar de agua aprovechando materiales reciclables podemos sustituir el uso de gas y electricidad.

Es por eso que se declara como **problema**: la necesidad de evaluar la eficiencia de un calentador solar de agua para consumo doméstico, construido con materiales reciclables para uso doméstico.

Se establece como **objeto de estudio**: Los calentadores solares de agua.

Como **campo de acción** se declara: la eficiencia de los calentadores solares.

Se define como **objetivo general**: evaluar la eficiencia de un calentador solar de agua construido con materiales reciclables para uso doméstico.

Sobre la base del problema a resolver y el objetivo planteado se establece la siguiente **hipótesis**:

La evaluación de los parámetros operacionales como: flujo de agua, temperatura agua de entrada y de salida, así como su diseño constructivo, permitirá establecer la eficiencia del calentador solar construido con materiales reciclables para uso doméstico.

Los **objetivos específicos** a realizar son:

1. Realizar el diseño y construcción del calentador solar con materiales reciclables.

2. Evaluar el funcionamiento y puesta en marcha del calentador solar a partir de sus parámetros operacionales.
3. Calcular la factibilidad de la construcción del calentador solar con materiales reciclables

Las **tareas** a realizar para el cumplimiento de estos objetivos:

1. Establecimiento del estado del arte a través de una búsqueda bibliográfica actualizada sobre los calentadores solares de agua para uso doméstico elaborado con material reciclable.
2. Diseño y construcción del calentador solar de agua con materiales reciclables
3. Evaluación de los parámetros operacionales del calentador solar construido.
4. Determinación de los costos de construcción del calentador solar con materiales reciclables.

Capítulo I. Marco Teórico

1.1. Introducción

Los calentadores solares se utilizan para calentar alguna sustancia, como puede ser agua, glicol, salmuera, aceite entre otras; con la energía proveniente del sol. El calentamiento de agua mediante energía solar, va más allá de ser una alternativa ecológica, se ha convertido en una tecnología económicamente atractiva. Por tanto se debe realizar el diseño y evaluación de un calentador solar, en donde se definen los principios y conceptos básicos para contar con una buena tecnología que en realidad no es reciente, sino poco atendida en nuestro medio.

El **objetivo** del presente capítulo es: establecer el estado del arte, a partir de la revisión bibliográfica relacionada al tema de calentadores solares para uso doméstico.

1.2. Reseña histórica

Según Delgado, (2006) las primeras investigaciones para captar y explotar la energía solar se remontan a la antigüedad. Los egipcios descubrieron el efecto del vidrio, el hecho de que un cuerpo expuesto al Sol en un recipiente de vidrio se calienta más que al aire libre.

Hacia el año 100 D. C, Herón de Alejandría construyó un dispositivo para bombear agua con ayuda de la radiación solar. Arquímedes incendió una flota en el siglo III con ayuda de pequeños espejos planos agrupados de manera de formar grandes espejos cóncavos.

En el siglo XIII Lavoisier realizó el primer horno solar concentrando la energía con ayuda de una lente con líquido, obtuvo la temperatura de fusión del platino. En 1615, Salomón de Gauss construyó una bomba solar. En el siglo XVIII, el Suizo Saussure construye varias máquinas solares que consistían de dos vidrios planos sobre la faz orientada hacia el sol a fin de aumentar el efecto del vidrio.

Durante los años 1800, los requerimientos de la higiene, los avances tecnológicos y el superior bienestar material se combinarían para producir una mayor demanda

de agua caliente. La teoría de Pasteur de la enfermedad por los gérmenes subrayaba la necesidad de un baño frecuente en agua templada. Desgraciadamente, calentar el agua seguía siendo una tarea laboriosa y prolongada para los americanos, habitantes en su mayoría de pequeñas ciudades y áreas rurales que carecían de gas o electricidad. La situación era algo mejor en las grandes ciudades. En ellas había calentadores a gas, alimentados por gas artificial el cual solo tenía la mitad de la capacidad calórica del gas natural. El tipo más frecuente de calentador a gas era el de (brazo latera). Además de ser peligroso, el uso de estos primitivos calentadores a gas resultaba demasiado caro para numerosas familias.

Afortunadamente, se descubriría un modo mucho más fácil y barato de calentar agua, el depósito metálico de agua pintado de negro y simplemente colocado donde daba más el sol y menos la sombra. El problema con estos rudimentarios calentadores solares no era su capacidad de producir agua caliente, sino el cuándo y durante cuánto tiempo. Incluso en días despejados y calurosos el agua tardaba desde la mañana hasta primeras horas de la tarde. Estos inconvenientes llamaron la atención de Clarence M. Kemp, inventor e industrial de Baltimore, que en 1891 había patentado un dispositivo donde se combinaban la vieja práctica de la exposición de depósitos metálicos desnudos al sol con el principio científico de la caja caliente, incrementando así la capacidad del depósito para captar y retener el calor solar. Kemp puso a su invento el nombre de Climax y este se convirtió en el primer colector solar de agua.

Desde la vuelta del siglo hasta 1911 más de una docena de inventores registraron patentes para mejorar el Climax. Más solo unos pocos diseños resultaron técnica y comercialmente satisfactorios. Uno de estos sería el patentado en primavera de 1898 por el contratista y corredor de fincas de los Angeles Frank Walker. El calentador Walker contaba sólo con uno o dos depósitos cilíndricos de 113 litros. Los depósitos iban también en el interior de una caja con tapa de vidrio. Pero la mayor ventaja del calentador Walker frente al Climax era que aquél iba conectado al sistema de agua caliente convencional a fin de asegurar su provisión

interrumpida. Por la noche o durante el mal tiempo, el agua fría en la base del depósito solar descendía por una cañería al serpentín de calentamiento instalado dentro de la cocina de leña o carbón o en el calentador de gas. Después (el agua caliente que es menos densa que la fría y asciende por si sola), subía por una segunda cañería hasta la parte alta del depósito en el tejado. La gente encontraba este sistema más conveniente y barato porque ya no se necesitaban dos redes de tuberías (una para el calentador solar y otra para el convencional).

En 1905 los derechos de fabricación y ventas del Climax en California fueron adquiridos por una filial de la Solar Motor Company (la firma fundada por Aubrey Eneas). Charles Haskell dirigía la central en los Ángeles del negocio de Eneas, inscrita bajo el nombre de Solar Heater Company. Haskell introdujo una modificación sustancial en el diseño de los depósitos de agua del Climax. Dándose cuenta de que la relativamente profunda masa de agua contenida en los cuatro depósitos cilíndricos tardaba muchas horas en calentarse, decidió sustituirlos por un gran tanque rectangular de escasa profundidad. El volumen total de agua continuaba inalterado pero, al haber menor cantidad de la misma por metro cuadrado, el calor del sol penetraba con más celeridad y se tardaba mucho menos en disponer de agua caliente. Al igual que el modelo de Walker, el de Haskell se conectaba generalmente a un sistema convencional de calentamiento de agua que entraba en acción durante el mal tiempo.

En el verano de 1909, en una pequeña tienda al aire libre del suburbio Monrovia de los Angeles, un ingeniero llamado William J. Bailey comenzó a vender un calentador solar de agua que revolucionaría la industria. No sólo suministraba agua calentada solarmente mientras lucía el sol, sino asimismo durante horas después de haber ya anochecido y también a la mañana siguiente; de donde su nombre: el Día y Noche. El colector consistía en un serpentín colocado en el interior de un cajón con tapa de vidrio suspendido sobre el muro sur de su casa. El reducido volumen de agua contenido dentro del serpentín se calentaba rápidamente. Y en lugar de permanecer al exterior (donde se hubiera enfriado en seguida por la noche o durante el mal tiempo) el agua caliente corría por una

tubería hasta un depósito convencional situado en la cocina. El colector Día y Noche estaba mejor diseñado que los anteriores calentadores. Característica fundamental del mismo era el uso de tubería de cobre, que alojaba solamente una pequeña cantidad de agua, pero aún más importante fue la adición por Bailey de una lámina metálica de absorción para transmitir el calor solar acumulado en la caja caliente al agua en el interior de las estrechas tuberías.

Los tubos y la placa del colector se contenían en una caja con cubierta de cristal y superficie de 5 metros cuadrados. Con sus solo 10 centímetros de profundidad, la caja estaba revestida de papel de fieltro. Bailey dispuso un tubo vertical de hierro para entrada de agua fría a un extremo de la caja, y el correspondiente para salida de agua caliente al otro extremo de la caja. A ambas columnas conectó una serie de tubos transversales menores en cobre de 5/8 de pulgada, soldadas a una placa absorbente de cobre dispuesta en el fondo de la caja y pintando el conjunto de negro mate. En el sur de California el sistema producía agua más caliente que los anteriores calentadores (de 37 a 47° C los días soleados de invierno y de 35 a 67 ° C los restantes nueve meses del año). No se necesitaba bomba para impulsar el agua entre el colector y el depósito acumulador. El Día y Noche operaba según el principio de termosifón.

En 1931, Ewald decidió impulsar nuevamente el negocio de los calentadores solares de agua. Para esto examinó el serpentín solar para ver si su rendimiento era susceptible de mejora y realizó los siguientes cambios: El equipo era totalmente metálico, construyendo la caja del colector de chapa de acero galvanizada y el forro del tanque acumulador de hierro galvanizado. Aisló la base y los costados de la caja del colector. Sustituyó asimismo la tubería de acero por otra de cobre blando, mejor conductor del calor y también más resistente a la rotura por hielo. Duplicó el número de serpentines. Ewald patentó su nuevo diseño bajo el nombre de Duplex.

Según Alano, (2002) comúnmente se desecha a la basura material que puede servir para crear artefactos que puedan utilizarse, ayudando a que otras personas puedan vivir mejor. En este caso encontramos las botellas de refresco de un litro y

medio. El material utilizado para estos envases es el tereftalato de polietileno (más conocido por sus siglas en inglés como PET). Algunas de las características con las que cuenta este polímero son la alta resistencia al desgaste y a la corrosión, la transparencia y es un material que puede reciclarse. Considerando estas características y que es un material que se adquiere con gran facilidad, se optó por realizar un calentador solar ecológico utilizando botellas de PET, dándole una reutilización y evitando la contaminación con este material de desecho.

El brasileño José Alano inventó el primer panel solar para la producción de agua caliente hecho con botellas de plástico y cajas tetra pack. La iniciativa de Alano ha tenido un gran éxito en Brasil, sobre todo a partir de ser premiado en 2004, por la revista sobre proyectos renovables sin ánimo de lucro. En 2002 José Alano, mecánico retirado, transformó una pila de botellas PET y envases de tetra pack en un colector solar. Desde entonces miles de personas en Brasil se han beneficiado de su invento, ahorrando dinero y energía, y contribuyendo a reducir el volumen de desechos plásticos. La idea surgió a partir de la falta de infraestructura para el reciclaje en su ciudad de origen, Tubarao. Durante años se dedicó a almacenarlo, pero ante la cantidad ingente de material decidió buscarle un uso. Con sus conocimientos básicos en colectores solares construyó junto a su esposa una versión alternativa con 100 botellas de plástico y 100 envases de leche. El resultado fue muy positivo, un funcionamiento perfecto y a la vez una manera responsable de deshacerse de los residuos. El funcionamiento es similar al de los sistemas comerciales y puede calentar agua hasta 38°C en invierno y hasta más de 50°C en verano.

1.3. Energía, tipos de manifestación y clasificación

La palabra energía se define como una propiedad ó atributo de un cuerpo ó sistema material en virtud de la cual, éstos pueden transformarse modificando su situación o estado así como actuar sobre otros, originando procesos de transformación en ellos.

Existen diferentes tipos de manifestaciones de la energía por mencionar algunos:

Gravitatoria	Cinética	Química	Eléctrica
Magnética	Nuclear	Radiante	

Las fuentes de energía pueden clasificarse de dos formas:

- ❖ Renovables
- ❖ No Renovables

Las fuentes de energía según Conde *et al.* (2014) son aquellas que existen en la naturaleza en una cantidad limitada. No se renuevan a corto plazo y por eso se agotan cuando se utilizan, la demanda mundial de energía en la actualidad se satisface fundamentalmente con este tipo de fuentes energéticas como son: el carbón, el petróleo, el gas natural y el uranio.

Existen dos formas de aprovechamiento de la energía solar: la energía solar térmica y la energía solar fotovoltaica.

- ✓ El aprovechamiento de la energía solar térmica consiste en utilizar la energía calorífica obtenida a través de la radiación del Sol para calentar un fluido que, en función de su temperatura, se emplea para producir agua caliente e incluso vapor.
- ✓ El aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica se realiza a través de la transformación directa de la energía solar en energía eléctrica mediante el llamado efecto fotovoltaico. Esta transformación se lleva a cabo mediante células fotovoltaicas que están fabricadas con materiales semiconductores (por ejemplo, silicio) que generan electricidad cuando incide sobre ellos la radiación solar.

Las fuentes de energía son aquellas que existen en la naturaleza en una cantidad limitada. No se renuevan a corto plazo y por eso se agotan cuando se utilizan, la demanda mundial de energía en la actualidad se satisface fundamentalmente con este tipo de fuentes energéticas como son: el carbón, el petróleo, el gas natural y el uranio.

1.4. Energía solar

La energía solar es la energía contenida en la radiación solar que es transformada mediante los correspondientes dispositivos, en forma térmica o eléctrica, para su consumo posterior, donde se necesite. El elemento encargado de captar la radiación solar y transformarla en energía útil es el panel solar, pudiendo ser de dos clases: captadores solares térmicos y módulos fotovoltaicos como se muestra en la figura 1.1 y 1.2:



Figura 1.1. Captadores solares térmicos



Figura 1.2. Módulos fotovoltaicos

La energía solar térmica consiste en el aprovechamiento de la energía procedente del sol para transferirla a un medio portador de calor, generalmente agua o aire. La tecnología actual permite también calentar agua con el calor solar hasta producir vapor y posteriormente obtener energía eléctrica.

Según Conde *et al.* (2014) la cantidad de energía interceptada por nuestro planeta es 170 billones de kW, una cifra cinco veces mayor a la suma de todas las demás energías. De esta cantidad el 30% es reflejado al espacio, 47% convertido en calor a baja temperatura y vuelto a radiar al espacio y el 23% acciona el ciclo de evaporación-condensación de la atmosfera; menos del 0,5% es representado en forma de energía cinética.

Algunos ejemplos en donde interviene la energía solar son:

- La radiación solar directa, que es aprovechada por las plantas para llevar a cabo el proceso de la fotosíntesis.
- La energía solar provoca el calentamiento de las masas de aire, las cuales, chocan con masas de aire frío dando origen al viento.
- La evaporación de los océanos da como resultado la lluvia.

De la energía solar se puede obtener calor y electricidad, es por ello que el estudio de la energía solar se lleva a cabo en base a las necesidades del ser humano. La radiación solar llega a nuestro planeta de 3 formas:

- La radiación directa es toda radiación incidente que no sufre ningún cambio en su trayectoria. Esta radiación es la causante de las sombras y además la que predomina en un día soleado.
- La radiación difusa es toda la energía que llega después de haber incidido en cualquier momento con cualquier elemento de la atmósfera (polvo, nubes, contaminantes, etc.) por lo que la trayectoria es desviada. Este tipo de radiación es predominante en los días nublados.
- La radiación reflejada o albedo es la radiación reflejada por la superficie terrestre, la reflexión depende mucho de la zona donde incide la radiación, ya el ángulo de dispersión es diferente en nieve y en agua.

1.4.1. Ventajas y desventajas de la energía solar

Actualmente en nuestro país hay gran necesidad del calentamiento de agua por medio de gas o electricidad. El precio de dichos combustibles en el país es alto y aumenta más con el tiempo, pero varias empresas se han dedicado a la investigación y desarrollo de tecnología para aprovechar las energías renovables para producir recursos que hagan que nuestras viviendas se vuelvan sustentables. A continuación se evidenciarán las ventajas y desventajas de los calentadores solares según Tenemasa (2017).

Ventajas:

- ✓ El sol es una fuente de energía renovable, energía limpia que no tiene emisiones que pueden causar problemas en el ambiente y el cambio

climático.

- ✓ No hay costos involucrados con el uso de energía solar más que los costos de fabricación de los componentes, la compra e instalación. Después de la inversión inicial no hay ningún costo adicional asociado con su uso.
- ✓ No se gastará en combustibles, a manera que el uso de la energía solar aumenta, nuestra demanda de combustibles fósiles disminuye. Esto ampliará el tiempo antes de que nuestro suministro de combustibles fósiles como: petróleo, gas natural, entre otros, expire o que los costos sean tan elevados que sólo los ricos puedan permitírselos.
- ✓ Entre las principales ventajas de los sistemas que utilizan la energía solar ciertamente se puede citar la fiabilidad y durabilidad, se estima 15 a 20 años en promedio.

Desventajas:

- ✓ Tecnologías más complejas, pero accesibles al medio.
- ✓ Una desventaja lamentable de esta fuente de energía son los costos asociados con la compra e instalación de un sistema solar.
- ✓ Baja aceptación social, por el desconocimiento de los beneficios económicos y ambientales de esta fuente de energía.

1.4.2 Radiación solar

Según Guevara (2003), la energía solar, como recurso energético terrestre, está constituida simplemente por la porción de luz que emite el Sol y que es interceptada por la Tierra. La intensidad de la radiación solar en el borde exterior de la atmósfera, considerando la distancia promedio entre la Tierra y el Sol, se llama constante solar, y su valor medio es 1353 W/m^2 , la cual varía en un 0,2% en un período de 30 años. La intensidad de energía real disponible en la superficie terrestre es menor que la constante solar, siendo alrededor de 1000 W/m^2 , debido a la absorción y a la dispersión de la radiación que origina la interacción de los fotones con la atmósfera. Esta porción de energía se conoce como radiación directa. Otra parte de la energía solar que llega a la superficie de la tierra se denomina radiación difusa que es aquella energía solar reflejada por la atmósfera

terrestre, en especial por las nubes. Además, a nivel del suelo se tiene la radiación reflejada que es parte de la energía reflejada por los objetos terrestres. Por ejemplo, la proveniente de una pared blanca, un charco de agua o un lago.

Radiación total es la suma de las radiaciones directa, difusa y reflejada que se reciben sobre una superficie. De otra parte, en el diseño de calentadores solares, la radiación que interesa es la que llega a la parte superior de la superficie horizontal del colector solar. En este caso, se puede considerar la falta de radiación reflejada y por lo tanto, la energía que recibe el colector solar se le denomina como radiación global. De este modo, la radiación global es la suma de las radiaciones directa y difusa donde se muestra en la figura 1.3: radiación solar que incide en los calentadores solares.

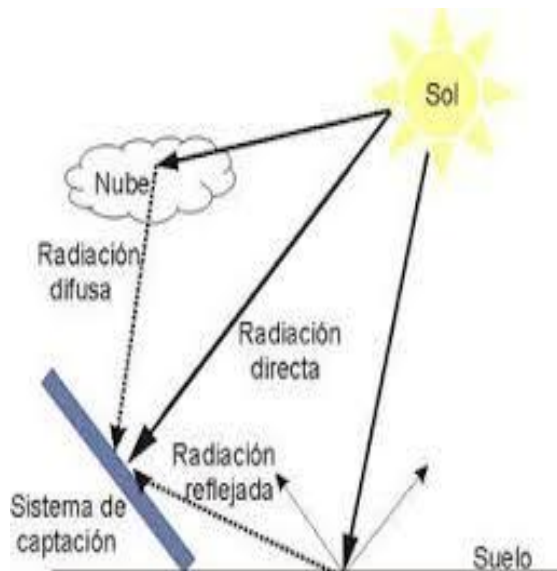


Figura 1.3. Radiación solar que incide en los calentadores solares

1.5. Transferencia de Calor

El estudio de la termodinámica según Conde *et al.* (2014) nos refiere a la transferencia de energía mediante las interacciones de un sistema con su alrededor. En estas interacciones aparece el concepto de trabajo y calor. Sin embargo, la termodinámica trata sistemas en equilibrio; puede usarse para predecir la cantidad de energía requerida para llevar un sistema desde un estado

de equilibrio a otro; no puede usarse, en cambio, para predecir lo rápido que será el cambio, ya que el sistema no está en equilibrio durante el proceso.

La transferencia de calor es la ciencia que trata de predecir el intercambio de energía que puede tener lugar entre cuerpos materiales, como resultado de una diferencia de temperatura. La ciencia de la transferencia de calor pretende no sólo explicar cómo la energía térmica puede ser transferida, sino también predecir la rapidez con la que, bajo ciertas condiciones específicas, tendrá lugar esa transferencia.

La transferencia de calor complementa los principios primero y segundo de la termodinámica, al proporcionar leyes experimentales adicionales que se usan para establecer la rapidez de la transferencia de energía.

1.5.1. Transferencia de calor en la ingeniería

Desde el punto de vista de la ingeniería (Conde et al. 2014), la determinación de la rapidez de transferencia de calor a una diferencia de temperaturas especificada constituye el problema principal. Con el objeto de estimar el costo la factibilidad y el tamaño del equipo necesario para transferir una cantidad determinada de calor en un tiempo dado debe realizarse un detallado análisis de transferencia de calor. Por ejemplo las dimensiones de las calderas, calentadores, refrigeradores y cambiadores de calor dependen no solo de la cantidad de calor que deba ser transmitido, sino también, de la rapidez con que deba transferirse el calor bajo condiciones dadas. Así mismo en el diseño de máquinas, rodamientos, transformadores, colectores solares, etc. Debe hacerse un análisis de transferencia de calor con el objeto de evitar las condiciones que provocaran sobre calentamiento y daño al equipo. Estos distintos ejemplos muestran que en casi todas las ramas de la ingeniería se encuentran problemas relacionados con la transferencia de calor que no puede resolverse con un simple análisis termodinámico.

Tanto en la transferencia de calor, como en otras ramas de la ingeniería, la solución adecuada de un problema requiere hipótesis e idealizaciones. Es casi

imposible descubrir los fenómenos físicos en forma exacta y para expresar un problema en forma de una ecuación que pueda resolverse, es necesario hacer algunas aproximaciones. Cuando se considere necesario formular una hipótesis o una aproximación en la solución de un problema, el ingeniero debe confiar en su habilidad y experiencia. Por ello es necesario conocer y planear el fenómeno físico involucrado en el problema dado.

En la transferencia de calor existen mecanismos de transferencia de calor como son:

- ✓ Conducción
- ✓ Convección
- ✓ Radiación

La conducción es la forma de transferir calor mediante la cual el calor fluye y existe un intercambio de energía que va de una región de mayor temperatura a una de menor temperatura dentro de un medio (sólido, líquido o gaseoso) o entre medios diferentes en contacto físico directo, se da por el movimiento cinético o el impacto directo de las moléculas como en el caso de fluidos en reposo o por el arrastre de los electrones, como es el caso de los metales. La energía posee un elemento de materia debido a la velocidad y a la posición relativa de las moléculas, a esto se le conoce como energía interna. Por tanto, para un elemento dado de materia, mientras más rápidamente se muevan sus moléculas, mayor será su temperatura y su energía interna. Cuando las moléculas de una región adquieren una energía cinética media mayor que la de las moléculas de una región adyacente, lo que se manifiesta por una diferencia de temperatura, las moléculas que poseen mayor energía en transmitirán parte de ella a las moléculas de la región más baja temperatura. La conducción (Conde et al. 2014) se expresa como ecuación de la siguiente manera:

$$q''_{\text{cond}} = k \frac{\Delta T}{L} \quad (1.1)$$

q''_{cond} – Transferencia de calor: W/m^2

k – Coeficiente de transferencia de calor por conducción: W/mK

ΔT – Variación del tiempo: K

L: Longitud: m

La convección es un proceso de transporte de energía por acción combinada de conducción de calor, almacenamiento de energía y movimiento de mezcla. Cuando un fluido en movimiento pasa sobre un cuerpo sólido o fluye dentro de un canal y si las temperaturas del fluido y del sólido o del canal son diferentes, habrá transferencia de calor entre el fluido y la superficie sólida debido al movimiento relativo entre el fluido y la superficie. La transferencia de calor por convección se clasifica de acuerdo con la forma de inducir el flujo, en convección libre y convección forzada. (Conde *et al.* 2014)

Cuando el movimiento mezclado tiene lugar exclusivamente como resultado de la diferencia de densidades causado por gradientes de temperatura, se refiere a una convección natural o convección libre.

Cuando el movimiento de mezclado es inducido por algún agente externo, tal como una bomba o un agitador, en proceso se conoce como convección forzada.

La convección se expresa como ecuación de la siguiente manera:

$$q''_{conv} = h (T_s - T_{\infty}) \quad (1.2)$$

Donde:

q''_{conv} - Transferencia de calor: W/m²

h – Coeficiente de transferencia de calor por convección: W/m²K

T_s – Temperatura de la superficie: °C

T_{∞} - Temperatura del fluido: °C

La radiación es el proceso mediante el cual fluye calor de un cuerpo de mayor temperatura a uno de menor temperatura, cuando dos cuerpos de temperaturas diferentes están separados por un vacío perfecto. No es posible la transferencia de calor entre ellos por los otros dos medios; en tal caso la transferencia de calor ocurre mediante radiación térmica. Es decir, la energía radiante emitida por un cuerpo debido a su temperatura, es transmitida hacia el espacio en forma de ondas electromagnéticas de acuerdo con la teoría clásica de Maxwell o en forma

de fotones discretos, de acuerdo con la hipótesis de Planck. El término radiación es aplicado a toda clase de fenómenos de ondas electromagnéticas, pero en transferencia de calor, son de interés los fenómenos que son resultado de la temperatura y por medio de los cuales se establece un transporte de energía a través de un medio transparente o a través del espacio. La radiación (Conde *et al.* 2014) se expresa como ecuación de la siguiente manera:

$$q''_{rad} = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (1.3)$$

Donde:

q''_{rad} - Transferencia de calor: W/m^2

ε - Emisividad: W/m^2

σ - Constante de Estefan Boltzman: $5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2 K^4$

T_s - Temperatura de la superficie: K

T_{sur} - Temperatura de los alrededores: K

1.6. Calentamiento de agua

El calentamiento de agua es una de las soluciones más obvias y necesarias en la vida cotidiana, la forma más popular de calentar agua en el hogar es simplemente usar: carbón, gas o petróleo.

En Cuba en la zona oriental (Moa, Holguín), según Arranz (2019) calentar agua puede resultar una tarea muy sencilla y más con la alta radiación disponible de un clima tropical. Solo bastaría exponerla al sol unas horas para conseguir elevar la temperatura del agua, ya que los usos habituales en este sector residencial requieren una temperatura de 35-40° C fácilmente alcanzables con unas pocas horas de exposición solar. Sin tener que recurrir a costosos modelos comerciales de importación, ya que, al tratarse Cuba de un lugar sin demasiados recursos económicos ni materiales, así como pocas libertades para determinadas importaciones, se estudia la posibilidad de una tecnología apropiada para el calentamiento de agua. También se busca cubrir esta necesidad con los medios materiales y humanos que pueden encontrarse en la zona, teniendo en cuenta en todo momento la disponibilidad y los costes totales.

En la actualidad, se realizan diferentes prototipos de calentadores solares no comerciales, obteniendo unos rendimientos que nunca llegan al que puede dar uno comercial, pero que son capaces de cubrir las necesidades a partir de los recursos disponibles en el entorno ver figura 1.4.

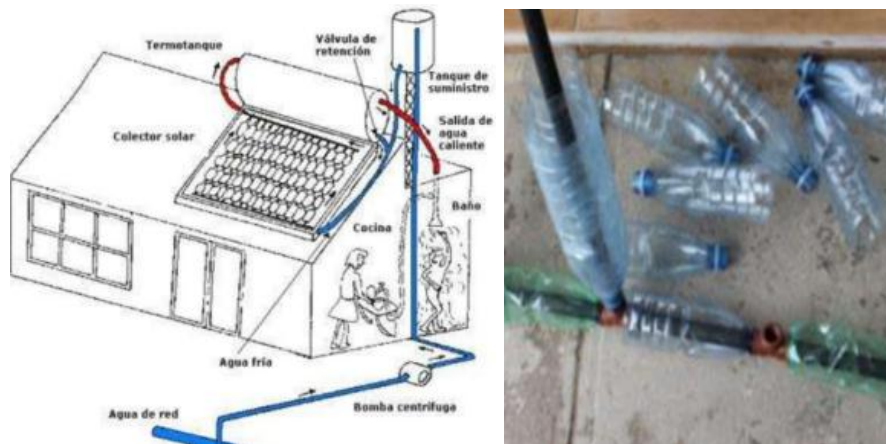


Figura 1.4. Prototipo de calentador con botellas de plástico y su instalación.

1.7. Calentadores solares

El calentador solar o paneles térmicos es un sistema que calienta agua sólo con la energía proveniente del sol y sin consumir gas o energía eléctrica. Se encuentran en uso dos tipos básicos de calentadores: el sistema pasivo, por circulación natural y el sistema activo, con circulación forzada. Los sistemas pasivos son relativamente poco costosos, no requieren mantenimiento y duran bastante porque no hay partes movibles que se desgasten; mientras que los sistemas activos son más costosos porque requieren la instalación de equipo especial.

Los colectores solares son el corazón de cualquier sistema de utilización de la energía solar: absorbe la luz solar y la transforma en calor.

Los criterios básicos para seleccionarlo son:

- ✓ Productividad energética a la temperatura de trabajo y costo.
- ✓ Durabilidad y calidad.
- ✓ Posibilidades de integración arquitectónica.
- ✓ Fabricación y reciclado no contaminante.

1.7.1 Partes del calentador solar

El calentador solar de agua consta de dos partes fundamentales:

- a) Tanque de almacenamiento
- b) El colector solar

Tanque de almacenamiento como se muestra en la figura 1.5 es componente básico del calentador solar y de cuya configuración depende que el agua calentada en el colector, se mantenga disponible el mayor tiempo posible al estar debidamente aislado para evitar que el agua se enfríe durante la noche. El proceso de calentamiento del agua en el colector solar tiene lugar usualmente entre las 9 y las 15 horas, luego de lo cual la temperatura del agua en el colector es menor que en la parte superior del tanque de almacenamiento interrumpiéndose el proceso de termosifón natural, permaneciendo el agua caliente en el tanque de almacenamiento, cuya temperatura depende explícitamente del aislamiento dispuesto a su alrededor (Valera, 2007).

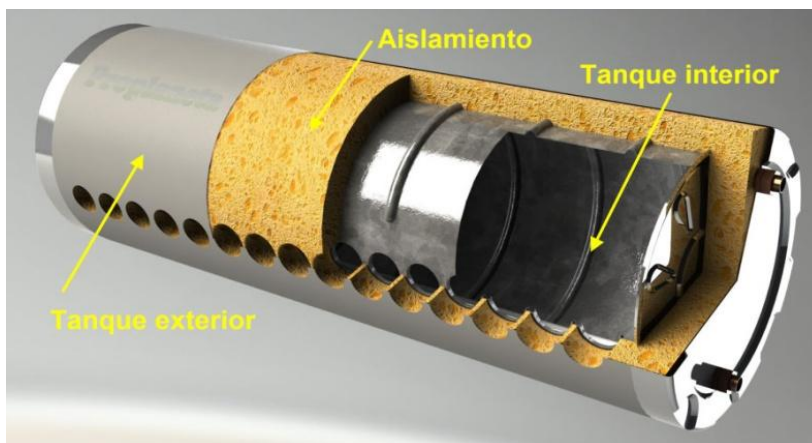


Figura 1.5. Tanque de almacenamiento

El colector solar es el elemento que contiene a la parrilla de tubos protegiéndolas a su vez las pérdidas de temperatura y las inclemencias del tiempo, está cubierta con una superficie transparente que permite el paso de la radiación solar con una orientación en forma perpendicular a los rayos del sol, donde se captura la energía del sol y se transfiere al agua (Burbano et al. 2006). Ver Figura 1.6

El colector a su vez consta de las siguientes partes:

- ✓ Caja: Elemento metálico que contiene a los demás elementos.
- ✓ Absorbedor: Elemento encargado de transformar la radiación solar en calor. Se trata de una superficie de color negro de diferentes características según el tipo de colector.
- ✓ Cubierta: Elemento transparente encargado de provocar el efecto invernadero dentro de la caja para aumentar la temperatura y el aprovechamiento del calor por el absorbedor.

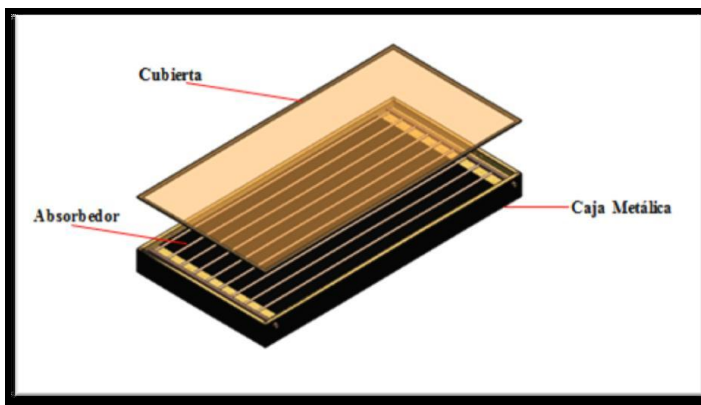


Figura 1.6. Colector solar

1.7.2. Tipos de colectores solares para calentar agua

- Colectores de placa plana con cubierta

Los colectores de placa plana son los más usados para calentar agua en los hogares y para los sistemas de calefacción. Un colector de placa plana se compone básicamente de una caja metálica con aislamiento, una cubierta de vidrio o de plástico y una placa absorbente de color oscuro. La radiación solar es absorbida por la placa, que es de un material que transfiere rápidamente el calor a un fluido que circula a través de la parrilla de tubos colocada sobre esta placa del colector. Tienen la ventaja que pueden utilizar la radiación solar difusa (reflejada a través de las nubes), aparte de la radiación directa. Un colector plano puede dar temperaturas entre 65-90°C con una eficiencia promedio 40 - 60% (Placeo et al. 2006). Ver figura 1.7.

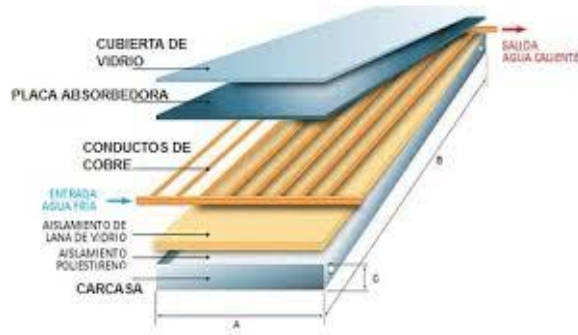


Figura 1.7. Colectores de placa plana con cubierta.

- Colectores concentradores parabólicos compuestos (CPC) estacionarios

Su funcionamiento e instalación es exactamente la misma que los colectores de placa plana convencionales. Poseen un sistema de concentración de radiación solar tipo concentradores parabólicos compuestos, para obtener temperaturas más elevadas y un mayor rendimiento. Estas características se deben a que el área de pérdidas es menor al área de colección logrando minimizar las pérdidas de calor y alcanzar un rendimiento cercano al 50% (Placeo et al. 2006). Ver figura 1.8.



Figura 1.8. Colectores concentradores parabólicos compuestos (CPC) estacionarios.

- Colectores de placa plana sin cubierta

Este tipo de colectores, sencillos y baratos, consisten de un absorbente pero carecen de la cubierta transparente. No incluyen ningún aislamiento adicional, de

manera que la ganancia de temperatura queda limitada a unos 20°C sobre la del aire del ambiente, son los más adecuados para aplicaciones de baja temperatura. Los absorbedores de estos colectores son generalmente de plástico negro tratado para resistir la luz ultravioleta, o están constituidos por tubos de metal o plástico recubiertos de pigmentos ennegrecidos por los que circula el agua (Cabirol, 1978). Ver figura 1.9.

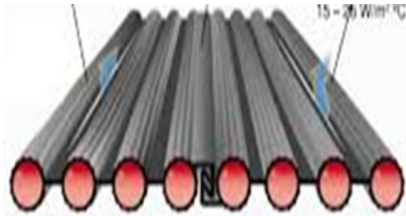


Figura 1.9. Colectores de placa plana sin cubierta

- Colectores de tubos de vacío

Estos colectores se componen de un conjunto de tubos al vacío (o evacuados), cada uno de los cuales contienen un absorbedor (generalmente una plancha de metal con tratamiento selectivo o negro), el cual recoge la energía solar y la transfiere a un fluido portador (calor- portador). Gracias a las propiedades aislantes del vacío, las pérdidas de calor son reducidas y pueden alcanzarse temperaturas en el rango de 77°C a 177°C. De esta manera, este tipo de colectores resultan particularmente apropiadas para aplicaciones de alta temperatura. Ver figura 1.10.



Figura 1.10. Colectores de tubos de vacío

En la Tabla 1.1 según Mendoza *et al.* (2015) se muestran valores típicos de los parámetros característicos eficiencia óptica (η_0), coeficiente global de pérdidas (UL) y rango normal de temperaturas de trabajo para distintos tipos de colectores.

Tabla 1.1: Parámetros característicos de los distintos tipos de colectores solares

Tipo de colector	Factor de conversión (η_0)	Factor de perdidas térmicas: UL $\frac{W}{m^2}^{\circ}C$	Rango de temperatura ($^{\circ}C$)
Sin cubierta	0.9	15-25	10-40
Cubierta simple	0.8	7	10-60
Cubierta doble	0.65	5	10-80
Superficie selectiva	0.8	5	10-80
Tubos de vacío	0.7	2	10-130

1.8. Principio de funcionamiento del sistema

La radiación solar atraviesa la pared de las botellas y cae sobre la superficie de absorción de las mangueras negras, estas se calientan y transmiten el calor al agua, la cual se empieza a calentar. Al aumentar la temperatura del agua dentro de los tubos del colector, disminuye su densidad y entonces la columna de agua fría en la tubería de retorno al colector ya no queda equilibrada por la columna de agua caliente menos densa, por lo que la gravedad origina que baje el agua fría y desplace al agua caliente hacia arriba hasta el tanque de almacenamiento. De esta manera se establece un flujo por convección natural que transmite agua caliente hacia el tanque de almacenamiento y agua fría hacia el colector. Este flujo natural continúa mientras exista suficiente calor para aumentar la temperatura del agua y la fuerza de empuje resultante pueda vencer las caídas de presión en el sistema como se muestra en la figura 1.11.

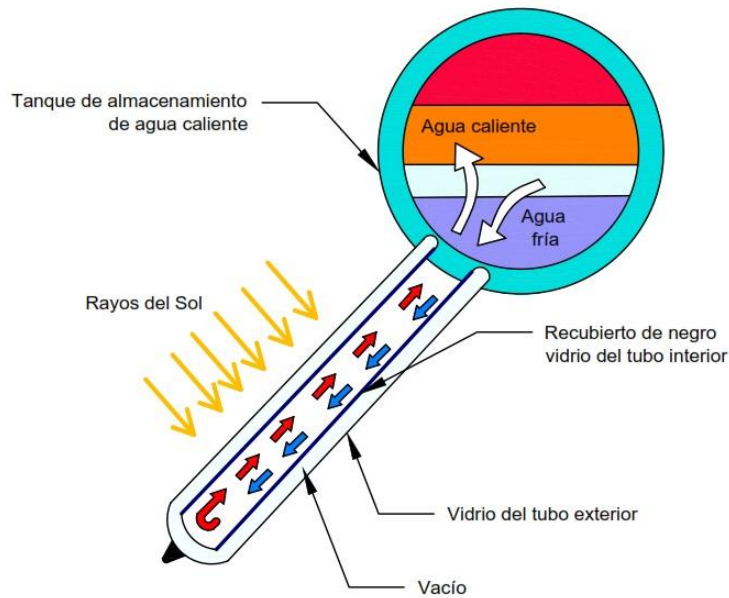


Figura 1.11. Principio de funcionamiento del calentador solar de agua

1.9. Calentamiento de agua para uso hogareño

En la figura 1.12 se muestra el esquema de instalación de un sistema de calentamiento de agua para uso hogareño, el sistema consta según Barrientos, (2017) de:

- ✓ Un tanque domiciliario el cual contiene el agua fría que abastece a todo el sistema de calentamiento de agua
- ✓ Un colector plano con tubos paralelos que transportan el fluido a ser calentado (agua), posteriormente el agua sale a determinada temperatura del colector solar.
- ✓ Un tanque aislado térmicamente en el cual concurren el agua caliente y el agua fría, en el tanque aislado térmicamente existen dos entradas de agua: una entrada de agua fría y una caliente, lo que sucede es que el agua caliente tiene menos densidad y tiende a moverse hacia arriba del tanque, en cambio el agua fría tiene más densidad lo cual hace que se quede en el fondo del tanque y ejerce una fuerza sobre el agua caliente y la empuja hacia el termotanque.
- ✓ Un termotanque donde el agua debe estar disponible para el uso hogareño,

pero la función principal de él es proporcionar agua caliente en días en los que el sol no ha logrado calentar lo suficiente.

- ✓ Finalmente están las tuberías, las tuberías azules corresponden a aquellas que transportan el agua fría y las tuberías de color rojo transportan el agua caliente.

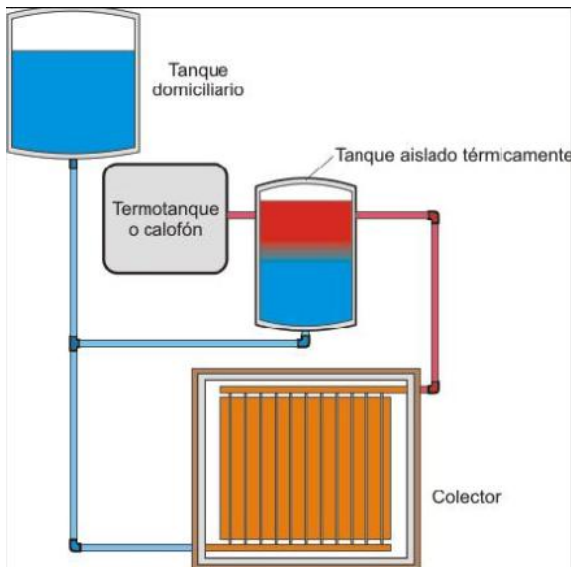


Figura 1.12. Esquema de un sistema de calentamiento de agua para el uso del hogar.

1.10. Requisitos para su instalación

En la inmensa mayoría de los hogares se reúnen las condiciones adecuadas para poder colocar un calentador solar. Lo requisitos básicos son:

- ✓ Un lugar en que se pueda colocar los colectores orientados al sur en el hemisferio y al norte en el hemisferio sur, y en los edificios de cubierta plana se simplifica mucho la instalación y el mantenimiento por la sencillez que presenta el acceso a la azotea. La inclinación y la orientación del colector son sencillas y no ofrece problemas en este tipo de cubiertas planas.
- ✓ En las casas con cubierta inclinada es también perfectamente posible la instalación del calentador solar compensando la inclinación de la cubierta mediante la adaptación de la estructura metálica que soporta los colectores.

Algunos instaladores colocan objetos como ladrillos o similares, bajo la estructura sin modificar, para así corregir la inclinación. Normalmente es la empresa instaladora la encargada de solucionar estos aspectos que no suelen ofrecer problemas.

- ✓ Otro aspecto relacionado con la ubicación del calentador solar es el relativo a las sombras.
- ✓ Existe otro requisito de gran importancia para asegurar que el sistema funcione correctamente. Es necesario que la parte inferior del tinaco este a mayor altura que la parte superior del tanque de acumulación del calentador solar para que la presión sea dada por la propia gravedad del agua y la circulación del agua se dé con normalidad dentro del equipo. En caso de que la altura no sea suficiente siempre existe la posibilidad de elevar el tinaco lo necesario, que siempre será poco. Es conveniente, no obstante, evitar una gran diferencia de altura entre tinaco y equipo solar compacto, para que un exceso de presión no dañe los componentes de la instalación, sobretodo en el caso de los equipos de tubo de vacío. Existen válvulas y otros medios para solucionar este problema que un instalador calificado sabrá utilizar.
- ✓ Por las mismas razones, en casas con grupos de presión o hidroneumáticos (con bomba) se deberá vigilar que la fuerza con que el agua entra al equipo no sea excesiva.

1.11. Conclusiones del capítulo I

- El análisis de los trabajos precedentes muestra suficiente información especializada para la construcción del calentador solar, ello se resume en textos básicos, tesis de grado y publicaciones en revistas, relacionados con los calentadores solares de agua para uso doméstico.
- Las fuentes renovables de energía tienen un futuro prometedor para el mundo y para nuestro país por ser permanentes, inagotables y gratuitas; su uso está enmarcado dentro de la política energética cubana actual, la cual pretende la sustitución gradual de fuentes convencionales debido a la contribución que

estas últimas hacen al efecto invernadero, a la contaminación ambiental y por la posibilidad de su agotamiento en un futuro no muy lejano.

- Quedaron establecidos los fundamentos teóricos por lo que se caracterizan los calentadores solares atendiendo a sus partes fundamentales, principio de funcionamiento e instalación del mismo.

Capítulo II. Materiales y Métodos

2.1. Introducción

En el siguiente capítulo explicaremos la metodología de cálculo a emplear y los objetivos que se persiguen con ella para la construcción y evaluación de un calentador solar realizado con materiales reciclados, se darán a conocer los instrumentos de medición que intervienen en el proceso, el impacto ambiental y el costo de producción de dicho calentador, el cuál abarca una serie de pasos, dando lugar a los métodos necesarios para la mejor calidad deseada.

El **objetivo** de este capítulo: es establecer el procedimiento de construcción y de cálculo que incide en la eficiencia de un calentador solar realizado con materiales reciclados.

2.2. Aspectos iniciales

El calentamiento solar de agua para consumo doméstico, como alternativa para sustituir los calentadores tradicionales (eléctricos, a gas, etc), es una opción atractiva, si se toma en cuenta las bajas temperaturas necesitadas (40°C a 60°C), además, desde el punto de vista de ahorro energéticos es la opción más favorable, ya que en estos sistemas, la fuente de calor es la radiación solar, la cual sustituye los combustibles fósiles ó la electricidad.

Los sistemas solares para calentamiento de agua están constituidos por dos elementos principales:

- Colector, encargado de recibir y transformar la energía incidente durante el día.
- Tanque de almacenamiento, aislado para el agua que ha sido calentada.

Existen dos tipos de sistemas para el calentamiento, los cuales se diferencian en la forma de circulación del agua: Sistema de circulación natural y Sistema de circulación forzada.

El colector, para el que se describe el diseño y construcción, opera por circulación natural, es decir, la circulación del agua entre colector y tanque, es producida por el principio de termosifón, presentado cuando, una masa de fluido es calentada, a

través de la base de un recipiente, es decir, el agua al entrar al colector por la parte inferior es calentada, lo cual disminuye su densidad debido al incremento de la temperatura, entonces, la columna de agua fría en la tubería de retorno al colector y la columna de agua caliente dentro del mismo, se desequilibran haciendo que por gravedad la primera baje. Las viviendas que pueden utilizar este tipo de colector, y para las cuales se pretende realizar el diseño en nuestro trabajo, son de tipo unifamiliar y la utilización de agua caliente es sólo para cubrir las necesidades básicas del baño y la cocina, por lo cual el consumo de agua caliente por persona, a una temperatura de 50°C, es de alrededor de los veinte (20) litros, (Burbano *et al* 2006). El promedio de personas por vivienda en el país, es de 3,9 personas (Cabirol, 1978); tomando en cuenta este dato se asumirán 4 personas por cada vivienda para el diseño del colector

Teniendo en cuenta la tecnología disponible y la necesidad del calentamiento de agua sin el uso de corriente o gas se procederá a la construcción de un calentador solar doméstico realizado con materiales reciclados similar al mostrado en la figura 2.1. Para dicha construcción se valoraron los diferentes factores como: el medio ambiente, economía, disponibilidad de materiales, facilidad de uso y reparación.



Figura 2.1. Calentador solar doméstico realizado con material reciclable.

2.3. Diseño del colector

En la siguiente imagen se muestra el plano del colector de botellas reciclables PET que se espera obtener al término de su construcción.

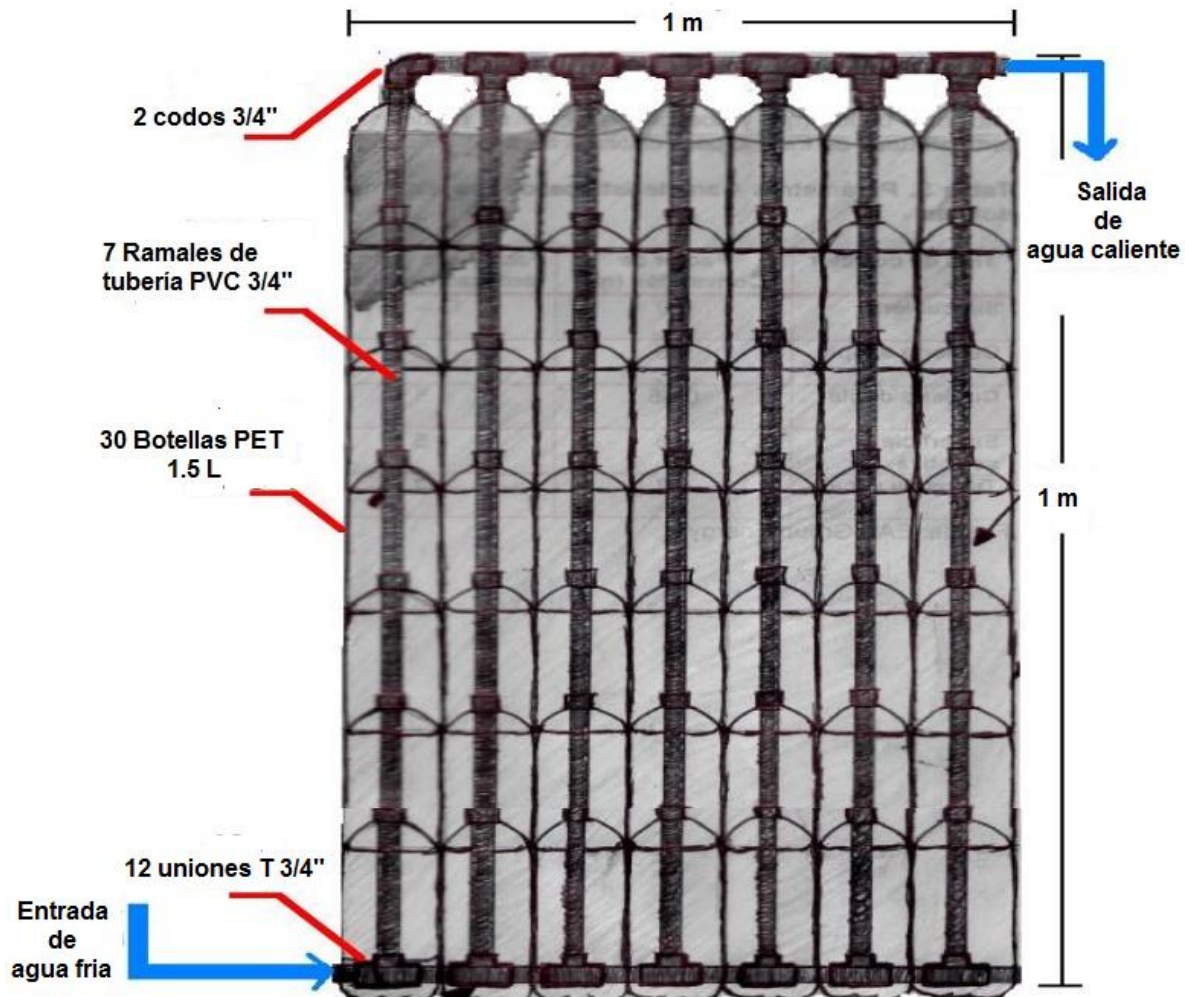


Figura 2.2. Plano del colector de botellas PET

La temperatura del agua recomendada para el baño de las personas es de aproximadamente 28 a 36 °C, con el diseño del colector de botellas, la temperatura del agua a la salida se espera que sea aproximadamente superiores al 50 °C, (Camargo, 2013), pero cuando ingresa al tanque de almacenamiento la temperatura del agua debe alcanzar una temperatura de equilibrio de alrededor de los 40°C debido al volumen de agua a calentar en el tanque.

2.4. Materiales a emplear en la construcción del calentador solar doméstico

Los materiales a emplear en la construcción del calentador solar, pueden ser adquiridos con facilidad ya que en nuestro país existen varias entidades donde se pueden adquirir estos elementos a un precio módico, los mismos se relacionan a continuación.

- ✓ Se seleccionó tubería de transición PVC de 3/4" x 6 m, para formar los ramales del colector, esto debido a que es un material de fácil acceso en el mercado, económico, sencillo para trabajarlo y de muy buenas propiedades termoplásticas.
- ✓ Se seleccionaron botellas PET de 1,5 litros por su buen tamaño y disponibilidad en lo cotidiano.
- ✓ Se utilizó la madera, para construir el soporte base del colector y el termo tanque, ya que es un material económico, y de fácil manejo.
- ✓ Se seleccionaron accesorios como codos, T, reductores (hembra y macho), tapón, adaptadores de transición. Todo esto, para la respectiva unión entre piezas.
- ✓ Se utilizó pegamento PVC y silicona ya que este satisface las necesidades para la unión de la tubería con los accesorios.
- ✓ Se seleccionó un recipiente de 25 litros de capacidad para ser empleado como termotanque.
- ✓ Se utilizaron válvulas para ser empleadas en de control de flujo en el sistema.

2.5. Procedimiento para la construcción, preparación y ensamble del calentador solar

A continuación se describe el procedimiento que se llevó acabo para el desarrollo de la preparación, ensamble y construcción del colector solar de botellas PET diseñado. Las dimensiones del colector están basadas en los cálculos que se hicieron de diseño.

1. Se enderezó la tubería PVC de $\frac{3}{4}$ "x 6m, ya que al momento de ser adquirida ésta se encontraba en rollos, para luego cortar 7 tubos de un metro de longitud para ser empleados como ramales del colector.
2. Una vez listos los 7 ramales, se procedió a cortar 12 trozos de la misma tubería con 16 cm de longitud, que en conjunto con los ramales, T y codos se pueda conformar el circuito del colector.
3. Se seleccionaron 28 botellas PET de 1,5 litros, que estuvieran limpias y en buen estado.
4. Se marcan las botellas a la medida, para luego ser cortadas su base, donde se utilizan el bisturí y las tijeras para su respectivo corte.
5. Una vez cortadas las botellas se procede, al ensamblado de los siete tubos de $\frac{3}{4}$ " (ramales), las secciones y los accesorios, dándole forma al circuito del colector con botellas PET. Como se muestra en la figura 2.3.
6. Se empleó madera para la construcción del soporte y estructura del colector.



Figura 2.3 Accesorios y secciones de tuberías a pegar, circuito del colector ensamblado.

7. Se procede a la construcción del termo tanque, para lo cual se utilizó una tanqueta metálica de 25 litros. Se le realizaron perforaciones al tanque para la entrada y salida de agua. Para la unión del colector con el tanque se utilizaron tramos de tubería $\frac{3}{4}$ ", codos y pegamento. En la figura 2.4 se muestra el recipiente empleado para la confección del termotanque.



Figura 2.2. Recipiente de 25 litros para la construcción del termotanque

2.6. Aislante térmico para el termotanque

Los aislantes térmicos se definen como a la capacidad de los materiales para oponerse al paso del calor por conducción el cual se evalúa por la resistencia térmica que tienen dicho materiales. Los materiales termoaislante son aquellos que poseen baja conductividad térmica y evita la pérdida o ganancia de calor de un equipo determinado estos están compuesto de materiales básicos con un coeficiente de transmisión de calor bajo. Basándonos en estas características el aislamiento térmico representa eficiencia y economía, porque al evitar la transmisión de calor, se evita el paso de energía de un cuerpo a otro, en virtud de una diferencia de temperatura existente entre los mismos.

Los materiales comúnmente utilizados en los calentadores solares son: la fibra de vidrio, la espuma rígida de poliuretano y el poliestireno expandido. Cualquiera que sea el material seleccionado deberá tener un coeficiente de dilatación compatible con el de los demás componentes del calentador solar. Para tener acceso a estos aislantes se nos hace difícil por eso el aislante con materiales reciclables que podemos emplear pueden ser; madera (aserrín), poliespuma cartón y papel.

2.6.1. Poliespuma como aislante térmico

La poliespuma según Andrade (2015) es un material plástico celular y rígido fabricado a partir del moldeo de perlas preexpandidas de poliestireno expandible que presenta una estructura celular cerrada y rellena de aire.

Sus características son:

- Posee un buen comportamiento térmico en densidades que van de 12-40 kg/m^3 .
- Tiene un coeficiente de conductividad de 0,045 a 0,034 W/mK, que depende de la densidad (a mayor densidad menor aislamiento).
- Es fácil atacable por la radiación ultravioleta por lo cual se lo debe proteger de la luz del sol.
- Posee una alta resistencia a la absorción de agua en el estado líquido.

2.7. Orientación e inclinación del colector

Se debe tener en cuenta dos factores a la hora de instalar los componentes del panel solar o terma solar: orientación con respecto al sol y la distancia mínima que debe haber entre el colector y el tanque para que el agua fluya por efecto termosifón. Para la obtención de una buena circulación natural del agua en el sistema de colector y tanque térmico, el tanque debe estar más arriba del colector, (Gutiérrez, 2004).

No siempre al momento de construir un colector solar se tiene a la mano un transportador para regular y medir su inclinación, por ello debe tenerse en cuenta los datos de la tabla 2.2, que permiten definir los grados deseados con facilidad.

Tabla 2.2. Grados de inclinación del colector y su porcentaje de inclinación

Grados	% de elevación	Grados	% de elevación	Grados	% de elevación
1	1,75	16	28,67	31	60,09
2	3,49	17	30,57	32	62,49
3	5,24	18	32,49	33	64,94
4	6,99	19	34,43	34	67,45
5	8,75	20	36,40	35	70,02
6	10,51	21	38,39	36	72,65

Continuación de la Tabla 2.2. Grados de inclinación del colector y su porcentaje de inclinación

7	12,28	22	40,40	37	75,36
8	14,05	23	42,45	38	78,13
9	15,84	24	44,52	39	80,89
10	17,63	25	46,63	40	83,91
11	19,44	26	48,77	41	86,93
12	21,26	27	50,95	42	90,04
13	23,09	28	53,17	43	93,25
14	24,93	29	55,43	44	96,57
15	26,79	30	57,74	45	100

La utilización de la tabla 2.2 es de la forma siguiente: para inclinar un colector en 30°, vemos en la tabla que 30° equivalen a 57,74 % de inclinación. Procedemos a trazar horizontalmente una línea de un metro de largo. Al final de esta línea, a 90 grados trazamos una línea vertical de 57,74 cm. Se une la punta superior a la vertical con el inicio de la línea de 100 cm, de esta manera se tendrá la inclinación deseada de 30° (Gutiérrez, 2004).

2.8. Procedimiento de cálculo para determinar la eficiencia térmica del colector solar

Según Álvarez *et al.* (2008) el elemento fundamental de una instalación solar para el calentamiento de fluidos lo constituye el colector solar, y precisamente por esto se hace necesario conocer sus parámetros antes de proceder a la ejecución de cualquier proyecto. Para facilitar su uso, la metodología de cálculo de una instalación solar se ha dividido en dos aspectos fundamentales:

- a) Cálculo de la eficiencia del colector solar
- b) Cálculo del número de colectores de una instalación

2.8.1. Cálculo de la eficiencia del colector solar plano

Según Álvarez *et al.* (2008) el cálculo de la eficiencia se emplea, concretamente, en los casos en que se desea evaluar un equipo, comparar un modelo con otro, diseñar un nuevo modelo, o también cuando antes de realizar una instalación sea necesario efectuar un estimado teórico del comportamiento esperado.

La eficiencia instantánea del colector solar está definida por la relación entre la energía útil ganada en un tiempo infinitesimal y la energía total incidente sobre el colector en el mismo período; esto es:

$$\eta = \frac{Q_u dt}{A_c H_T dt} \quad (2.1)$$

Donde:

Q_u : Energía útil que absorbe el colector por unidad de tiempo. (W/m)

A_c : Área del colector. (m²)

H_T : Radiación total solar incidente por unidad de tiempo y de área en la superficie del colector. (W/m²)

t: Tiempo. (h)

Si se conocen los valores de Q_u y H_T para intervalos de una hora, la eficiencia horaria puede expresarse por:

$$\eta_{\text{hora}} = \frac{Q_u}{A_c \times H_T} \quad (2.2)$$

En el proceso de cálculo se van obteniendo los valores de Q_u y H_T para cada hora del día. Después, la eficiencia diaria se calcula por la relación:

$$\eta_{\text{dia}} = \frac{Q_u}{A_c \times H_T} \quad (2.3)$$

El cálculo de la eficiencia diaria requiere el conocer los valores de Q_u y H_T para cada hora del día. El valor de la radiación solar incidente H_T se puede hallar por la ecuación:

$$H_T = H - H_d R_b + \frac{H_d (1 + \cos \beta)}{2} + \frac{H (1 - \cos \beta) \rho_T}{2} \quad (2.4)$$

Donde:

H: Radiación total horaria que incide sobre una superficie horizontal. (kJ/m²h)

H_d: Radiación difusa horaria que incide sobre una superficie horizontal. (kJ/m²h)

R_b: Relación entre la radiación directa sobre una superficie inclinada y una superficie horizontal.

β: Ángulo de inclinación del colector con relación a la horizontal. (grado)

La energía útil ganada por el colector va a depender de la radiación recibida, del tipo de colector, su diseño y materiales utilizados, del área que tiene la superficie de absorción y además, de la temperatura de trabajo y la del medio ambiente. El valor de Q_u se puede determinar para cada hora por medio de la fórmula:

$$Q_u = A_c F_R [S - U_L(T_{pm} - T_a)] \quad (2.5)$$

Donde:

S: Radiación total absorbida por el colector en la unidad de área en una hora. (kJ/(m² h))

U_L: Coeficiente total de pérdidas del colector. (W/m² °C)

T_{pm}: Temperatura media del plato de absorción. (°C)

T_a: Temperatura del medio ambiente. (°C)

F_R: Factor de remoción de calor del colector. (adimensional)

El valor de S puede determinarse para cada hora por medio de la ecuación:

$$S = H_T \tau \alpha_e (1 - a)(1 - b) \quad (2.6)$$

Donde:

τ α_e: Valor efectivo del producto transmisividad-absorbencia en el colector.

(1-a): Factor del efecto del polvo sobre el colector.

(1 - b): Factor del efecto de la sombra sobre el plato de absorción

Se recomienda tomar a = 0,02 y b = 0

Otro de los factores que más influyen en la eficiencia del colector es el coeficiente total de pérdidas U_L. El cálculo de este coeficiente se realiza por medio de un

proceso iterativo basado en la teoría de la transferencia de calor por conducción, convección y radiación. El coeficiente total de pérdidas está dado por la suma de tres coeficientes:

$$U_L = U_T + U_b + U_s \quad (2.7)$$

Donde:

U_T : Coeficiente de pérdidas por la cubierta del colector. (kJ/(m² h))

U_b : Coeficiente de pérdidas por el fondo. (kJ/(m² h))

U_s : Coeficiente reducido de pérdidas laterales. (kJ/(m² h))

En un diseño correcto de colector, el coeficiente de pérdidas de mayor importancia es el U_T que puede ser evaluado directamente (evitándose con ello el engorroso cálculo iterativo), por medio de la fórmula empírica de Klein (1979). Después de calculado el coeficiente de pérdidas por cubierta mediante esta fórmula, se procede al cálculo del coeficiente total de pérdidas por la fórmula y se expresa de la siguiente manera:

$$U_T = \frac{1}{\frac{C}{T_p} \frac{T_p - T_A}{N+F} \epsilon + \frac{1}{h_w}} + \frac{\sigma(T_p + T_A)(T_p^2 + T_A^2)}{\frac{1}{\epsilon_p + 0.059 N h_w} + \frac{2 N + F - 1 + 0.123 \epsilon_g}{\epsilon_g} - N} \quad (2.8)$$

Donde:

$$f = 1 + 0.089 h_w - 0.1166 h_w \epsilon_p (1 + 0.07866 N)$$

$$C = 520 (1 - 0.000051 \beta^2)$$

β : ángulo de inclinación del colector

$$e = 0.43 \left(1 - \frac{100}{T_{pm}}\right)$$

h_w : Coeficiente de transferencia de calor entre la cubierta superior de vidrio y el medio ambiente (W/m² °C)

N: Número de planchas transparentes en la cubierta.

T_a : Temperatura ambiente (°C)

T_{pm} : Temperatura media del plato de absorción (°C).

ϵ_p : Emisividad del plato absorbedor (adimensional)

ϵ_g : Emisividad de la plancha transparente

σ : Constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$)

Para el cálculo del coeficiente de pérdidas por el fondo U_b se presupone que todo el calor que pasa a través del aislante es perdido y que el área del fondo es similar al de la cubierta, por lo tanto, puede ser calcular por la fórmula:

$$U_b = \frac{k_b}{L_b} \quad (2.9)$$

Donde:

L_b : Espesor del aislante del fondo (m)

k_b : Conductividad térmica del aislante (kcal/mh°C)

El coeficiente reducido de pérdidas laterales U_e es el coeficiente de pérdidas laterales referido al área de captación del colector; o sea:

$$U_e = k_e A_e / L_e A_c \quad (2.10)$$

Donde:

L_e : Espesor del aislante lateral (m)

k_e : Conductividad térmica del aislante (kcal/mh°C)

A_e : Área lateral (m²)

A_c : Área de la cubierta (m²)

El último factor necesario para el cálculo de Q_U es el de remoción de calor del colector. Conviene definir este factor como una cantidad que relaciona la energía útil ganada por el colector con la energía útil ganada, si la superficie del colector estuviera a la temperatura de entrada del fluido; así, este factor se puede expresar matemáticamente como:

$$F_R = \dot{m} C_p (T_{fo} - T_{fi}) / [S - U_L (T_{fi} - T_a)] \quad (2.11)$$

Donde:

\dot{m} : Flujo de agua (o líquido) por el colector (kg/h)

C_p : Calor específico del fluido (J/.Kg.K)

T_{fo} : Temperatura del fluido a la salida del colector (°C).

T_{fi} : Temperatura del fluido a la entrada del colector (°C).

T_a : Temperatura del medio ambiente (°C).

Para los fines del cálculo de la eficiencia de los colectores solares es conveniente expresar el factor F_R en función del factor de eficiencia F' del colector, de acuerdo con la fórmula:

$$F_R = [\dot{m} C_p / A_c U_L F'] [1 - e^{-(A_c U_L F' / \dot{m} C_p)}] \quad (2.12)$$

El factor de eficiencia del colector F' depende principalmente de la forma geométrica del plato de absorción y de las propiedades de los materiales con que está construido. Esto significa que para cada diseño del colector es necesario calcular un factor de eficiencia F' .

2.8.2. Cálculo del número de colectores

Según Álvarez et al. (2008) el cálculo del número de colectores que debe tener una estación para el aprovechamiento de la energía solar resulta un proceso largo y complejo. Sin embargo, un cálculo simplificado, que se hace si tenemos un tanque de almacenamiento del fluido caliente sin estratificación y perfectamente mezclado (o sea, que la temperatura en cualquier punto de su interior sea la misma en cada momento), permite la determinación del número de colectores sin necesidad de la programación del problema. El tanque de almacenamiento de una instalación solar debe tener una capacidad adecuada a su tipo y uso. En una instalación para calentar agua, en la cual ésta se almacena a una temperatura comprendida entre 40 y 60° C, es recomendable instalar un tanque de almacenamiento que contenga de una a una vez y media, la demanda diaria. Por lo tanto, si m_s es la capacidad del tanque de almacenamiento y m_L es la demanda del agua caliente del día, lo recomendable en una instalación es:

$$m_s = 1 \text{ a } 1,5 m_L \quad (2.13)$$

Para que el cálculo de la instalación sea aceptable, debe saberse cuál es la demanda de agua caliente o fluido en función de la hora del día. Entonces se puede determinar un valor aproximado de la demanda de energía diaria, por medio de la ecuación:

$$Q_L = m_L C_p (T_s - T_1) \quad (2.14)$$

Donde:

C_p : Calor específico del fluido. Para el agua $C_p=1$ kcal/kg°C.

T_s : Temperatura de demanda del fluido; (°C).

T_1 : Temperatura del fluido en el depósito general (frío); (°C).

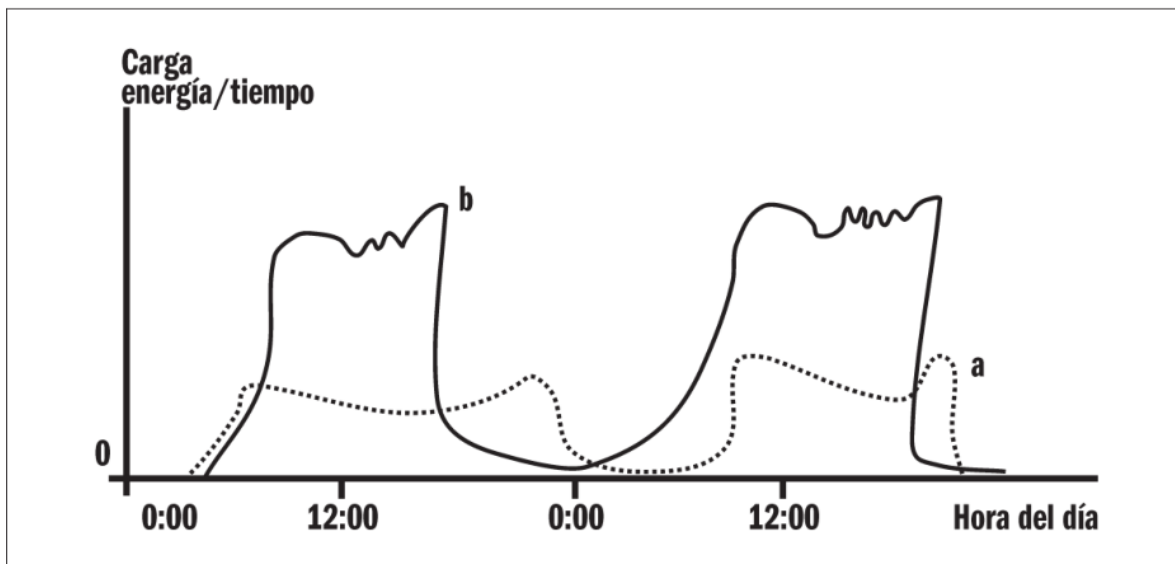


Figura 2.7. Dependencia de la carga de energía con el tiempo de un sistema de agua caliente.

- Residencial
- Para laboratorios y oficinas

La figura 2.7 muestra esquemáticamente cómo varía la demanda de agua caliente en el curso del día para dos edificaciones típicas, una residencial y otra de oficinas o laboratorios.

Teniendo en cuenta las pérdidas del sistema y lo requerido para calentar la masa de reserva de agua, se estipula el valor aproximado de la energía útil que debe ganar la batería de los colectores en un día por la fórmula empírica:

$$Q_T \approx 1,15 Q_L \quad (2.15)$$

Con este valor seleccionado se determina, tentativamente, el número de colectores necesarios para el sistema, por la ecuación:

$$n_c = \frac{Q_T}{\eta A_c H_T} \quad (2.16)$$

2.9. Instrumentos de medición

Los instrumentos de medición son aquellos instrumentos que se utilizan para medir, los cuales permiten que los objetos se confeccionen con la precisión requerida. Como instrumento de medición al utilizar en la evaluación del calentador solar se utilizó: el termómetro, un cubo, cronómetro y estación meteorológica.

2.9.1. Termómetros

El termómetro es un instrumento de medición de la temperatura, que usa el principio de la dilatación, por lo que se prefiere el uso de materiales con un coeficiente de dilatación alto de modo que, al aumentar la temperatura, la dilatación del material sea fácilmente visible.

- Termómetro de mercurio

Los de mercurio pueden funcionar en la gama que va de -39 °C (punto de congelación del mercurio) a 357 °C (su punto de ebullición), con la ventaja de ser portátiles y permitir una lectura directa.

2.9.2. Medición del caudal

La medición del caudal, se puede desarrollar de diferentes formas y su elección depende del objetivo del monitoreo, la facilidad de acceso o tiempo con que se cuente y, por supuesto, de las características de la fuente superficial que se pretenda medir, sus formas y movimientos. El método que vamos a utilizar para medir caudal se llama medición de caudal por método volumétrico, este se aplica cuando la corriente presenta una caída de agua, en la cual se pueda poner un recipiente con volumen conocido; los materiales necesarios para llevar a cabo este método son: un reloj o cronómetro, un recipiente del cual conocemos su capacidad (cubo).

Para la medición del mismo el recipiente se coloca bajo la pluma de agua de tal manera que reciba todo el flujo de agua; al mismo tiempo se activa el cronómetro.

En este proceso el cronómetro inicia en el instante en que el recipiente se introduce a la pluma y se detiene en el momento en que se retira de ella, o el cubo se llena. Es importante cronometrar varios tiempos de llenado, para estimar un valor promedio. El caudal se calcula de la siguiente manera:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (2.17)$$

Donde:

Q = Caudal (L/s)

V = Volumen (L)

t = Tiempo (s)

2.9.3. Medición de las condiciones meteorológicas

La estación meteorológica, es una estación pensada para el uso profesional, ya que gracias a sus componentes puede ser usada en un ambiente hostil. La estación meteorológica incorpora ya en el precio 7 sensores, los cuales son el de dirección del viento, temperatura, velocidad del viento, pluviosidad, humedad relativa para el aire, evapotranspiración (ET) y radiación solar. Dispone de una memoria interna de 8 800 valores por lo que esta estación puede registrar los valores medidos, para su posterior descarga. El software necesario para esto es opcional. Además de los sensores descritos se les puede insertar otros sensores, ya que dispone de 5 puertos externos, dispone de una pantalla LCD, y es capaz de indicar los parámetros descritos anteriormente, si se va moviendo por el menú de esta estación meteorológica profesional.

2.10 Conclusiones de capítulo II

- Se establecieron los materiales a emplear para la construcción del calentador solar así como sus procedimientos.
- Se planteó la metodología de cálculo para determinar la eficiencia térmica del colector solar y la cantidad de colectores que necesita la instalación con el objetivo del aprovechar la energía solar.

- Se dio a conocer el aislamiento térmico a utilizar en la instalación así como los instrumentos de medición ha utilizar para la obtención de datos climatológicos de nuestra localidad.

Capítulo III: Análisis de los resultados

3.1. Introducción

En los capítulos precedentes fueron establecidos las teorías y los modelos que dieron paso a la conformación del procedimiento, para la construcción del calentador solar realizado con materiales reciclado. Para mostrar la validez de dicho procedimiento se torna imprescindible demostrar sus resultados en la práctica.

El **objetivo** del capítulo es: implementar el procedimiento desarrollado, realizar la valoración de los resultados, la valoración económica y el impacto ambiental asociado.

3.2. Calentador solar diseñado con botellas PET

A partir de lo planteado en el capítulo 2, se construyeron todas las partes componentes necesarias para este calentador solar y luego se ensambló de manera efectiva, culminando así la construcción en su totalidad como muestra la figura 3.1.



Figura 3.1. Calentador solar construido con botellas PET, como resultado de la tesis.

3.3. Localización y orientación.

La instalación y diseño se realiza en Moa, provincia de Holguín (Cuba). Este lugar geográfico se encuentra a una latitud (θ) de 20,9 grados y una altura de 20 metros sobre el nivel de mar. Estos cálculos se han realizado a partir de la irradiancia e irradiación, directa y difusa a lo largo del mes de mayo, sobre plano horizontal en el municipio de Moa. (Arranz, 2019)

Por todo ello, se selecciona una inclinación de 30 grados orientada 18 grados respecto al sur.

3.4. Procedimiento para determinación del flujo de agua del colector de botellas reciclables

Las mediciones se efectuaron en el mes de mayo. Para la determinación del flujo de agua en los colectores de botellas reciclables se emplea la ecuación 2.17 y el siguiente procedimiento, se utiliza un recipiente de 4 litros y un cronómetro. Para ello se establecen cuatro puntos de abertura de la llave a la salida del colector (40, 50, 60 y 100)% se deja abierta por un tiempo aproximado de 10 segundos, para un volumen determinado, con el que se establece un flujo de agua por unidad de tiempo. Para ello se realizaron tres repeticiones para cada medición obteniéndose los resultados mostrados en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Flujo de agua del colector a diferentes aberturas de la válvula

Abertura (%)	Tiempo (s)	Volumen (ml)	Caudal (L/s)	Promedio (L/s)
100	10	2580	0,26	0,26
	10	2700	0,27	
	10	2500	0,25	
60	10	1900	0,19	0,17
	10	1650	0,17	
	10	1800	0,18	
50	10	900	0,09	0,095
	10	1050	0,105	
	10	900	0,09	
40	10	350	0,035	0,038
	10	300	0,03	
	10	500	0,05	

En la tabla se establecen valores de flujo promedio en dependencia del volumen del tanque de alimentación, estos flujos se obtuvieron por el método de estrangulación a diferentes aberturas de la válvula, obteniéndose los siguientes valores 0,26; 0,17; 0,095 y 0,038 l/s.

Para cada uno de estos flujos se comprueba a partir de una temperatura máxima alcanzada en la salida del colector, el tiempo en que alcanza la temperatura ambiente del fluido de entrada, como lo muestra la figura 3.2.

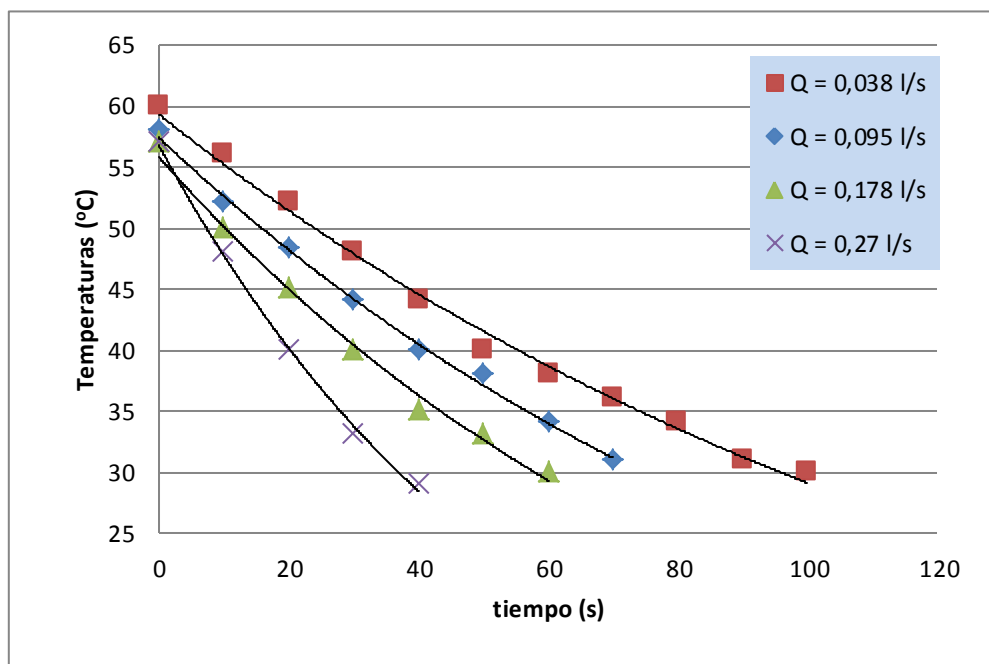


Figura 3.2. Comportamiento de la temperatura en el tiempo para los diferentes flujos establecidos.

Se comprueba que a medida que aumenta el flujo existe una disminución de del tiempo en que se alcanza la temperatura de entrada, esto dado porque al aumentar el flujo del fluido, aumentaría la velocidad del mismo para una sección transversal de la tubería y por ende aumentaría la transferencia de calor por convección desde la superficie de la tubería hacia el fluido.

3.5. Determinación del comportamiento del colector, en función de la radiación solar presente.

Para analizar los resultados obtenidos, se realiza el análisis del comportamiento de la radiación solar en los días de 15; 20 y 25 del mes de mayo, como se muestra en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Comportamiento de la temperatura de entrada y salida con respecto a la radiación solar durante el día.

Datos del 15 Mayo				Datos del 20 Mayo			
Hora	Temp ent (°C)	Temp sal (°C)	Radiación solar (W/m ²)	Hora	Temp ent (°C)	Temp sal (°C)	Radiación solar (W/m ²)
7:00	29,4	45	151,736	7:00	28,8	42	189,598
9:00	29,9	48	495,709	9:00	28,9	45	421,148
11:00	30,5	53	603,386	11:00	29,7	52	522,381
13:00	31,1	61	659,268	13:00	30,3	56	576,696
15:00	30,4	50	435,414	15:00	29,5	53	498,842
17:00	30,3	49	301,254	17:00	29	48	389,598

Datos del 25 Mayo			
Hora	Temp ent (°C)	Temp sal (°C)	Radiación solar (W/m ²)
7:00	29	45	144,966
9:00	29,9	48	422,381
11:00	30,5	53	576,390
13:00	31,1	56	596,960
15:00	30,4	50	315,517
17:00	30,3	44	250,634

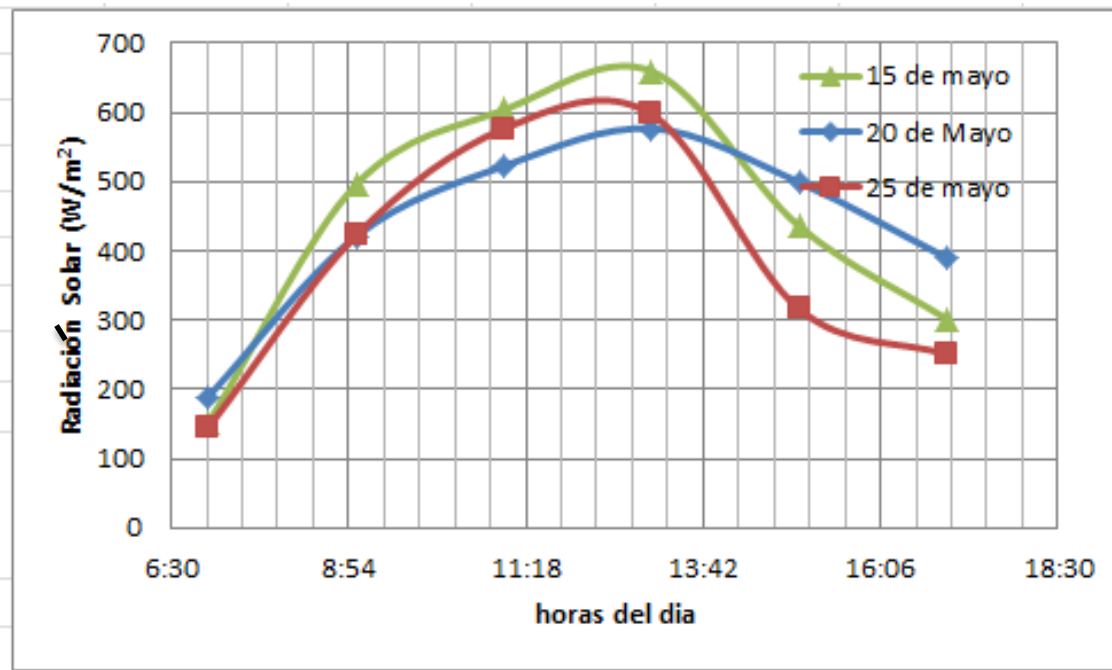


Figura 3.3. Comportamiento de la radiación solar en los días analizados.

A partir de los resultados obtenidos las figuras 3.4; 3.5 y 3.6 muestran el comportamiento de la temperatura de entrada y salida del fluido en colector para un flujo de 0,095 l/s, asumiendo que este último satisface la demanda para que esta diseñado el calentador.

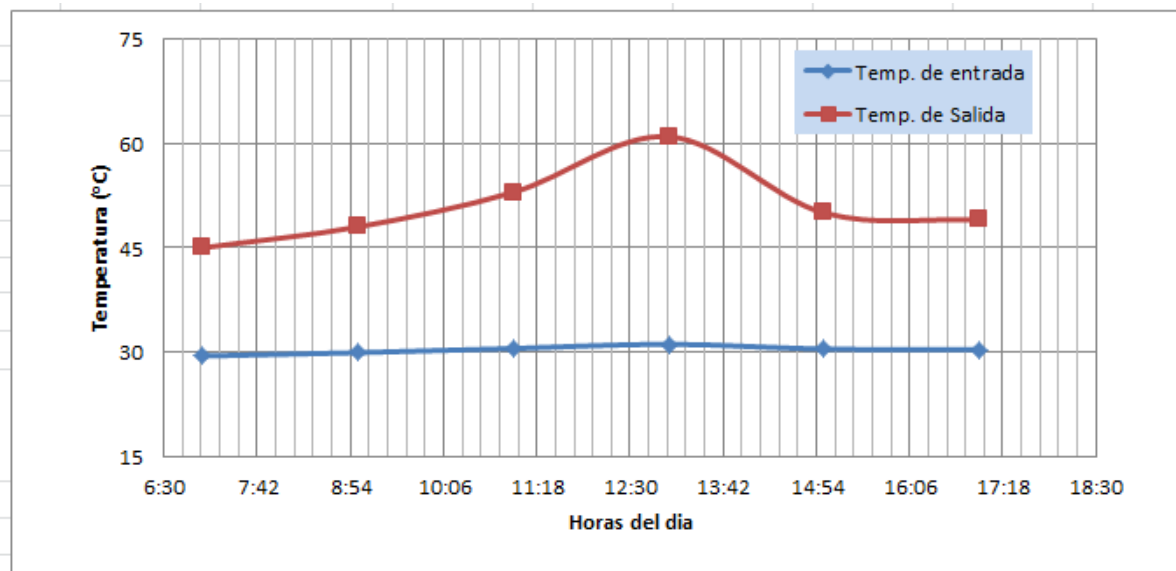


Figura 3.4. Comportamiento de la temperatura de entrada y salida en el colector para el día 15 de mayo

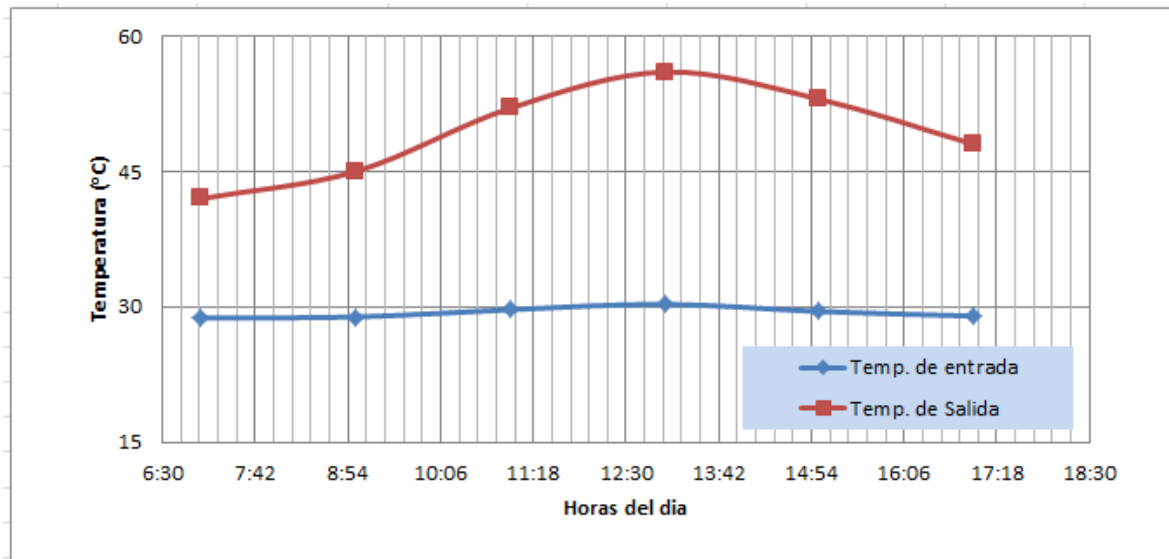


Figura 3.5. Comportamiento de la temperatura de entrada y salida en el colector para el día 20 de mayo.

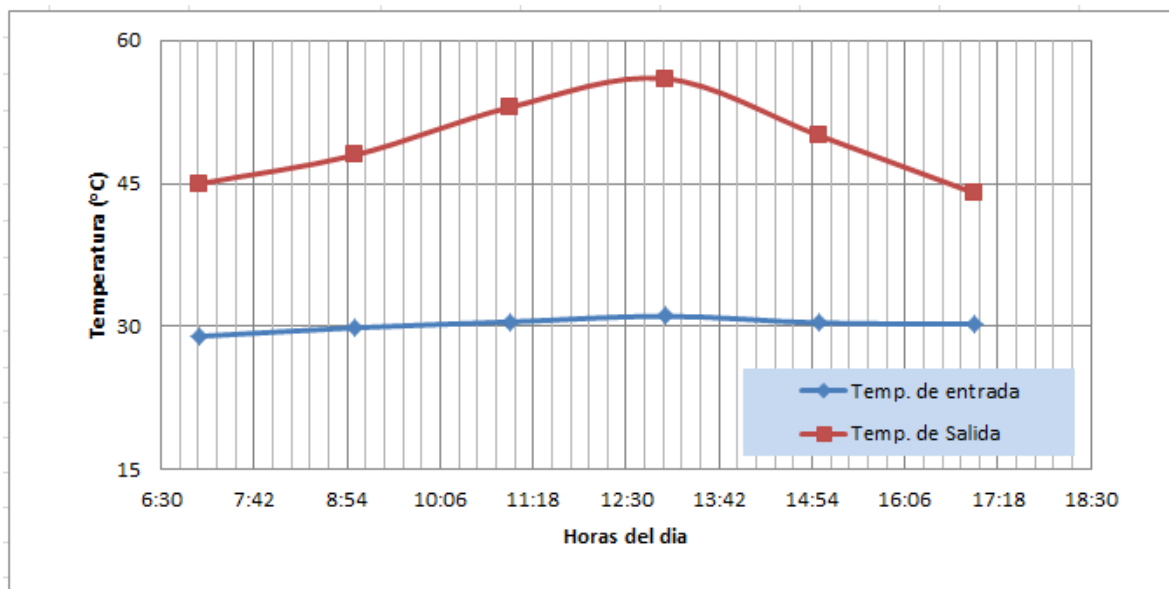


Figura 3.6. Comportamiento de la temperatura de entrada y salida en el colector para el 25 de mayo.

Estos resultados muestran que las mayores temperaturas se alcanzan en los horarios comprendidos entre las 11:00am – 2:00pm, coincidiendo con los mayores picos incidencia de la radiación solar obtenido en la figura 3.3. Lográndose alcanzar valores de temperaturas a la salida del colector en un rango de 42 – 61 °C.

3.6. Datos técnicos del calentador solar de botella PET construido

En la siguiente tabla se relacionan los principales datos técnicos y características del calentador solar construido con botellas PET, base para aplicar la metodología de cálculo establecida en el capítulo 2.

Datos:

Lugar: Holguín (Moa)

Mes: mayo

Velocidad media del viento: $w = 1.6 \text{ m/s}$

Temperatura del medio ambiente: $T_a = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

- Área del colector, $A_c \text{ (m}^2\text{)}$	1,1
- Área lateral, A_L	0,11
- Números de pomos, N	1
- Espesor del pomo, $L \text{ (m)}$	0,005
- Coeficiente de absorción del pomo, $k_a \text{ (m}^{-1}\text{)}$	2
- Absorción del cajón de madera, α (adimensional)	0,85
- Espesor de cajón de madera, $d \text{ (m)}$	0,01
- Distancia entre canales, $W \text{ (m)}$	0,15
- Temperatura de entrada del fluido, $T_f \text{ (}^\circ\text{C)}$	31
- Temperatura de trabajo, $T_t \text{ (}^\circ\text{C)}$	42 - 60
- Diámetro del tubo, $D \text{ (m)}$	0,018
- Inclinação del colector, β (grados)	30

3.7. Cálculo del rendimiento del colector solar

Con los datos técnico mencionados en el epígrafe anterior y la metodología descrita en el capítulo 2, se procede a calcular el rendimiento del colector solar diseñado, para ello se calculan parámetros tales como las variaciones horarias de HT , Q_u , η , los demás valores calculados se encontraran en el anexo A.16. Los resultados del cálculo de la eficiencia horaria del colector se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Variaciones horarias del rendimiento en función de la hora del día

De acuerdo a los resultados obtenidos, para calentar el agua se necesitaría una energía aproximadamente de 1441,82 (kcal/h) y una eficiencia promedio al día de 33 %. La figura 3.7 muestra el comportamiento de la eficiencia horaria del colector diseñado.

De	a	H_r (kcal/hm ²)	Q_u (kcal/h)	η (%)
7	8	144,9657	32,29947424	0,202552
8	9	289,5984	98,0730133	0,307865
9	10	421,148	159,9124642	0,345187
10	11	522,3817	203,7494748	0,354581
11	12	576,6963	226,874515	0,35764
12	1	576,6963	226,874515	0,35764
1	2	522,3817	203,7494748	0,354581
2	3	421,148	159,9124642	0,345187
3	4	289,5984	98,0730133	0,307865
4	5	144,9657	32,29947424	0,202552
Suma	-	3909,48	1441,82	0,33

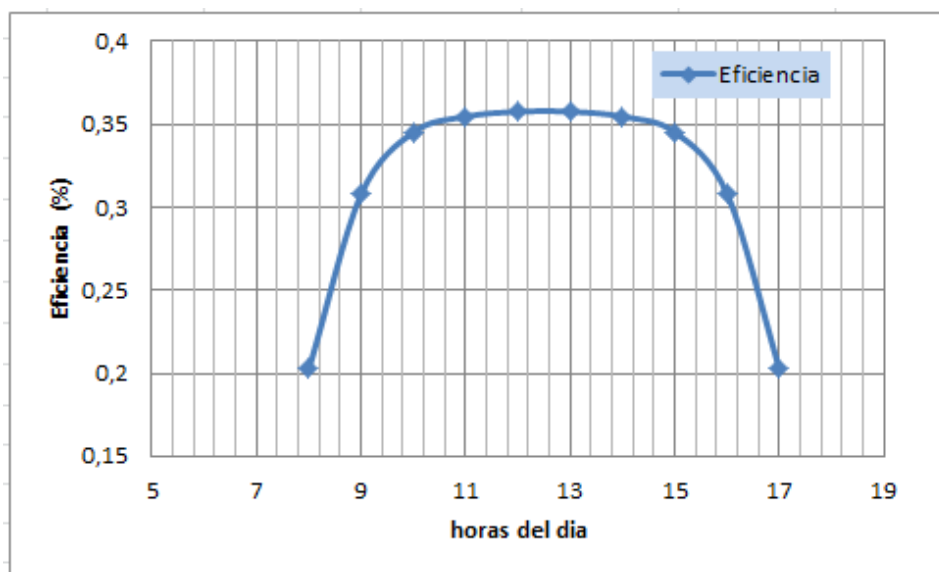


Figura 3.3. Eficiencia horaria del colector

Se puede comprobar que el mayor rendimiento del colector corresponde al horario de mayor incidencia solar en el que puede alcanzar valores de 36 % de rendimiento, este valor obtenido está en correspondencia con la figura A.1 del anexo 2, en la que se plantea que para estos tipos de calentadores absolvedores, la eficiencia térmica en el calentamiento de agua en casas, en función de la diferencia de temperatura del agua entre la salida y entrada del colector está en un rango de 20 – 40 % de eficiencia.

3.8. Número de colectores

Para el cálculo de número de colectores de la instalación se evaluaron los siguientes aspectos: demanda de agua horaria, la energía diaria demandada, la energía total que debe ganar la estación de colectores y por ultimo la cantidad aproximada de colectores que debe tener la instalación. En la tabla 3.3 se evidencia los aspectos del cálculo del número de colectores que debe llevar la instalación.

Tabla 3.3. Cálculo de número de colectores

m_L (L/día)	Q'_L (kCal)	Q'_T (kCal)	n_C
19,23	173,08	199,04	1

El número de colectores para satisfacer la demanda establecida es de un colector

3.9. Valoración Económica

La determinación de los costos surge como consecuencia lógica y fundamental del propio estudio técnico puesto que éste permitirá estimar y distribuir los costos del proyecto en términos totales y unitarios, con lo cual se estará determinando la cantidad de recursos monetarios que exige el proyecto.

Tabla 3.4. Costo de la materia prima directa para la construcción del calentador solar

Unidad	Descripción	Cantidad requerida	Precio unitario (CUP)	Costo (CUP)
m	Tubos PVC $\frac{3}{4}$ "	6 m	20,00	120,00
U	Codos $\frac{3}{4}$ "(90°)	6	12,00	48,00

U	Unión T $\frac{3}{4}$ "	13	12,00	156,00
U	Pomos PET (1,5 L)	30	1,00	30,00
U	Válvulas $\frac{3}{4}$ "	2	25,00	50,00
Total				404,00

Costos de materia prima indirecta. Los materiales que se detallan a continuación son necesarios para la elaboración del calentador solar.

Tabla 3.5. Costo de materiales indirectos para la producción de calentadores solares

Unidad	Descripción	Cantidad requerida	Precio unitario (CUP)	Costo (CUP)
U	Silicona	1	50,00	50,00
Unidad	Pegamento PVC	1	25,00	25,00
litro	Pintura	1	50,00	50,00
Total	-	-	-	125,00

El costo total de construcción del calentador solar es de 529,00 CUP.

3.10. Impacto Medio Ambiental

Según Delgado (2006) desde el punto de vista medio ambiental, poder cubrir las necesidades energéticas sin tener que utilizar recursos naturales agotables, ya constituye una clara ventaja. Otros efectos positivos, comunes al conjunto de energías renovables, son los siguientes:

- ❖ Reducido impacto ambiental respecto a las tecnologías que emplean combustibles fósiles:
 - No emiten CO₂ a la atmósfera y por tanto, evitan el proceso de calentamiento terrestre como consecuencia del efecto invernadero.
 - No contribuye a la formación de lluvias ácidas.
 - No requieren sofisticadas medidas de seguridad.
 - No producen residuos tóxicos de difícil o imposible tratamiento o eliminación.

- ❖ Los posibles impactos generados por energías renovables son de menor dimensión y de carácter local, por lo que su chequeo o corrección no se dificulta.
- ❖ En muchas ocasiones la utilización de energías renovables tiene lugar en el entorno urbano por lo que los efectos destinados a evitar la contaminación atmosférica adquieren especial relevancia.

Adicionalmente la aplicación de energía solar térmica en sectores como el hotelero puede ser un aspecto de interés fuera del campo estrictamente energético, ya que proporciona una imagen de respecto al medio ambiente, cuidado del entorno u la calidad de vida, estas consideraciones adquieren especial relevancia para el caso de los hoteles y apartamentos pudiendo realizar una pequeña contribución para presentar en determinado tipo de oferta turística.

3.11. Conclusiones del capítulo III

- Se evaluó el calentador solar diseñado con medios reciclables como son las botellas PET.
- Se determinó el rendimiento horario del colector solar y diario dando un valor por día bajo las condiciones planteadas de 33 % y a continuación se construyó un gráfico donde en el se encontraba la eficiencia horaria en función del tiempo.
- Se desarrolló el cálculo de números de colectores donde en el se calcularon varios aspectos obteniéndose un resultado de 1 colector solar.
- Pudimos destacar los gastos económicos que conllevan a la construcción del calentador solar y así como el impacto medio ambiental.

Conclusiones Generales

1. Se logró la construcción, el ensamble e instalación de un calentador solar con medio reciclable de botellas PET, que consta de un colector con un área captadora de energía solar de un m^2 , y un termotanque con una capacidad de almacenamiento de agua de 25 litros.
2. Se evaluó el funcionamiento del calentador solar, donde se obtuvo que el mismo logra temperaturas de salida del agua entre 40 y 60°C, para una eficiencia acorde a estos tipos de calentadores de alrededor de un 33%, y un número de colectores igual a la unidad.
3. En condiciones de estancamiento, es decir, cuando el colector está lleno de agua y no hay flujo desde el tanque de alimentación o del sistema de abastecimiento, en un día claro y con una temperatura ambiente promedio de 29°C, el colector es capaz de alcanzar una temperatura de 65°C en su interior, un valor muy superior a los aproximadamente 38°C requeridos para uso doméstico. Esto significa, que con una cantidad adecuada de superficie de captación y volumen del tanque de almacenamiento, se puede calentar y conservar una cantidad de agua considerable a muy bajo costo.
4. La construcción del calentador solar de botellas reciclables PET por concepto de costo de materia prima es de unos 529,00 CUP.

Recomendaciones

1. Realizar una investigación similar a este trabajo de tesis y dividir los resultados en tres grupos, días soleados, días nublados y combinados para observar como se comporta la eficiencia.
2. Destacar que este trabajo puede servir para el desarrollo de más proyectos con el fin de seguir mejorando el prototipo aquí fabricado.

Referencia Bibliografía

- 1- Alano, J. A. (2004). Manual sobre la construcción e instalación del calentador solar con botellas descartables. Tubarao- Santa Catalina, pág. 1 – 48
- 2- Agencia Internacional de Energía. (2006). El caso de la tecnología de la terma solar. París.
- 3- Alvarez, M. 2008. Manual para el cálculo y diseño de calentadores solares.
- 4- Andreade, A. 2015. Diseño termodinámico de un calentador solar para uso residencial. Tesis profesional para obtener el título de Ingeniero Mecánico.
- 5- Arranz, J. 2019. Propuesta de tecnología apropiada para el calentamiento de agua en el sector residencial en Cuba.
- 6- Barrientos, C. 2017. Calentador Solar de Agua para Usos Domésticos con Control de Variables y Funcionamiento con Arduino.
- 6- Burbano, J. C. Á.H. Restrepo y O.J. Sabogal. (2006). Diseño y construcción de un calentador solar de agua operado por termosifón. Disponible en <http://micalentadoresolar.com.mx>. Acceso el 12/10/14.
- 7- Bustamante, H. (2002). Uso de energía solar en el Perú. VII Simposio Peruano de Energía Solar, pág. 22-24.
- 8- Cabirol, T. (1978). El colector plano de efecto de invernadero y el calentador solar de agua. Editorial Continental. España.
- 9- Calentador solar de Agua: Manual del usuario Tecnología sencilla. Gustavo San Juan (et. al.) 1ª Edición – La Plata: Universidad Nacional de La Plata, 2008.
- 10- Cárdenas, A. E., Quesada, G. y Pérez M. (2006). Incrustaciones en instalaciones solares térmicas. Energía y tú. Revista Científica Trimestral de CUBASOLAR. N°36. Pág. 18 - 24

- 11- Camargo, A. 2013. Diseño y construcción de un colector solar con botellas reciclables PET y análisis comparativo con otros colectores.
- 12- Conde, M. 2014. Diseño de un calentador solar de placa de calor para calentamiento de agua para uso domestico
- 13- Delgado, J. 2007. Diseño de calentadores solares termosifónicos. Trabajo de Diploma para obtener el titulo de Ingeniro Mecanico.
- 14- Guevara, S. 2003. Teoría para el diseño de calentadores solares de agua.
- 15- Gutiérrez I, V. (2004). Manual de autoconstrucción del calentador solar de bajo coste. Argentina.
- 16- Mendoza et al 2015. Eficiencia térmica de un calentador solar doméstico de agua hecho con botellas plásticas
- 17- Montenegro Z, Nixon M. (2013). Determinación de la eficiencia y capacidad de una terma solar con dos colectores en serie de 1m² cada uno. Proyecto de Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Agroindustrial. Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas.
- 18- Lopez, et al. 2012. Evaluación de un calentador solar de agua fabricado con tubería PVC en serie y envases PET translucidos. Tecnura | Vol. 16 | Edición Especial | pp 120 - 128 | Octubre 2012.
- 19- Placeo, C., L. Saravia, C. Cadena. (2006). Colectores solares para agua caliente. Editorial Salta S.A. Argentina.
- 20- Tenemasa, C. 2102. Propuesta para la implementación de una industria fabricante de calentadores de agua de uso doméstico a base de energía solar en la ciudad de Riobamba. Tesis de Grado previo a la obtención del título de: Ingeniero Industrial.
- 21- Vigo, L.V. y Trigos, R.R. (2012). Eficiencia térmica de un calentador solar de agua de 80 litros con colector de 1m². Proyecto de Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Agroindustrial. Universidad Nacional Toribio

Anexo

Anexo 1

Tabla A.1. Propiedades del agua a diferentes temperaturas

Temperatura (°C)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kg.K)
0	999,8	421,76
10	999,7	419,21
20	998,2	418,18
30	995,6	417,84
40	992,2	417,85
50	988,1	418,06
60	983,2	418,63
70	977,8	418,95
80	971,8	419,63
90	965,3	420,50
100	958,4	421,59

Anexo 2. Eficiencia en colector solar

La eficiencia de un colector solar se define como el cociente de la energía térmica útil frente a la energía solar total recibida. Además de las pérdidas térmicas existen las pérdidas ópticas. El factor de conversión u eficiencia óptica indica que porcentaje de los rayos solares que penetran en la cubierta transparente del colector (la transmisión) es absorbido. Básicamente, es el producto de transmisión de la cubierta y la tasa de absorción del absorbedor.

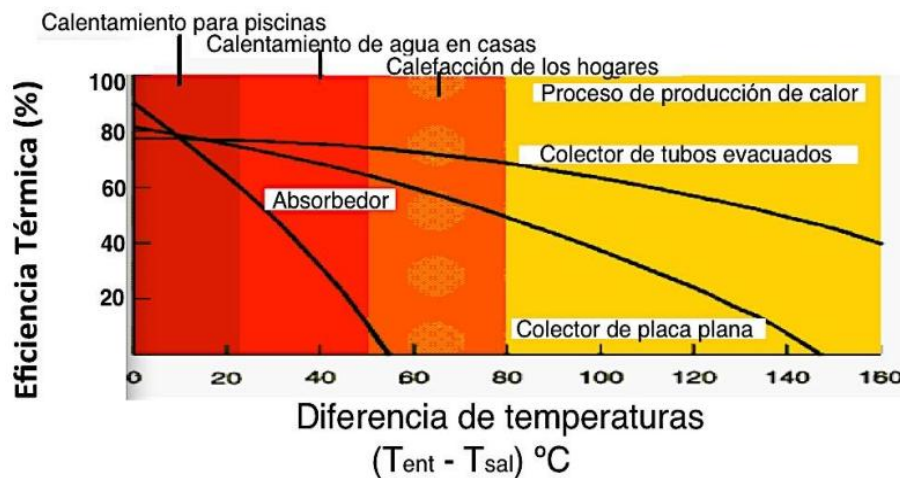


Figura A.1. Variación de la eficiencia térmica en distintos tipos de colectores y en función de la diferencia de temperatura del agua entre la salida y entrada del colector.

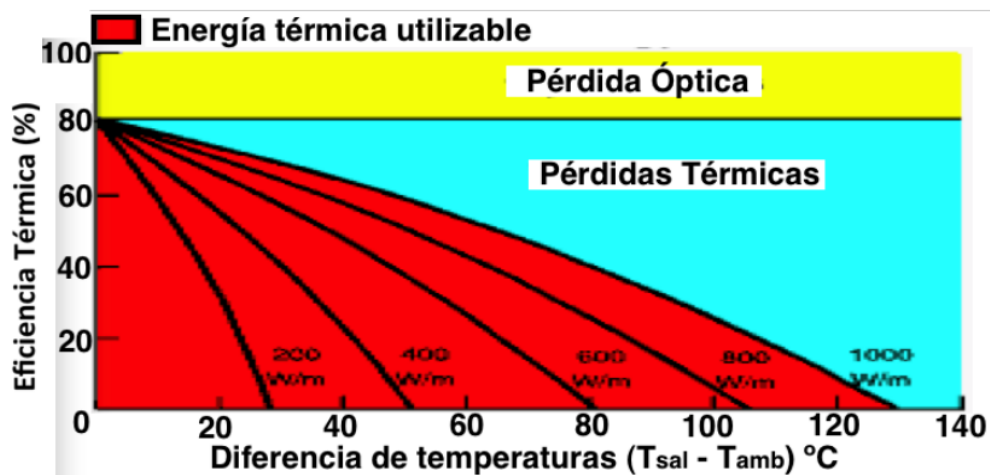


Figura A.2. Eficiencia de colectores solares

Anexo 3: Valores de la declinación y del día del año para el día medio de cada mes

Mes	η	δ
ENERO	15	-21,27
FEBRERO	45	-13,50
MARZO	76	-2,13
ABRIL	106	9,81
MAYO	136	19,13
JUNIO	167	23,35
JULIO	197	21,33
AGOSTO	228	13,61
SEPTIEMBRE	258	2,27
OCTUBRE	288	-9,69
NOVIEMBRE	319	-19,05
DICIEMBRE	349	-23,33

Anexo 4: Situación geográfica de varias ciudades de Cuba

Ciudad o lugar	Latitud	Longitud
CABO DE SAN ANTONIO	21,9 ⁰	84,9 ⁰
PINAR DEL RÍO	22,4 ⁰	83,6 ⁰
NUEVA GERONA	21,9 ⁰	82,8 ⁰
CIUDAD DE LA HABANA	23,0 ⁰	82,4 ⁰
BATABANÓ	22,7 ⁰	82,3 ⁰
MATANZAS	23,0 ⁰	81,6 ⁰
CIENFUEGOS	22,1 ⁰	80,5 ⁰
SANTA CLARA	22,4 ⁰	80,0 ⁰
SANTI SPIRITUS	21,9 ⁰	79,5 ⁰
CAYO SANTA MARÍA	22,7 ⁰	79,0 ⁰
CIEGO DE ÁVILA	21,8 ⁰	78,8 ⁰
CAYO COCO	22,5 ⁰	78,5 ⁰
CAMAGÜEY	21,4 ⁰	77,9 ⁰
CABO CRUZ	19,8 ⁰	77,7 ⁰
LAS TUNAS	20,9 ⁰	76,9 ⁰
PICO TURQUINO	20,0 ⁰	76,8 ⁰
BAYAMO	20,4 ⁰	76,7 ⁰
HOLGUÍN	20,9 ⁰	76,3 ⁰
SANTIAGO DE CUBA	20,0 ⁰	75,8 ⁰
GUANTÁNAMO	20,2 ⁰	75,2 ⁰
BARACOA	20,4 ⁰	74,5 ⁰
PUNTA DE MAISÍ	20,2 ⁰	74,1 ⁰

Anexo 5: Valores de relación entre la radiación total diaria y la radiación extraterrestre diaria

Mes	K_t	$f(K_t)$
ENERO	0,56	0,324
FEBRERO	0,51	0,363
MARZO	0,57	0,316
ABRIL	0,61	0,286
MAYO	0,54	0,339
JUNIO	0,5	0,371

Anexo 6: Ángulo de salida del sol W_s par diferentes latitudes y mes del año

Mes	$\phi = 20$
Enero	81,9
Febrero	85
Marzo	89,2
Abril	93,6
Mayo	90
Junio	97,3
Julio	98.2
Agosto	95.1
Sepetiembre	90.8
Octubre	86.4
Noviembre	82.8
Diciembre	81

Anexo 7: Valor de K, o sea, de la relación entre la radiación total horaria y la total diaria

ω_s	Hora del día							
	11:00 – 12:00	10:00 – 11:00	09:00 – 10:00	08:00 – 09:00	07:00 – 08:00	06:00 – 07:00	05:00 – 06:00	
	12:00 – 13:00	13:00 – 14:00	14:00 – 15:00	15:00 – 16:00	16:00 – 17:00	17:00 – 18:00	18:00 – 19:00	
60°	0,198	0,165	0,103	0,032				
67° 30'	0,179	0,154	0,109	0,051				
75°	0,166	0,143	0,11	0,065	0,019			
82° 30'	0,153	0,0135	0,109	0,072	0,032	0,005		
90°	0,141	0,129	0,106	0,076	0,041	0,013		
97° 30'	0,132	0,12	0,101	0,078	0,049	0,019	0,003	
105°	0,123	0,113	0,099	0,079	0,052	0,026	0,008	
112° 30'	0,116	0,109	0,096	0,079	0,056	0,032	0,012	
120°	0,109	0,102	0,092	0,077	0,059	0,038	0,018	

Anexo 8: Valor de Kd o sea, de la relación entre la radiación difusa horaria y la difusa diaria

ω_s	Hora del día						
	11:00 - 12:00	10:00 - 11:00	09:00 - 10:00	08:00 - 09:00	07:00 - 08:00	06:00 - 07:00	05:00 - 06:00
	12:00 - 13:00	13:00 - 14:00	14:00 - 15:00	15:00 - 16:00	16:00 - 17:00	17:00 - 18:00	18:00 - 19:00
60°	0,19	0,161	0,114	0,041			
67° 30'	0,169	0,15	0,115	0,062			
75°	0,153	0,139	0,113	0,074	0,025		
82° 30'	0,14	0,129	0,108	0,077	0,04		
90°	0,131	0,12	0,105	0,079	0,05	0,018	
97° 30'	0,12	0,113	0,1	0,079	0,056	0,03	
105°	0,123	0,108	0,096	0,079	0,058	0,037	0,011
112° 30'	0,109	0,101	0,091	0,078	0,06	0,04	0,02
120°	0,101	0,098	0,088	0,077	0,06	0,042	0,026

Anexo 9 :Ángulo de incidencia de la radiación directa sobre el colector y el el ángulo del cénit para cada hora

J U N I O						
ω	± 82,5°		± 67,5°		± 52,5°	
Hora	06:00 a 07:00		07:00 a 08:00		08:00 a 09:00	
	17:00 a 18:00		16:00 a 17:00		15:00 a 16:00	
(φ - β)	θ _r	cos θ _r	θ _r	cos θ _r	θ _r	cos θ _r
-25	-	-	81,3	0,151	70,2	0,339
-22,5	-	-	80,0	0,173	68,6	0,365
-20	-	-	78,8	0,195	67,1	0,390
-17,5	-	-	77,5	0,216	65,5	0,414
-15	89,2	0,013	76,3	0,237	64,1	0,438
-12,5	88,2	0,031	75,1	0,257	62,6	0,460
-10	87,2	0,049	73,9	0,277	61,2	0,482
-7,5	86,1	0,067	72,7	0,297	59,8	0,503
-5	85,1	0,085	71,6	0,316	58,5	0,522
-2,5	84,1	0,102	70,5	0,334	57,2	0,541
0	83,1	0,120	69,4	0,351	56,0	0,559
2,5	82,1	0,137	68,4	0,368	54,8	0,576
5	81,1	0,154	67,4	0,385	53,7	0,591
7,5	80,2	0,171	66,4	0,400	52,7	0,606
10	79,2	0,187	65,5	0,415	51,7	0,619
12,5	78,3	0,203	64,6	0,429	50,8	0,631
15	77,4	0,218	63,8	0,442	50,0	0,642
17,5	76,5	0,233	63,0	0,454	49,3	0,652
20	75,6	0,248	62,2	0,466	48,6	0,661
22,5	74,8	0,262	61,6	0,476	48,1	0,668
25	74,0	0,276	60,9	0,486	47,6	0,674

ω	± 37,5°		± 22,5°		± 7,5°	
Hora	09:00 a 10:00		10:00 a 11:00		11:00 a 12:00	
	14:00 a 15:00		13:00 a 14:00		12:00 a 13:00	
(φ - β)	θ _r	cos θ _r	θ _r	cos θ _r	θ _r	cos θ _r
-25	60,5	0,493	53,0	0,602	48,9	0,658
-22,5	58,6	0,522	50,8	0,632	46,4	0,690
-20	56,7	0,549	48,6	0,662	43,9	0,720
-17,5	54,8	0,576	46,4	0,690	41,5	0,749
-15	53,0	0,601	44,2	0,717	39,0	0,777
-12,5	51,3	0,626	42,0	0,743	36,6	0,803
-10	49,6	0,649	39,9	0,767	34,1	0,828
-7,5	47,9	0,671	37,9	0,789	31,7	0,851
-5	46,3	0,691	35,8	0,811	29,3	0,872
-2,5	44,7	0,711	33,9	0,830	26,8	0,892
0	43,2	0,729	32,0	0,848	24,4	0,910
2,5	41,8	0,745	30,1	0,865	22,1	0,927
5	40,5	0,760	28,4	0,880	19,7	0,941
7,5	39,3	0,774	26,8	0,893	17,4	0,954
10	38,2	0,786	25,3	0,904	15,1	0,965
12,5	37,2	0,797	23,9	0,914	13,0	0,975
15	36,3	0,806	22,8	0,922	10,9	0,982
17,5	35,5	0,814	21,8	0,928	9,1	0,987
20	34,9	0,820	21,2	0,933	7,7	0,991
22,5	34,5	0,825	20,7	0,935	7,0	0,993
25	34,1	0,828	20,6	0,936	7,0	0,992

Anexo 10: Transmisividad por reflexión, transmisividad por absorción, transmisividad total en función del ángulo de incidencia

θ_i	$N = 1$	θ_i	$N = 1$	θ_i	$N = 1$
			$k_a L$		$k_a L$
0	0,92		0,01		0,01
25	0,92	0	0,99	0	0,91
45	0,9	25	0,99	25	0,91
50	0,89	45	0,99	45	0,89
55	0,87	50	0,99	50	0,88
60	0,84	55	0,99	55	0,86
65	0,80	60	0,99	60	0,83
70	0,72	65	0,99	65	0,79
75	0,61	70	0,99	70	0,71
80	0,46	75	0,99	75	0,61
85	0,24	80	0,99	80	0,45
90	0,00	85	0,99	85	0,24
				90	0,00

Anexo 11: Factor ($\tau\alpha_e$) en función del ángulo de incidencia

θ_i	$N = 1$
	$k_a L$
	0,01
0	0,83
25	0,83
45	0,81
50	0,80
55	0,79
60	0,76
65	0,72
70	0,65
75	0,56
80	0,41
85	0,22

Anexo 12: Coeficiente de pérdida por cubierta U_t

T_p	$w = 0 \quad h_w = 5$			$w = 1,6 \quad h_w = 10$			$w = 1,6 \quad h_w = 20$		
	$N = 1$	$N = 2$	$N = 3$	$N = 1$	$N = 2$	$N = 3$	$N = 1$	$N = 2$	$N = 3$
30	3,50	2,11	1,50	3,92	2,26	1,58	4,53	2,49	1,71
40	3,90	2,37	1,68	4,44	2,56	1,78	5,19	2,84	1,93
50	4,15	2,54	1,80	4,77	2,76	1,92	5,61	3,06	2,08
60	4,35	2,68	1,90	5,04	2,92	2,03	5,95	3,25	2,20
70	4,54	2,80	2,00	5,28	3,06	2,13	6,25	3,42	2,32
80	4,72	2,92	2,09	5,50	3,20	2,23	6,52	3,57	2,42
90	4,90	3,04	2,17	5,71	3,33	2,32	6,79	3,72	2,53
100	5,08	3,16	2,26	5,92	3,46	2,42	7,05	3,87	2,63
110	5,26	3,28	2,35	6,13	3,59	2,51	7,30	4,02	2,73

Anexo 13: Conductividad térmica de algunos materiales

Material	k [kCal/hmK]
COBRE	332
ALUMINIO	182
ACERO	41
CONCRETO	1,5
VIDRIO	0,9
AGUA (20°C)	0,5
ASBESTO CEMENTO	0,27
CORCHO (EN PLANCHA PRENSADA)	0,035
POLIESTIRENO EXPANDIDO	0,029
POLIURETANO (ESPUMA RÍGIDA)	0,021

Anexo 14 : Factor de eficiencia del colector

U_{29}	F	U_{29}	F
0,00	1,000	0,60	0,895
0,05	0,999	0,65	0,880
0,10	0,997	0,70	0,863
0,15	0,993	0,75	0,847
0,20	0,987	0,80	0,830
0,25	0,980	0,85	0,813
0,30	0,971	0,90	0,796
0,35	0,961	0,95	0,779
0,40	0,950	1,00	0,762
0,45	0,938	1,10	0,728
0,50	0,924	1,20	0,695
0,55	0,910	1,30	0,663

Anexo 15 :Valor de $\ln(u)$ para el cálculo del flujo de fluido en circulación natural

u	$\ln(u)$	u	$\ln(u)$	u	$\ln(u)$	u	$\ln(u)$	u	$\ln(u)$
1,00	0,0000	1,10	0,0953	1,20	0,1823	1,30	0,2624	1,40	0,3365
1,01	0,0100	1,11	0,1044	1,21	0,1906	1,31	0,2700	1,41	0,3436
1,02	0,0198	1,12	0,1133	1,22	0,1989	1,32	0,2776	1,42	0,3507
1,03	0,0296	1,13	0,1222	1,23	0,2070	1,33	0,2852	1,43	0,3577
1,04	0,0392	1,14	0,1310	1,24	0,2151	1,34	0,2927	1,44	0,3646
1,05	0,0488	1,15	0,1398	1,25	0,2231	1,35	0,3001	1,45	0,3716
1,06	0,0583	1,16	0,1484	1,26	0,2311	1,36	0,3075	1,46	0,3784
1,07	0,0677	1,17	0,1570	1,27	0,2390	1,37	0,3148	1,47	0,3853
1,08	0,0770	1,18	0,1655	1,28	0,2469	1,38	0,3221	1,48	0,3920
1,09	0,0862	1,19	0,1740	1,29	0,2546	1,39	0,3293	1,49	0,3988

Anexo 15 : Resultados que intervinieron en la eficiencia del colector

U _t kcal/hm ² K	U _b kcal/hm ² K	U _e kcal/hm ² K	U _L kcal/hm ² K	F _R
4,77	2,9	0,29	7,96	0,6

De	a	H kcal/m ² hora	Hd kcal/m ² hora	θ _T	Rb	S kcal/m ² hora
7	8	191,736	86,749	73,468	0,609	76,846
8	9	355,414	137,063	60,696	0,7406	196,434
9	10	495,709	182,173	48,988	0,801	308,869
10	11	603,268	208,197	39,18	0,830	388,573
11	12	659,386	227,282	33,236	0,843	430,619
12	1	659,386	227,282	33,236	0,843	430,619
1	2	603,268	208,197	39,18	0,830	388,573
2	3	495,709	182,173	48,988	0,801	308,869
3	4	355,414	137,06	60,696	0,740	196,434
4	5	191,736	86,749	73,468	0,609	76,846