

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Mecánica



*Excelencia que trasciende*

Diseño de un sistema combinado de calentamiento de  
agua por medio de paneles solares

Luís Gilberto Sáenz

Guatemala  
2007



**Diseño de un sistema combinado de calentamiento de  
agua por medio de paneles solares**

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

**Diseño de un sistema combinado de calentamiento de  
agua por medio de paneles solares**

Trabajo de investigación presentado por Luís Gilberto Sáenz Solís para optar  
al grado de Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala  
2007

## RESUMEN

En vista de la creciente demanda de energía eléctrica y el alza en los precios de su generación, es necesario utilizar fuentes alternas de energía. La energía solar es una fuente viable, aunque poco predecible. En el consumo eléctrico residencial, el calentamiento de agua constituye un alto porcentaje de la cuota eléctrica. Si se instala un sistema combinado de energía solar y eléctrica es posible reducir el consumo eléctrico sin depender completamente de la energía solar.

La investigación abarca estudios sobre la transferencia de calor y estudios climáticos para determinar el potencial solar guatemalteco. Se analizan diversos sistemas de calentamiento eléctrico y sistemas solares para determinar la mejor alternativa. Se plantea el diseño de un sistema combinado de calentamiento de agua que sea más económico que uno solo accionado por electricidad.

Con base a un análisis financiero y de sensibilidad se demuestra la rentabilidad de un sistema combinado comparado a un sistema eléctrico. El sistema combinado será más eficiente dependiendo de la región donde se ubique, la radiación solar que reciba y el consumo de agua caliente.

## CONTENIDO

	<u>Página</u>
RESUMEN	v
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABLAS	viii
Capítulos	
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	2
III. MARCO TEÓRICO	3
A. PRINCIPIOS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR	3
B. CALENTADORES ELÉCTRICOS	5
C. SISTEMAS DE ENERGÍA SOLAR	11
D. INVESTIGACIÓN METEOROLÓGICA	23
IV. DISEÑO DE UN SISTEMA COMBINADO DE CALENTAMIENTO DE AGUA	30
A. SISTEMA COMBINADO	31
V. ANÁLISIS DEL SISTEMA	36
A. ANÁLISIS DEL CALENTADOR ELÉCTRICO	36
B. ANÁLISIS DE LOS RECOLECTORES SOLARES	39
C. ANÁLISIS FINANCIERO	40
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	44
VII. BIBLIOGRAFÍA	45
VIII. APÉNDICES	46
A. TEMPERATURAS DE UN CALENTADOR SOLAR	46
B. MAPA DE ELEVACIONES DE GUATEMALA	47
C. MAPA DE LAS REGIONES DE GUATEMALA	48

## LISTA DE FIGURAS

	<u>Página</u>
Figura	
1. Figura 1.1 Calentador sin tanque	6
2. Figura 1.2 Calentador de rollo	7
3. Figura 1.3 Calentador indirecto	8
4. Figura 1.4 Bomba de calor	9
5. Figura 1.5 Calentador convencional	9
6. Figura 2.1 Recolector por lotes	12
7. Figura 2.2 Esquema de recolector por lotes	13
8. Figura 2.3 Esquema simple circuito abierto	14
9. Figura 2.4 Esquema circuito abierto	16
10. Figura 2.5 Esquema simple circuito cerrado	17
11. Figura 2.6 Esquema de termosifón	18
12. Figura 2.7 Esquema circuito cerrado	19
13. Figura 2.8 Vista frontal de un sistema termosifón	20
14. Figura 2.9 Vista lateral de un sistema termosifón	20
15. Figura 2.10 Vista de tubos de un sistema termosifón	21
16. Figura 2.11 Vista del tanque de un sistema termosifón	21
17. Figura 2.12 Sistema termosifón circuito cerrado	22
18. Figura 2.13 Sistema de fase cambiada	22
19. Figura 3.1 Rotación de la Tierra	23
20. Figura 3.2 Inclinación de la Tierra	24
21. Figura 3.3 Radiación solar global horizontal	29
22. Figura 4.1 Vista de un tubo de cobre	32
23. Figura 4.2 Diseño combinado de calentamiento de agua	34
24. Figura 5.1 Análisis de sensibilidad	43

## LISTA DE TABLAS

	<u>Página</u>
Tabla	
25. Tabla 3.1 Radiación solar máxima	26
26. Tabla 3.2 Radiación solar media	27
27. Tabla 3.3 Brillo solar	27
28. Tabla 3.4 Temperatura media	28
29. Tabla 4.1 Uso diario de agua caliente (60°C)	30
30. Tabla 4.2 Uso diario de agua caliente	30
31. Tabla 4.3 Temperatura media promedio	31
32. Tabla 5.1 Energía de un calentador eléctrico	39
33. Tabla 5.2 Energía solar	40
34. Tabla 5.3 Análisis financiero	41
35. Tabla 5.4 Análisis de sensibilidad	42

Vo.Bo.

(f) \_\_\_\_\_  
Ing. Manlio Pagurut

Tribunal:

(f) \_\_\_\_\_  
Ing. José Joaquín Garoz

(f) \_\_\_\_\_  
Ing. Manuel Ruano

(f) \_\_\_\_\_  
Ing. Manlio Pagurut

Fecha de aprobación: 20 de Febrero del 2007

## I. INTRODUCCIÓN

En Guatemala un 52.5% de la energía se produce a partir de combustibles fósiles de acuerdo a las estadísticas obtenidas del Ministerio de Energía y Minas. El petróleo, el principal de estos combustibles fósiles, es una fuente de energía no renovable cuyo precio tiene tendencia a seguir aumentando. Una escasez de combustibles elaborados a partir del petróleo incrementarán el precio de la energía eléctrica en Guatemala.

Existen fuentes alternas de energía como la energía solar, eólica y biodisel que prometen reemplazar al petróleo, y por esto es que su estudio e investigación es cada día mas importante.

El consumo residencial es afectado principalmente por refrigeradoras, calentadores y bombas de agua, entre otros. El modo de vida de las personas en la actualidad no permite eliminar estos aparatos. Es por ello que, si la tendencia al incremento de demanda energética continúa, es imprescindible la investigación y desarrollo de alternativas de energía sostenibles.

El propósito de esta tesis es diseñar un sistema combinado de paneles solares fototérmicos y calentador eléctrico que reduzca considerablemente el consumo eléctrico para el calentamiento de agua.

Se analizará el clima de la ciudad de Guatemala para poder determinar durante qué época del año se obtiene el mayor beneficio de la energía solar. A través de un análisis financiero de los costos de la implementación de paneles solares se establece la rentabilidad de sistema combinado sobre un sistema de calentamiento eléctrico.

## II. OBJETIVOS

### A. General:

Diseñar un sistema combinado de calentamiento del agua residencial que utilice energía solar y energía eléctrica.

### B. Específicos:

1. Determinar el impacto en el consumo eléctrico que causaría la instalación de un sistema combinado para el calentamiento del agua residencial.
2. Establecer un modelo sobre la generación de energía solar en función de las condiciones climáticas de la ciudad de Guatemala.
3. Analizar el desempeño financiero de un sistema combinado de calentamiento del agua residencial.

### III. MARCO TEÓRICO

#### A. Principios de la transferencia de calor

La transferencia de calor es el estudio del movimiento de energía en un sistema en determinado tiempo. Si se tienen dos elementos en un sistema, uno con mayor temperatura que el otro, se producirá un movimiento de energía del elemento con mayor temperatura hacia el elemento con menor temperatura. Este cesará al alcanzar un equilibrio, en el cual ambos elementos tendrán la misma temperatura. Por lo tanto, media vez exista un diferencial de temperaturas en un sistema, habrá transferencia de calor hasta alcanzar un equilibrio.

Existen tres mecanismos básicos de la transferencia de calor. Estos son:

- Conducción
- Convección
- Radiación

1. **Conducción.** Se le llama conducción a la transferencia de energía de una partícula con mayor energía hacia otra. Estas partículas pueden ser sólidas, líquidas o gaseosas. La velocidad de la conducción de calor depende del diferencial de temperatura ( $\Delta T$ ), del área superficial ( $A$ ), del espesor ( $l$ ) y de la conductividad térmica ( $k$ ). La relación entre estas variables se puede observar en la siguiente ecuación.

$$\dot{Q}_{cond} = kA \frac{\Delta T}{l}$$

La conductividad térmica es la velocidad a la cual se transfiere el calor a través de un material. La conducción a través de materiales sólidos se produce debido a las vibraciones (depende del arreglo de las moléculas) y al flujo libre de electrones. En los materiales que se encuentran en estado líquido y gaseoso, la transferencia se da por medio de colisiones y difusión molecular.

2. **Convección.** Si la transferencia de calor se produce entre una superficie sólida y un fluido (sea gas o líquido), se le denomina convección. Este

mecanismo de transferencia involucra la conducción y un movimiento de fluidos que remueve el de mayor temperatura y lo reemplaza por otro a una menor temperatura.

La convección puede ser forzada o natural. Cuando medios externos, como ventiladores, bombas o el viento, producen el movimiento del fluido se le denomina convección forzada. Si las fuerzas que producen el movimiento del fluido son ocasionadas por diferencias de densidades debido a la variación de temperaturas se les denomina convección natural.

La transferencia de calor por convección es proporcional al diferencial de temperaturas, al área superficial que está en contacto con el fluido ( $A_s$ ) y al coeficiente de transferencia de calor por convección ( $h$ ). El coeficiente ( $h$ ) no es una propiedad del material, a diferencia de la conductividad térmica, y depende de factores como la configuración geométrica del objeto, del movimiento del fluido y sus propiedades. Determinar el coeficiente de convección incluye cálculos complicados que no son propósito de este estudio.

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty)$$

1. **Radiación.** A la energía emitida por ondas electromagnéticas se le denomina radiación y no necesita de un medio interpuesto como la convección y conducción. La radiación puede ser absorbida, reflejada o transmitida por cualquier sólido, líquido o gas. La absorción transforma la energía radiante en energía térmica y ésta es almacenada en las moléculas del objeto. Si las ondas rebotan en la superficie y regresan con la misma frecuencia, se dice que fueron reflejadas; si, en vez de rebotar, pasan a través del objeto con la misma frecuencia, fueron transmitidas.

Un cuerpo negro es cualquier superficie que emite radiación a la máxima velocidad, expresada por la ley de Stefan-Boltzmann y su constante ( $\sigma$ ).

$$\dot{Q}_{max} = \sigma A_s T_s^4$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2} K^4$$

Los cuerpos negros son una idealización y la radiación producida por todas las superficies reales es menor que la del cuerpo negro. Por ello a los materiales se les asigna una emisividad ( $\epsilon$ ) comprendida entre 0 y 1, siendo 1

el valor más cercano a un cuerpo negro. La cantidad de energía que un material puede absorber se le denomina absorptividad ( $\alpha$ ). A ésta, al igual que a la emisividad, se le asigna un rango entre 0 y 1. Si una superficie recibe una cantidad de calor, una parte de la radiación será reflejada, exceptuando en el cuerpo negro, el cual absorbe toda la radiación.

$$\dot{Q}_{emitiida} = \epsilon \sigma A_s T_s^4$$

$$\dot{Q}_{abs} = \alpha \dot{Q}_{inc}$$

La rapidez de transferencia de calor entre dos superficies que se encuentran a distintas temperaturas es representada por la siguiente ecuación.

$$\dot{Q}_{rad} = \epsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{alred}^4)$$

## A. Calentadores eléctricos

Un calentador de agua es un electrodoméstico para calentar el agua por encima de la temperatura ambiente. En uso industrial, los calentadores de agua se conocen como calderas. En casa y para uso comercial la mayoría de calentadores de agua son de tipo tanque, en los cuales una determinada cantidad de agua se mantiene constantemente caliente y lista para ser utilizada.

Los calentadores pueden funcionar por medio de electricidad, gas natural, diesel y otras fuentes de energía. Los calentadores de agua de tipo tanque pueden ser más eficientes mediante la instalación de capas adicionales de aislamiento alrededor del tanque, dispositivos de válvula de fluido en su entrada y salida, temporizadores de ciclo, ignición electrónica, sistemas de sellado en la toma de aire y aislamiento de la tubería. Los modelos de "alta eficacia" pueden convertir hasta el 98% del combustible en energía al calentar el agua.

Los calentadores de agua sin tanque e instantáneos están ganando cada vez más aceptación, ya que son más eficientes que los calentadores tipo tanque al no sufrir pérdidas de energía cuando no se está utilizando el agua. Los calentadores sin tanque funcionan generalmente por medio de electricidad, gas natural y propano.

## 1. Tipos de calentadores eléctricos

a. Calentadores sin tanque. Este tipo de calentadores no necesita de un tanque para almacenar el agua caliente, pues sólo calienta el agua que se va a utilizar por medio de una resistencia eléctrica. Este sistema se instala a una corta distancia del lugar donde se necesite. Al utilizar el agua caliente, agua fría fluye a través del calentador, una vez se deje de usar el agua caliente el agua deja de fluir por el calentador desactivando el sistema. En la figura 1.1 se puede observar un esquema sencillo de un calentador sin tanque o calentador por demanda.

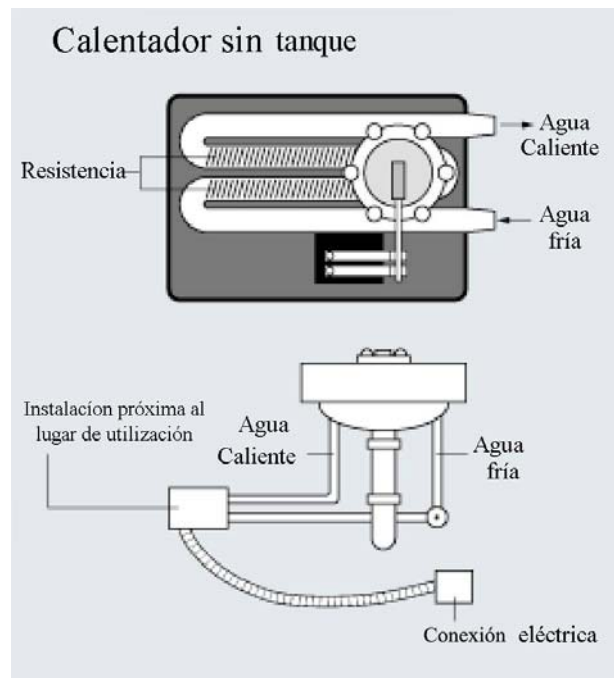


Figura 1.1 Calentador sin Tanque ([www.eere.energy.gov](http://www.eere.energy.gov))

La principal desventaja de este tipo de sistemas es que el flujo de agua caliente es limitado y si la demanda es alta el sistema no podría suplirla. En este caso sería necesario instalar varios calentadores en cada duchas o en cada lugar que se desee el agua caliente. Este sistema es más costoso que el sistema con tanque de almacenamiento, pero es más eficiente al no tener las pérdidas de calor que tiene el tanque de almacenamiento y sólo utiliza energía cuando el usuario lo requiere.

b. Calentador de rollo y calentador indirecto. Un calentador de rollo sin tanque utiliza un rollo de tubería o un intercambiador de calor instalado en una caldera. Cuando una llave de agua caliente es abierta, el agua pasa a través del intercambiador, para después proveer agua caliente. Generalmente la presentación de este tipo de calentador es como una caja que contiene en su interior el rollo o espiral de tubería y la fuente de calor, sea ésta una resistencia eléctrica o bien una llama directa producida por gas. Pero, debido a que depende de una caldera para que caliente el agua directamente, el calentador de rollo trabaja de forma más eficiente en climas fríos en donde se utilizan con más frecuencia. En la figura 1.2 se encuentra un esquema de un calentador de rollo.

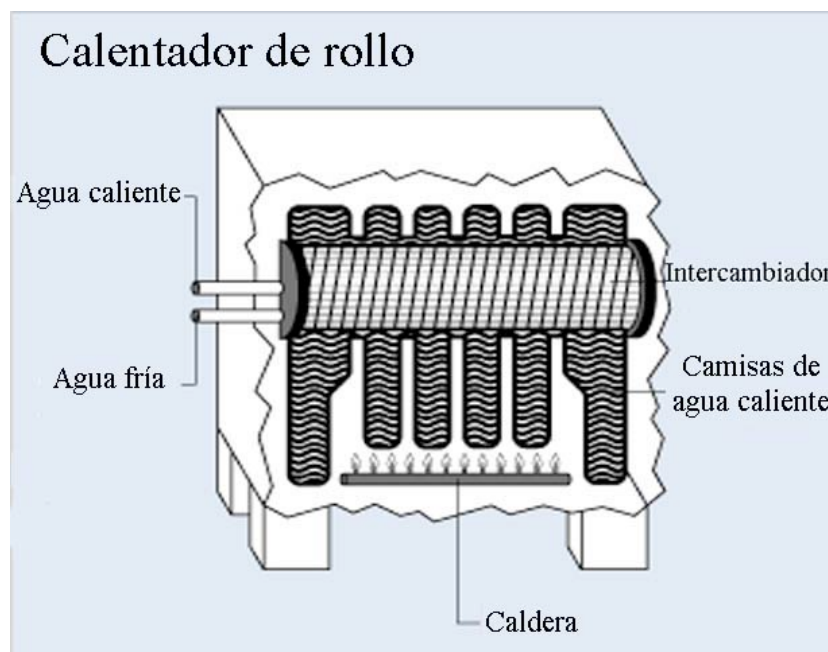


Figura 1.2 Calentador de rollo([www.eere.energy.gov](http://www.eere.energy.gov))

El calentador indirecto de agua necesita de un tanque de almacenamiento. El calentador indirecto utiliza una caldera para calentar el agua que circula en el intercambiador de calor, ubicado en el tanque de almacenamiento. La energía almacenada por el tanque de agua permite que la caldera se apague o encienda con menos frecuencia, lo cual permite un ahorro de energía. La caldera utiliza un quemador que provee el calor necesario, puede utilizar gas, diesel, propano, electricidad o una combinación de cualquiera de éstos como combustible. En la figura 1.3 se puede observar un calentador indirecto.

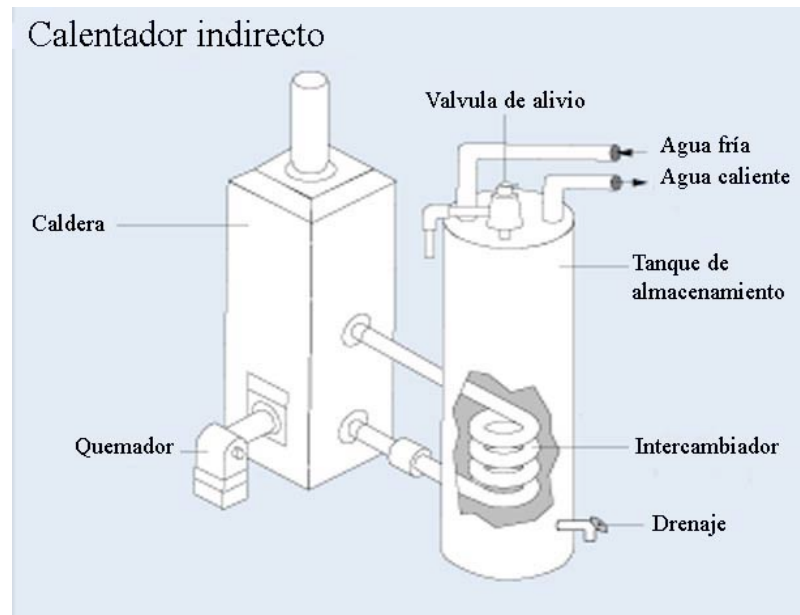


Figura 1.3 Calentador indirecto(www.eere.energy.gov)

El tanque de depósito de agua tiene un drenaje en la parte inferior; una entrada para la tubería de agua fría y una salida para la tubería de agua caliente en la parte superior. También posee una válvula de alivio de presión/temperatura en la parte superior.

c. Bomba de calentamiento. Este sistema puede usarse para calentar el agua solamente o como un sistema combinado de calentador de agua y de la temperatura ambiente. Esto se logra al absorber el calor de una fuente de baja temperatura (ambiente que se desee refrigerar) y suministrarlo a uno de alta temperatura (Tanque de agua caliente). La bomba de calentamiento utiliza electricidad para mover el calor de un lugar a otro, en lugar de generar calor directamente. De esta manera puede obtenerse de dos a tres veces más eficiencia energética que con los calentadores de resistencia eléctrica convencional.

Para mover el calor la bomba trabaja como un refrigerador en reversa. Mientras el refrigerador toma calor del interior de una caja y lo expulsa a sus exteriores, la bomba de calentamiento toma el calor de su exterior y lo expulsa dentro de un tanque para calentar el agua. El sistema es más eficiente en un clima cálido donde se puede aprovechar la temperatura ambiente.

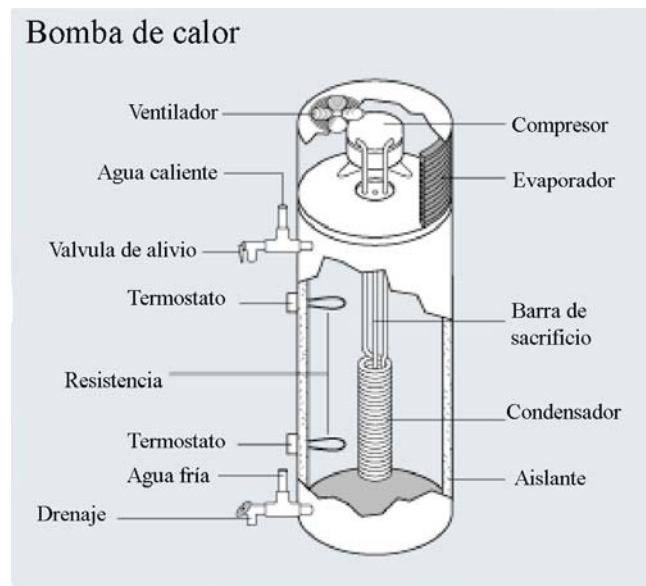


Figura 1.4 Bomba de calor ([www.eere.energy.gov](http://www.eere.energy.gov))

En la figura 1.4 se puede observar que la bomba de calentamiento está compuesta de una cámara superior donde se encuentra un ventilador, un compresor cilíndrico y un evaporador que corre a lo largo del interior de la cámara inferior. En la parte lateral superior se encuentra la salida para la tubería de agua caliente con su válvula de alivio de presión y temperatura que posee dos termostatos conectados por las resistencias eléctricas; y en la parte inferior tienen la entrada que conecta a la tubería de agua fría, y la válvula de drenaje.

d. Calentador de agua convencional

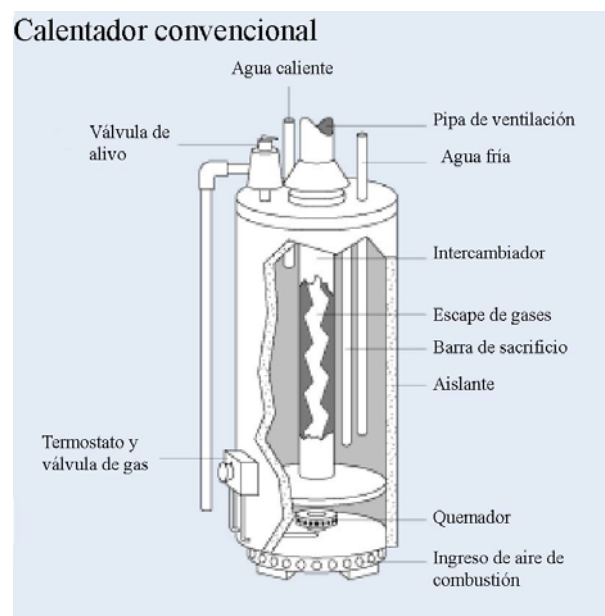


Figura 1.5 Calentador convencional ([www.eere.energy.gov](http://www.eere.energy.gov))

Los calentadores de almacenaje convencional son los más populares que existen en los hogares. Al tener el agua almacenada, el calentador funciona liberando agua caliente en la parte superior del tanque y remplazando a ésta por agua fría que entra a la parte inferior del tanque, para así asegurar que siempre se mantenga lleno el tanque.

En la figura 1.5 se puede observar un tanque de almacenaje convencional típico. En la parte superior se encuentran dos tubos delgados, uno para la salida del agua caliente y el otro para la entrada del agua fría. En el centro del tanque se encuentra un tubo de ventilación. En la parte superior se encuentra también una válvula de alivio de presión y temperatura conectada a un tubo abierto que va hasta abajo del tanque. Cerca del fondo del tanque se encuentra un termostato y una válvula de gas. Si el calentador es eléctrico, no tendría el quemador ni la válvula de gas. Las fuentes de combustible de los calentadores de agua de almacenaje convencional pueden ser gas natural, propano, diesel y electricidad. El gas natural y el propano operan de manera similar. Un quemador de gas calienta el agua. Un termostato abre la válvula de gas cuando la temperatura baja y la cierra cuando llega a la temperatura requerida. Los que funcionan con diesel operan similarmente, pero estos tienen quemadores con motor eléctrico que realizan una mezcla de diesel y aire, quemándolas con electrodos. Los calentadores eléctricos tienen una o dos resistencias eléctricas, cada una con su termostato.

Debido a que el agua se está calentando constantemente en este tipo de calentador, la energía se desperdicia cuando el agua no se está usando. Esto es lo que se llama pérdida de calor por la espera. Solamente los calentadores sin tanque como los mencionados anteriormente no sufren este tipo de pérdidas. También se pueden evitar un alto porcentaje de estas pérdidas con un mejor aislamiento y con válvulas de resistencia térmica.

En el caso de los calentadores de gas y diesel se logra mayor eficiencia si son asistidos por un sistema de ventilación y combustión atmosférica sellada. Una instalación y mantenimiento adecuados del calentador de agua pueden optimizar la eficiencia en el consumo de energía.

## B. Sistemas de energía solar

El interés en la energía solar data desde antes de Cristo con Arquímedes y la historia que narra cómo los griegos repelieron al ejército romano incinerando su flotilla en 212 A.D. mediante la concentración de la energía solar. No es hasta el siglo XVII cuando se crean los primeros dispositivos accionados por energía solar. Uno de los primeros fue creado por Salomón de Caux, quien publica que mediante el uso de espejos, y dirigiendo la energía solar a una recámara de metal parcialmente llena con agua logra hacer por la expansión del agua caliente una pequeña fuente.

Los dispositivos creados varían desde motores, sistemas de calentamiento de agua, de ambientes, bombas de agua hasta hornos para cocinar. Muchos de estos inventos no pasaron a ser más que curiosidades. Se descubrió que los costos del equipo y mantenimiento de estos inventos eran muy altos y no eran económicamente factibles.

En la actualidad existen diversos equipos diseñados para recolectar la energía solar y transformarla en energía útil para el hombre. Estos sistemas solares se dividen en dos grupos: los recolectores por medio de paneles fotovoltaicos, los cuales convierten la energía solar en energía eléctrica, y las aplicaciones fototérmicas. Este estudio se enfoca únicamente en los recolectores fototérmicos para calentamiento de agua domiciliaria. El elevado costo de los paneles fotovoltaicos y la baja eficiencia aumentan el número de paneles necesarios para suplir la demanda eléctrica del calentador, lo cual imposibilita la utilización.

Los recolectores fototérmicos son básicamente superficies que captan los rayos solares y por medio de transferencia de calor elevan la temperatura de un fluido. Existen diversas aplicaciones de esta tecnología; entre las que se encuentran el calentamiento de agua, calentamiento de ambientes, invernaderos y cocinas solares. El calentamiento de agua, tema en que se enfoca este estudio, se puede dividir en sistema de recolección por lotes, sistema de circulación forzada, sistema termosifón y sistema de fase cambiada.

## 1. Tipos de sistemas solares

a. Sistema de recolección por lotes. Los recolectores por lote (figura 2.1) son los que calientan una cantidad determinada de agua luego se utiliza y vuelven a llenarse una vez el agua ha sido utilizada. Este proceso es repetido en un intervalo definido de tiempo, generalmente de un día, dependiendo del uso al que se destine el colector. Estos recolectores suelen ser uno o varios tanques metálicos pintados de negro dentro de una caja con una cubierta transparente que permite la entrada de los rayos solares, como se puede observar en la figura 2.2. El propósito de la pintura negra es absorber la mayor cantidad de energía solar posible.

Las ventajas de este sistema es que son más económicos que los otros y son fáciles de construir, pero la eficiencia del sistema es menor. Un punto en contra es que si el agua no se utiliza, se enfriaría durante el transcurso de la noche. Esta pérdida de calor puede evitarse si se aísla la caja, pero se recomienda que el agua se utilice en la tarde. Se pueden agregar elementos reflectivos para incrementar la recolección de energía solar y por lo tanto la eficiencia del sistema.

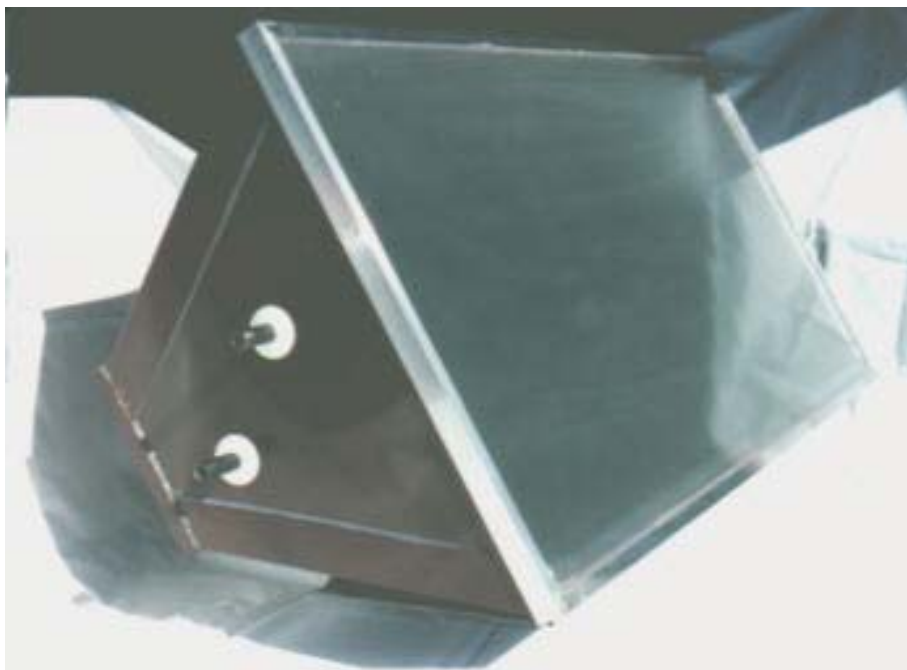


Figura 2.1 Recolector por lotes ([kingsolar.com/catalog](http://kingsolar.com/catalog))

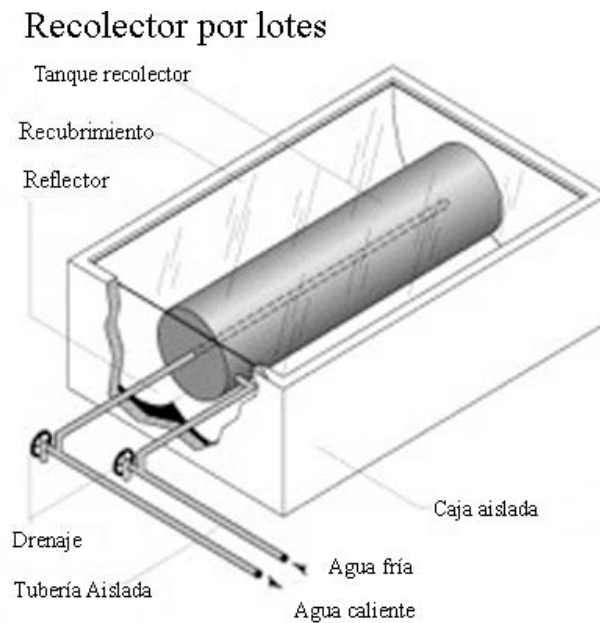


Figura 2.2 Esquema de recolector por lotes (jc-solarhomes.com)

Según estudios elaborados por el Ministerio de Energía y Minas, el agua en este tipo de sistemas puede llegar a calentarse a unos 50 grados Celsius en un día soleado. Debido a su bajo costo y a su fácil construcción, varios de estos equipos fueron instalados en el área rural con el propósito de proporcionar agua caliente para bañarse. Uno de ellos se puede observar en la Dirección de Energía en la zona 12 de la ciudad de Guatemala.

b. Sistema de circulación forzada. A diferencia de la recolección por lotes, la circulación forzada calienta constantemente el agua que ingresa al sistema. La circulación se debe a que una bomba proporciona al sistema la presión necesaria para mover el fluido a través de los paneles, en donde recibe la energía del sol. Los paneles son una serie de tubos pintados de negro cubiertos con un vidrio y arreglados de distintas formas, dependiendo del diseño.

El sistema de paneles puede ser de circuito abierto o circuito cerrado. Ambos sistemas tienen un tanque de almacenamiento aislado para evitar las pérdidas de calor.

1) Circuito abierto. El circuito abierto es aquel en el que el fluido que se calienta en los paneles solares (fluido de transferencia de calor) es el que se utiliza como agua doméstica. En la figura 2.3 se puede observar

un esquema simple de un circuito abierto. La diferencia en la colocación de los tubos se debe a que el agua caliente, que regularmente se puede llegar a calentar hasta 70C, tiene una menor densidad que el agua fría. En la ciudad de Guatemala la temperatura de suministro de agua oscila entre 15 y 25 grados Celsius, aunque esto depende de la ubicación exacta y de la época del año.

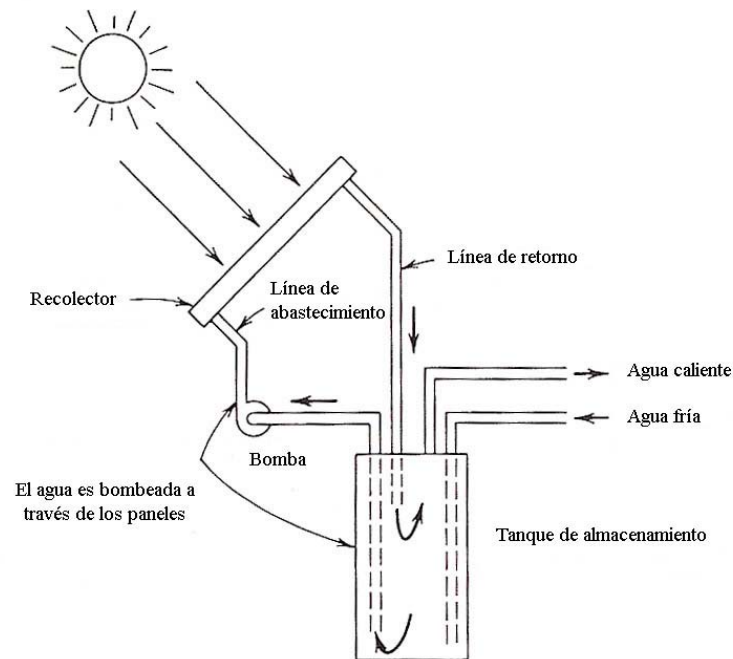


Figura 2.3 Esquema simple circuito abierto(Solar Energy Systems Design)

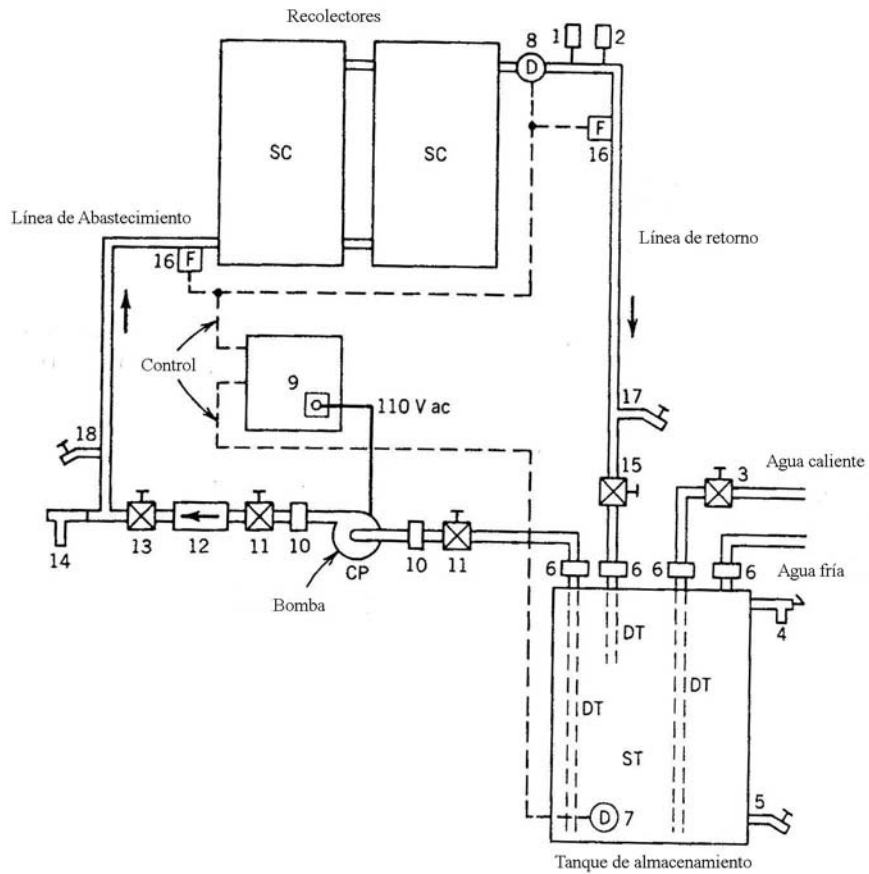
El sistema funciona de la siguiente manera: el agua fría que se encuentra en el fondo del tanque es succionada por medio de una bomba y es forzada a pasar a través de los recolectores solares. Estos recolectores absorben la radiación solar calentando así el agua. Al terminar de pasar por el serpentín o tubos del recolector, el agua es depositada en la parte superior del tanque de almacenamiento, garantizando así que el agua con una menor temperatura va a ser succionada por la bomba para poder ser calentada por los recolectores.

Debido a la diferencia de densidades, el agua con mayor temperatura permanece en la parte superior del tanque y el agua con menor temperatura viaja a la parte inferior del tanque. Si se analiza todo el

sistema, tanto el diferencial de presiones generado por la bomba como la convección natural actúan sobre el sistema generando así la circulación.

En la figura 2.4 se observa un sistema de circuito abierto con todas sus componentes. El control de la bomba se realiza por medio de sensores diferenciales (Identificados por el número 7 y 8) que se encuentran a la salida de los colectores solares y en la parte inferior del tanque. Si la temperatura del sensor del colector es mayor que la del tanque se activa la bomba. Si las temperaturas son iguales la bomba se apaga. Los sensores son controlados por un termostato (9), un termostato es un dispositivo eléctrico o mecánico cuyo objetivo es mantener la temperatura de un sistema en un punto o en un rango. En casos de climas extremos es necesario proteger al sistema del congelamiento. La protección se da al interrumpir la bomba por medio de sensores (16) ubicados en la entrada a los colectores y en la salida. El sistema cuenta con una salida de aire (1) ubicada en la salida de los colectores, esta permite purgar el sistema del aire acumulado en los colectores y en la tubería. La válvula de vacío (2) permite la entrada de aire para poder drenar la tubería si se deseara. La válvula de globo (13) permite regular el flujo del sistema. (ver Fig. 2.4)

2) Circuito cerrado. El circuito cerrado calienta un fluido de transferencia de calor y luego por un intercambiador de calor se transfiere al agua doméstica. En la figura 2.5 se puede observar un esquema simple de un sistema de circuito cerrado. Este sistema requiere de dos bombas, una para el circuito de calentamiento por medio de paneles solares y una segunda para circular el agua por el intercambiador de calor y hacia el tanque de almacenamiento. Un intercambiador de calor es un dispositivo diseñado para transferir calor de un fluido a otro, estos no permiten que los fluidos tengan contacto entre sí. La posición de los tubos en el tanque de entrada y salida del agua son similares a los otros sistemas de calentamiento debido a las densidades del agua a las diferentes temperaturas y, como se explicó para el circuito abierto, existe convección natural y forzada.



SC	Colectores solares
ST	Tanque de almacenamiento
CP	Bomba
1	Salida de aire
2	Válvula de vacío
3	Válvula de paso
4	Válvula de alivio (presión y temperatura)
5	Válvula de drenado
6	Unión
7	Sensor diferencial
8	Sensor diferencial
9	Control del termostato
10	Unión
11	Válvula de paso
12	Válvula de cheque
13	Válvula de globo
14	Válvula de alivio (presión)
15	Válvula de paso
16	Sensor de congelamiento
17	Válvula de drenado
18	Válvula de drenado

Figura 2.4 Esquema circuito abierto(Solar Energy Systems Design)

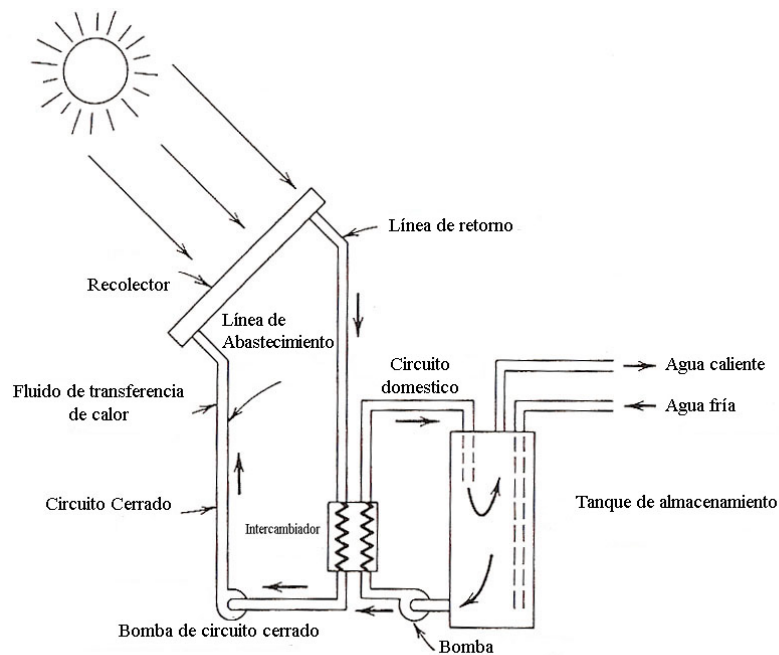


Figura 2.5 Esquema simple circuito cerrado(Solar Energy Systems Design)

El fluido que circula por los colectores, debido a que no tiene contacto con el agua doméstica, puede tener un anticongelante o puede ser un fluido de transferencia de calor. Esto protege los colectores y las tuberías de factores como la corrosión y la acumulación de depósitos minerales causados por el agua. Si el sitio donde se instala sufre de climas extremos, el anticongelante protege al sistema de cualquier congelamiento. El costo de este sistema se incrementa por los nuevos componentes y por consiguiente la instalación y el mantenimiento son más complicados.

En la figura 2.7 se observa el sistema típico de circuito cerrado con todos sus componentes. Existen otros diseños en que el intercambiador está incorporado al tanque. Muchos de los componentes son iguales a los que se utilizan en el circuito abierto, aunque existen algunos componentes nuevos como el intercambiador de calor, el cual permite calentar el agua por medio de transferencia con el fluido de los colectores. Además, es necesaria una bomba extra para poder circular el agua doméstica por el intercambiador.

El sistema también posee un tanque de expansión que permite absorber cualquier expansión que se pueda dar en el circuito cerrado. La purga de aire permite liberar el aire atrapado en las tuberías y en el fluido del

circuito. Al igual que en el sistema abierto, la circulación por los colectores es controlada por el termostato y sus sensores.

Si la instalación se hace en un país donde la temperatura durante la noche desciende a menos de 0 grados Celsius, es necesario tomar en cuenta que puede haber congelamiento en las tuberías. En el caso de que hubiese congelamiento, se debe optar por un sistema de circuito cerrado, ya que el anticongelante evitaría que esto ocurra. (ver Fig. 2.7)

c. Sistema termosifón. Este sistema, como su nombre lo dice, utiliza el principio del termosifón. El sistema utiliza la convección natural para la circulación del fluido a través de las tuberías y colectores por lo que, a diferencia de los sistemas de circulación forzada, no necesita la bomba. Este sistema puede ser de circuito abierto o cerrado. En este tipo de sistemas es necesario que el tanque de almacenamiento esté a un nivel superior que el de los colectores para hacer circular el agua por medio de diferencia de densidades. El tanque está aislado para evitar pérdidas de calor. Para prevenir que el termosifón se revierta durante la noche se debe de colocar el tanque 18 pulgadas arriba de los colectores.

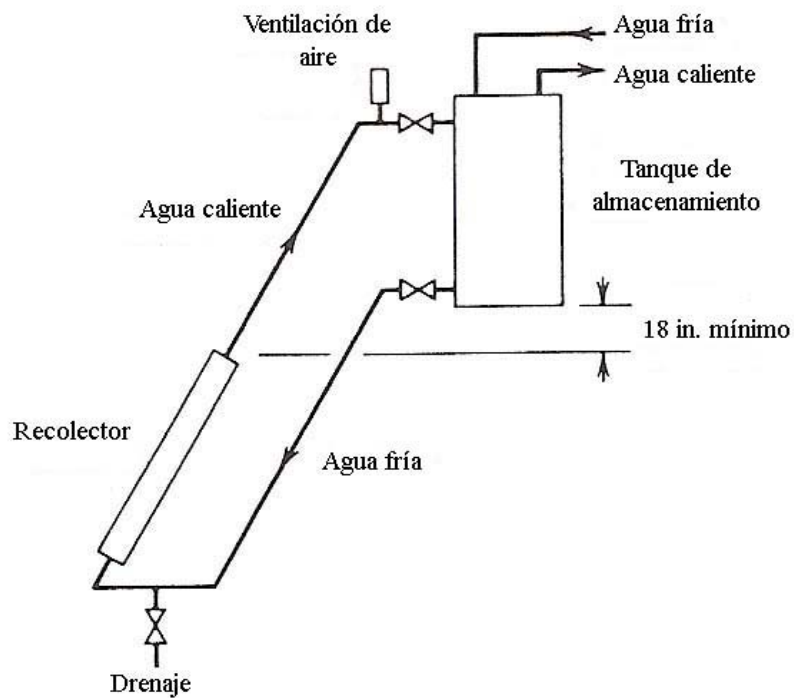
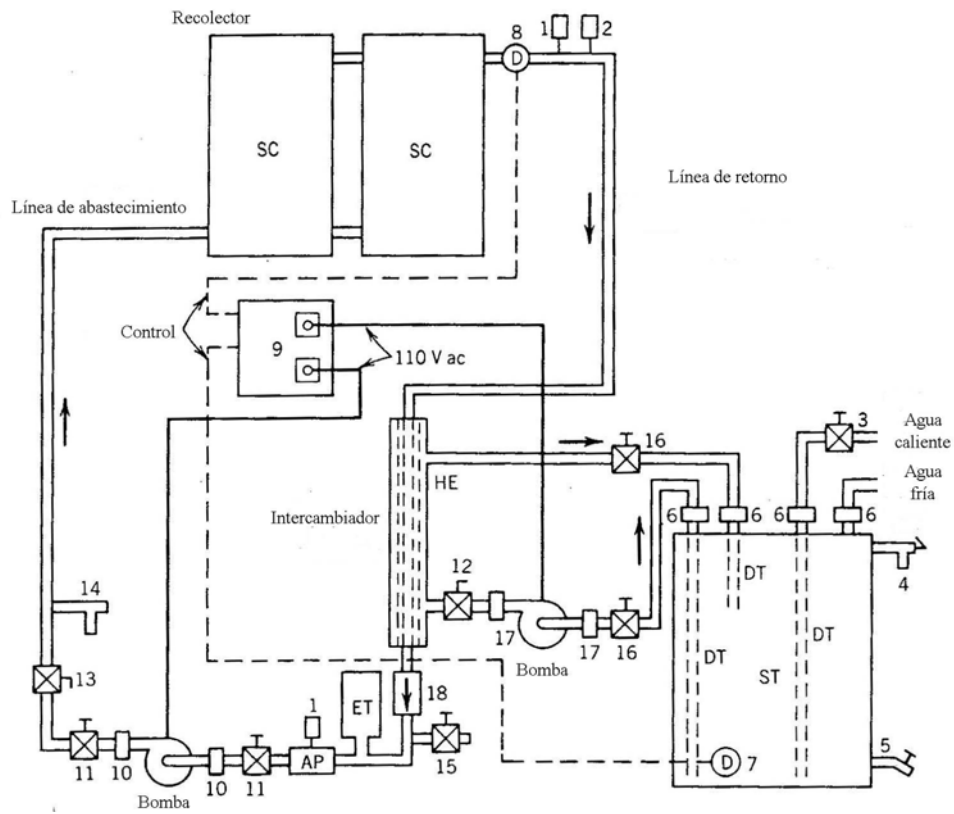


Figura 2.6 Esquema de termosifón(Solar Energy Systems Design)



- |    |   |
|----|---|
| SC | Colectores solares                        |
| ST | Tanque de almacenamiento                  |
| CP | Bomba                                     |
| HE | Intercambiador de calor                   |
| ET | Tanque de expansión                       |
| AP | Purga de aire                             |
| HP | Bomba del Intercambiador                  |
| 1  | Salida de aire                            |
| 2  | Válvula de vacío                          |
| 3  | Válvula de paso                           |
| 4  | Válvula de alivio (presión y temperatura) |
| 5  | Válvula de drenado                        |
| 6  | Unión                                     |
| 7  | Sensor diferencial                        |
| 8  | Sensor diferencial                        |
| 9  | Control del termostato                    |
| 10 | Unión                                     |
| 11 | Válvula de paso                           |
| 12 | Válvula de globo                          |
| 13 | Válvula de globo                          |
| 14 | Válvula de alivio (presión)               |
| 15 | Válvula de vaciado y llenado              |
| 16 | Válvula de paso                           |
| 17 | Unión                                     |
| 18 | Válvula de cheque                         |

Figura 2.7 Esquema circuito cerrado(Solar Energy Systems Design)

Un esquema de un sistema de termosifón abierto se muestra en la figura 2.7. El fluido con menor temperatura (más denso) se va al fondo del tanque y luego a los colectores solares. La radiación del sol calienta el agua y ésta empieza a subir por los colectores por la diferencia de densidades. Al finalizar el recorrido ingresa al tanque de almacenamiento. Es importante mencionar que la salida del tubo de los colectores está protegida para que la corriente de agua caliente no interrumpa la convección natural. En la visita a la Dirección de Energía se observó este tipo de sistema instalado. Según datos proporcionados por fabricantes, en un día despejado el agua llega hasta unos 70°C. Se pueden observar los calentadores por termosifón que se encuentran ubicados en la Dirección de Energía en las figuras 2.8 a 2.11.



Figura 2.8 Vista frontal de un sistema termosifón



Figura 2.9 Vista lateral de un sistema termosifón



Figura 2.10 Vista de tubos de un sistema termosifón



Figura 2.11 Vista del tanque de un sistema termosifón

El sistema termosifón cerrado se puede observar en la figura 2.12. Este sistema cuenta con un intercambiador de calor que transmite la energía al tanque de almacenamiento. El fluido de trabajo en este sistema puede ser un fluido de transferencia de calor o un anticongelante mezclado con agua. La ventaja de este sistema es que en climas fríos no se congela el agua. El sistema es similar al de circulación forzada, con la diferencia de que tampoco tiene una bomba, sino que es impulsado por el principio del termosifón.

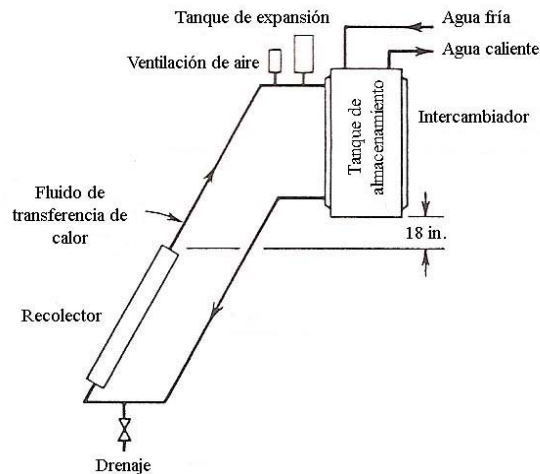


Figura 2.12 Sistema termosifón circuito cerrado(Solar Energy Systems Design)

d. Sistema de fase cambiada. Este sistema es similar al sistema de termosifón circuito cerrado, con la diferencia de que existe un cambio de fase en el fluido que circula por los colectores. Debido a la radiación solar, el fluido alcanza su punto de ebullición y se evapora, circulando por medio de una línea de vapor hacia el intercambiador que se encuentra dentro del tanque aislado. Al entrar al intercambiador, el vapor calienta el agua dentro del tanque y se enfría produciendo un cambio de fase, luego entra a la tubería de fluido frío y vuelve a pasar por los colectores. La circulación en las tuberías se da por medio de convección natural, similar al caso de termosifón. El fluido que generalmente se utiliza es refrigerante R114, por lo que en climas fríos no se congela. El sistema no sufre problemas de corrosión debido a la utilización del refrigerante. En la figura 2.13 se puede observar un esquema de un sistema de fase cambiada.

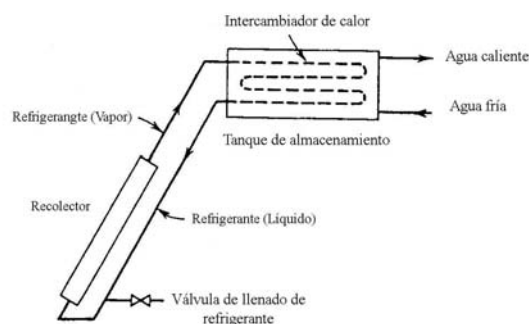


Figura 2.13 Sistema de fase cambiada(Solar Energy Systems Design)

La desventaja de este sistema es que el tanque debe estar a una mayor elevación y a una distancia no muy lejana de los colectores, ya que

de lo contrario no habría circulación. La ventaja de este sistema es que no tiene partes móviles, requiere poco mantenimiento y no utiliza ninguna fuente externa de energía.

### C. Investigación meteorológica

Los recolectores solares obtienen la energía del Sol por medio de transferencia de calor por radiación. La radiación solar es afectada por dos factores, la ubicación del Sol y la claridad de la atmósfera. Es por esto que previo a la instalación de un sistema solar, es necesario hacer una investigación preliminar del clima y radiación en la ubicación que se desee montar el sistema.

1. **Movimiento de la Tierra.** La Tierra se mueve en una órbita elíptica alrededor del Sol. Le toma 365 días y 6 horas a la Tierra completar la órbita (un año). Por ser una órbita elíptica, la distancia entre la Tierra y el Sol varía constantemente. Cuando la Tierra se encuentra a una menor distancia, la radiación solar es más intensa que cuando está más alejada. Debido a esto hay meses en los cuales la radiación solar es mayor.

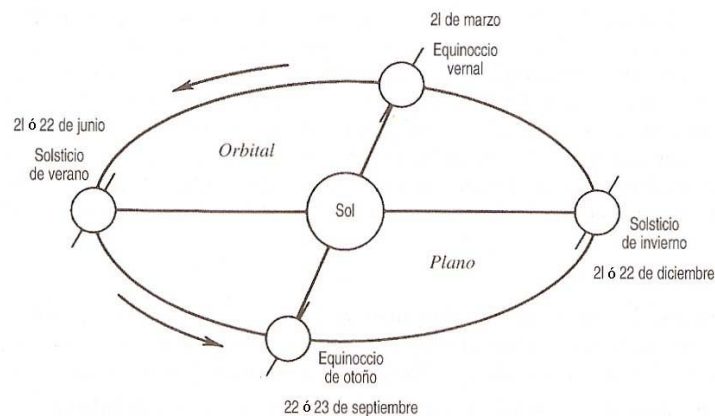


Figura 3.1 Rotación de la Tierra (Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado)

Se puede observar en la figura 3.1 la órbita de la Tierra. La distancia más cercana que la Tierra puede estar del Sol se denomina la distancia perihélica, y ocurre el 4 de enero. La distancia más lejana que la Tierra puede estar del Sol se denomina la distancia afélica, y ocurre el 5 de julio. La Tierra también gira sobre su propio eje, el cual está inclinado 23.5 grados con respecto al plano orbital, lo cual también afecta la intensidad de la radiación solar.

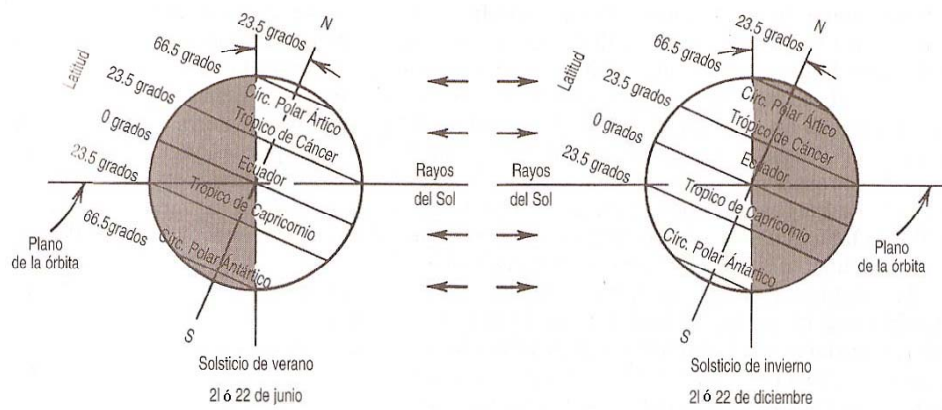


Figura 3.2 Inclinación de la Tierra(Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado)

En la figura 3.2 se puede observar la inclinación de la Tierra y los solsticio de verano e invierno. En el solsticio de verano el Polo Norte recibe continuamente luz solar y el Polo Sur permanece en la oscuridad. El solsticio de invierno es lo inverso. Debido a la rotación orbital y a la rotación de su eje, se puede ubicar la posición del Sol dependiendo de la época del año y a la hora del día.

2. **Clima de Guatemala.** Como se había mencionado anteriormente, el clima afecta la radiación solar, más específicamente la nubosidad. En el capítulo de conceptos de transferencia de calor se explicó que todo objeto puede absorber, reflejar o transmitir radiación. Por esta razón las nubes tienen un gran impacto en la radiación, ya que al pasar la radiación por la atmósfera, está sufre de una atenuación debido a la absorción y la dispersión. La dispersión ocurre cuando partículas de agua, de polvo o contaminación de humos reflejan los rayos solares.

La energía solar que llega a la superficie de la Tierra se divide en dos, la energía directa y la energía difusa. La energía solar total que incide sobre una superficie es la suma de ambas. Al intervalo de tiempo en el que un punto de la superficie terrestre permanece expuesto a una cantidad de radiación solar útil se le denomina brillo solar. El brillo solar se reduce en la presencia de nubes. Para obtener una mejor aproximación de la incidencia solar en Guatemala es necesario estudiar el clima. La radiación solar global horizontal es la suma de la energía directa mas la difusa medida en una superficie horizontal. Para este estudio, se utilizaron datos recolectados por el Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH).

Debido a la latitud en la cual se encuentra Guatemala, no se manifiestan las cuatro estaciones. Existen básicamente dos estaciones, la época lluviosa que ocurre entre mayo y octubre y la época seca que ocurre entre noviembre y abril. La época lluviosa se caracteriza por días lluviosos y nublados, en julio y parte de agosto se produce una época seca que se le denomina canícula la cual se debe a un cambio en los vientos alisios. <<Los vientos alisios son corrientes semipermanentes entre las altas presiones subtropicales y las bajas presiones ecuatoriales.>> (Villegas 22) Después de la canícula vuelve la temporada lluviosa entre septiembre y octubre. <<El clima seco es ocasionado por masas frías migratorias.>> (Villegas 22)

En Guatemala se pueden definir seis zonas climáticas:

- Las Planicies del Norte
- Franja Transversal del Norte
- El Altiplano
- La Boca Costa
- La Planicie Costera del Pacífico
- La Zona Oriental

a. Planicies del Norte. Se le llama así a las planicies de El Petén y a las regiones norte de Huehuetenango, El Quiché, Alta Verapaz e Izabal. Las elevaciones oscilan entre 0 y 300 metros, los climas son cálidos y lluviosos, la humedad varía en la región entre semisecos a muy húmedos.

b. Franja Transversal del Norte. En esta región las elevaciones oscilan entre 300 a 1400 metros. Los departamentos son Huehuetenango, El Quiché, Alta Verapaz y Cuenca del río Polochic. El clima en la región es cálido sin estación seca y semicálido.

c. El Altiplano. Abarca la mayor parte de los departamentos de Huehuetenango, El Quiché, San Marcos, Quetzaltenango, Totonicapán, Sololá, Chimaltenango, Guatemala, Jalapa y las Verapaces. Las elevaciones son de 1400 metros o mayores. Las lluvias no son tan intensas, el clima varía de templado y semifrío a semicálido.

d. La Boca Costa. Esta es una región angosta que se extiende de San Marcos a Jutiapa. Las elevaciones oscilan entre 300 a 1400 metros. Los

niveles de lluvia son los más altos del país, el clima es semicálido y muy húmedo.

e. La Planicie Costera del Pacífico. Al igual que la boca costa, la región se extiende de San Marcos a Jutiapa, pero la elevación máxima es de 300 metros. El clima es cálido con invierno variando de seco a semiseco.

f. Zona Oriental. Abarca los departamentos de Zacapa, El Progreso, Jalapa, Jutiapa y Chiquimula. Esta región se caracteriza por el déficit de lluvia durante todo el año. El clima es cálido con invierno seco.

3. **Radiación en la Ciudad de Guatemala.** El Ministerio de Energía y Minas elaboró un mapa de la radiación solar directa en Guatemala. Este mapa se basa en los datos obtenidos por el INSIVUMEH. En la ciudad de Guatemala, la radiación promedio es de 5.0 a 5.5 kWh/m<sup>2</sup>/día, estos valores se pueden observar en el mapa de potencial solar, figura 3.3.

**Tabla 3.1 Radiación solar máxima en cal/cm<sup>2</sup>/min**

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1995	0.81	0.85	0.89	0.90	0.90	0.94	1.67	1.59	1.57	1.64	1.64	1.44	1.20
1996	1.51	1.32	1.69	1.73	1.73	1.59	1.80	1.85	1.83	1.66	1.13	1.66	1.60
1997	1.45	1.66	1.59	1.51	1.50	1.56	1.60	1.52	1.23	0.93	1.13	1.22	1.40
1998	1.14	1.16	1.31	1.31	1.31	1.41	1.40	1.36	1.26	1.39	1.33	1.20	1.30
1999	1.27	1.37	1.45	1.36	1.20	1.37	1.37	1.38	1.28	1.30	1.27	1.29	1.30
2000	1.30	1.30	1.40	1.34	1.35	1.39	1.49	1.45	1.45	1.44	1.32	1.23	1.40
2001	1.19	1.35	1.20	1.13	1.25	1.45	1.45	1.48	1.30	1.40	1.30	**	1.30
2002	1.30	1.42	1.44	1.40	1.37	1.39	1.40	1.39	1.20	1.19	1.27	1.14	1.30
2003	1.20	1.20	1.60	1.26	1.25	1.33	1.37	1.20	1.43	1.30	1.47	1.55	1.30
	1.24	1.29	1.40	1.33	1.32	1.38	1.51	1.47	1.39	1.36	1.32	1.34	1.34

Datos obtenidos para la ciudad de Guatemala (INSIVUMEH)

En la tabla 3.1 tenemos los datos de radiación máxima que ocurrieron entre 1995 y el 2003. Se puede calcular a que temperatura podría llegar a calentar el agua un panel solar en base a esta radiación. Se puede observar que la radiación máxima se dio en el mes de julio y fue de 1.80 cal/cm<sup>2</sup>/min. Los meses en los que se registró la mayor radiación solar durante el año son entre marzo y agosto.

**Tabla 3.2 Radiación solar media en cal/cm<sup>2</sup>/min**

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1995	0.21	0.26	0.28	0.28	0.28	0.45	0.42	0.34	0.28	0.37	0.38	0.34	0.30
1996	0.37	0.46	0.49	0.46	0.46	0.43	0.43	0.48	0.43	0.40	0.39	0.37	0.40
1997	0.40	0.50	0.47	0.42	0.43	0.32	0.39	0.39	0.37	0.31	0.31	0.29	0.40
1998	0.31	0.35	0.37	0.37	0.32	0.35	0.32	0.33	0.32	0.30	0.29	0.32	0.30
1999	0.30	0.37	0.35	0.35	0.33	0.28	0.34	0.34	0.25	0.32	0.29	0.35	0.30
2000	0.37	0.36	0.37	0.36	0.29	0.37	0.30	0.32	0.30	0.34	0.31	0.32	0.30
2001	0.33	0.30	0.32	0.26	0.28	0.35	0.38	0.53	0.36	0.39	0.34	0.30	0.30
2002	0.35	0.37	0.40	0.43	0.35	0.37	0.33	0.32	0.28	0.31	0.34	0.33	0.30
2003	0.41	0.38	0.31	0.36	0.30	0.31	0.37	0.31	0.35	0.35	0.44	0.45	0.40
	<b>0.34</b>	<b>0.37</b>	<b>0.37</b>	<b>0.37</b>	<b>0.34</b>	<b>0.36</b>	<b>0.36</b>	<b>0.37</b>	<b>0.33</b>	<b>0.34</b>	<b>0.34</b>	<b>0.34</b>	<b>0.33</b>

**Datos obtenidos para la ciudad de Guatemala (INSIVUMEH)**

La radiación solar media, como se puede observar en la tabla 3.2, son los valores promedio de radiación ocurridos en el mes. El mes que mayor radiación registró es el mes de agosto y fue de .48 cal/cm<sup>2</sup>/min. Los promedios que se obtuvieron nos demuestran que la radiación en Guatemala varían entre .33 cal/cm<sup>2</sup>/min a .37 cal/cm<sup>2</sup>/min durante todo el año. Estos datos serán útiles para calcular la radiación mensual que se puede obtener por medio de los paneles solares.

**Tabla 3.3 Brillo solar en horas**

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1990	253	231	271	233	211	151	210	201	161	219	165	227	211
1991	255	240	286	243	220	166	239	209	181	175	224	215	221
1992	259	227	249	238	178	142	171	200	150	183	206	215	201
1993	266	241	234	141	200	232	197	174	151	186	252	253	211
1994	256	239	161	245	205	176	248	209	189	202	230	216	215
1995	261	238	271	244	258	173	182	144	124	145	233	159	203
1996	252	260	274	211	157	157	195	223	179	168	187	169	203
1997	242	216	242	240	222	171	116	285	123	184	152	145	195
1998	154	258	227	252	187	183	131	152	310	146	120	115	186
1999	165	248	267	267	205	111	139	171	95	184	222	209	190
2000	273	248	247	248	123	134	248	195	142	204	213	223	208
2001	267	221	254	257	155	192	195	208	177	195	237	220	215
2002	262	236	266	284	177	169	198	198	123	245	234	208	217
2003	264	235	236	261	171	138	214	223	165	164	225	229	210
	<b>245</b>	<b>238</b>	<b>249</b>	<b>240</b>	<b>191</b>	<b>164</b>	<b>192</b>	<b>199</b>	<b>162</b>	<b>186</b>	<b>207</b>	<b>200</b>	<b>206</b>

**Datos obtenidos para la ciudad de Guatemala (INSIVUMEH)**

El brillo solar, tabla 3.3, indica el número de horas al mes en el cual hubo radiación solar útil. La variación del brillo solar se debe a las nubes y a la contaminación de humo y partículas, es por esto que varía todos los meses. Se puede suponer una cantidad de horas al día de iluminación, pero este valor no es tan exacto ya que no toma en cuenta el clima ni la contaminación. Los meses más despejados son de noviembre a abril, esto concuerda con el estudio del clima de Guatemala ya que son los meses de la época seca. También se puede observar que aumentan durante el mes de julio y agosto en comparación con mayo y junio, esto se debe a la canícula. Los meses con menor brillo solar son los meses de invierno.

**Tabla 3.4 Temperatura media en °C**

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1990	17.6	18.2	19.2	20.6	21.4	20.6	20.4	20.5	20.1	19.8	18.6	18.2	19.6
1991	18.4	18.8	21.0	21.8	21.5	20.6	20.3	20.6	20.1	19.6	18.4	17.9	19.9
1992	18.8	19.1	20.6	20.7	20.7	20.4	19.7	20.0	19.6	19.5	19.6	18.2	19.7
1993	18.4	18.7	19.7	21.2	21.8	20.4	20.2	19.6	19.7	19.5	18.1	17.5	19.5
1994	17.5	18.8	19.5	20.5	20.8	19.7	20.0	19.4	19.3	20.0	19.6	18.5	19.4
1995	18.0	19.4	20.5	19.4	21.5	20.6	20.1	20.3	19.4	19.0	18.7	18.4	19.6
1996	17.0	18.2	18.9	20.8	20.5	20.1	19.5	19.9	20.0	19.8	18.5	18.4	19.3
1997	15.5	19.4	20.5	21.6	20.7	20.5	20.0	20.7	19.3	20.0	19.9	18.3	19.7
1998	19.8	20.3	20.7	22.2	22.5	20.3	20.9	20.8	19.6	21.5	19.0	18.1	19.6
1999	17.4	17.3	19.6	20.9	20.7	19.0	19.0	19.3	18.4	18.4	17.3	17.8	18.7
2000	18.0	18.6	19.6	23.6	19.9	19.2	20.1	19.7	19.5	18.8	19.3	16.0	19.4
2001	16.8	18.1	19.2	20.3	20.4	19.5	20.1	19.9	19.2	19.0	17.3	18.3	19.0
2002	17.3	18.6	18.6	19.8	20.3	20.1	21.0	19.6	18.9	18.5	17.1	17.9	19.0
2003	16.8	17.8	24.8	20.6	20.7	19.1	20.3	20.0	19.7	20.2	19.2	17.5	19.7
	<b>17.7</b>	<b>18.7</b>	<b>20.2</b>	<b>21.0</b>	<b>21.0</b>	<b>20.0</b>	<b>20.1</b>	<b>20.0</b>	<b>19.5</b>	<b>19.5</b>	<b>18.6</b>	<b>17.9</b>	<b>19.4</b>

**Datos obtenidos para la ciudad de Guatemala (INSIVUMEH)**

La tabla 3.4 muestra las temperaturas medias de Guatemala. En base a estos datos podemos obtener la temperatura del agua de suministro. Se puede observar en la tabla que la temperatura no varía mucho durante el año, se mantiene entre 17°C a 21°C.

## MAPA DE POTENCIAL SOLAR

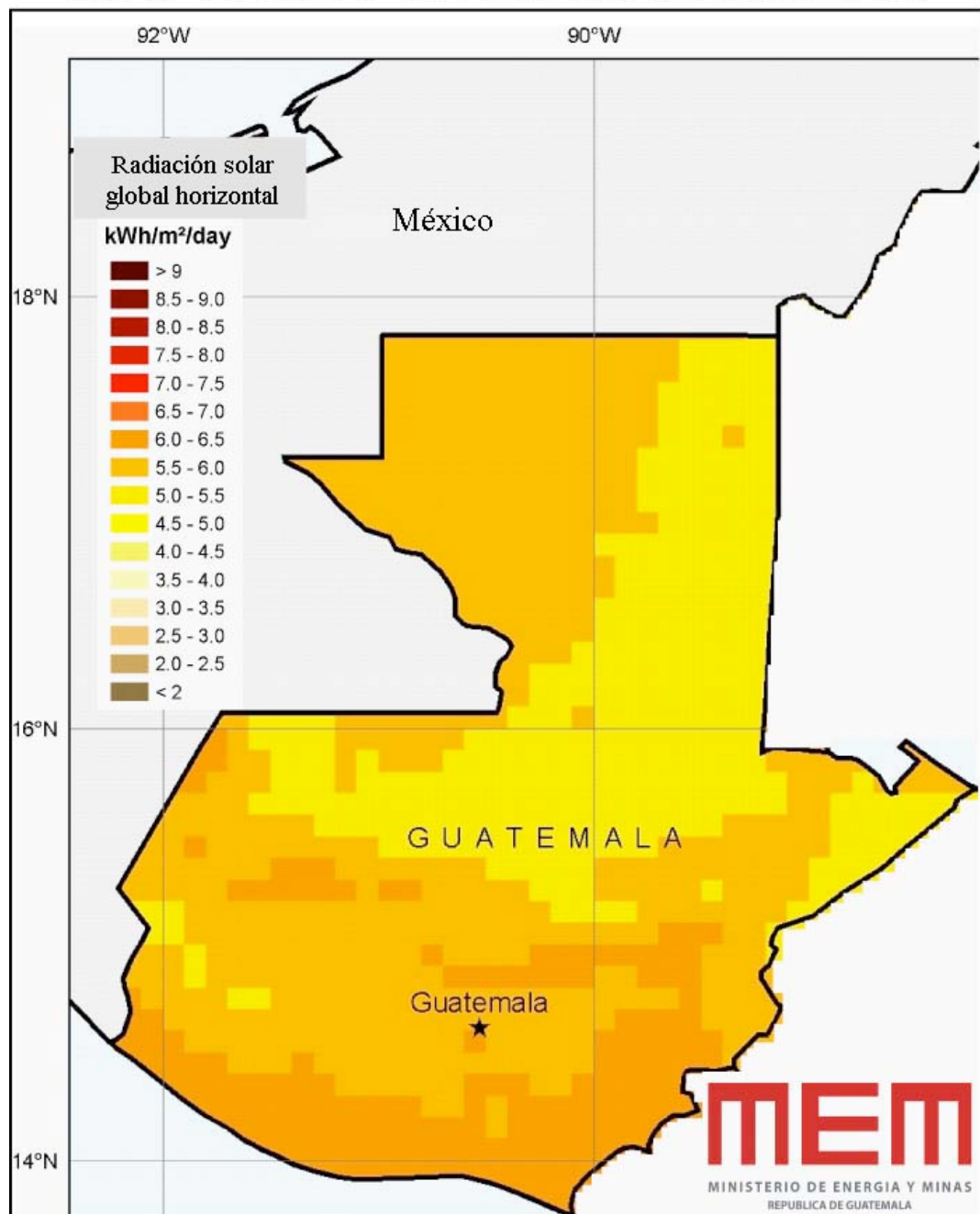


Figura 3.3 Radiación solar global horizontal (Dirección de Energía)

Si se compara el mapa de potencial solar y el mapa de las regiones que se encuentra en el apéndice C, se puede observar como las zonas mencionadas anteriormente y el clima en ellas tiene un gran impacto sobre la radiación. En el caso de El Altiplano se caracteriza porque las lluvias no son intensas, lo cual se observa en el mapa de potencial solar que registra valores medios de radiación.

## IV. Diseño de un sistema combinado de calentamiento de agua

El primer paso que se debe tomar en cuenta al diseñar un sistema doméstico de calentamiento de agua es la carga de agua caliente. Esta carga depende de varios factores como el número de ocupantes en la vivienda, el uso que se le desee dar al agua caliente y la temperatura de suministro.

Cada vivienda es diferente y es necesario que la persona que desee instalar el sistema proporcione información sobre los usos que se dará al agua caliente. En caso que no se tenga esa información se puede recurrir a tablas que proporcionen un estimado del consumo por persona en una vivienda. A continuación se puede observar en la tabla 4.1 el consumo de agua caliente en galones por día.

Tabla 4.1 Uso diario de agua caliente (60°C)

<b>Categoría</b>					
<b>Numero de ocupantes</b>	2	3	4	5	6
<b>Numero de cuartos</b>	1	2	3	4	5
<b>Agua en galones</b>	40	55	70	85	100

Datos obtenidos del libro *Solar Energy Systems Design*

En esta tabla se puede seleccionar mediante dos categorías, por número de habitaciones o de ocupantes. En la tabla 4.2 se determina el consumo de agua por los usos. Las aplicaciones que se tienen en orden de aparición son máquina lavarropa, lavaplatos, duchas, en la cocina y otros grifos.

Tabla 4.2 Uso diario de agua caliente

<b>Aplicación</b>	<b>Uso diario promedio Galones por persona</b>
<b>Lavarropa</b>	4.5
<b>Lavaplatos</b>	3.5
<b>Regadera</b>	4.5
<b>Cocina</b>	5
<b>Grifos</b>	1

Datos obtenidos de libro *Solar Energy Systems Design*

El diseño del sistema se debe basar en ciertos parámetros, numerados a continuación:

- La vivienda está ubicada en la ciudad de Guatemala.
- La aplicación del agua será para duchas y para la cocina.
- La vivienda está ocupada por cuatro personas.
- El agua se debe calentar a una temperatura de 50 Celsius.

Con base en las suposiciones se obtiene de la tabla 4.2 que el consumo por persona es de 10.5 galones. Si esto se multiplica por el número de habitantes se obtiene que el consumo en la vivienda es de 42 galones diarios lo cual equivale a 190 litros diarios.

Para determinar cuánta energía debe utilizarse para calentar el agua a la temperatura deseada es necesario conocer la temperatura de suministro. Se tomará la temperatura de suministro como la temperatura ambiente de la ciudad de Guatemala.

Tabla 4.3 Temperatura media en °C

ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
17.7	18.7	20.2	21.0	21.0	20.0	20.1	20.0	19.5	19.5	18.6	17.9	19.4

En la tabla 4.3 se puede observar la temperatura media de la ciudad de Guatemala. Estos datos son un promedio obtenidos de la tabla 3.4.

## A. Sistema combinado

Existen muchos factores que se deben tomar en cuenta para escoger el tipo de sistema a utilizar. Se debe considerar dónde se van a instalar los paneles solares, si la estructura puede soportar el peso, si el lugar tiene la orientación deseada y el espacio suficiente.

Un factor importante es que la instalación de los paneles y tanques de almacenamiento sea lo más cercano posible, al igual que los lugares en donde se utilizará el agua caliente. Esto se debe a que la pérdida de calor en tuberías es elevada. Un análisis de transferencia de calor de un tubo demostrará esto.

Cabe mencionar que en la actualidad es poco utilizado el cobre para las tuberías, se utiliza cPVC debido a que el costo es menor que el del cobre. La utilización del cobre se da únicamente para casas antiguas que cuenten con una instalación de cobre y en el caso de ciertos sistemas solares que la temperatura de descarga oscila entre los 85 y 95 grados Celsius. La tubería que se utiliza es de media pulgada.

Si se considera una tubería de cobre de 1m de largo con constante de conducción  $k_1 = 401 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ . El aislante a utilizar es espuma de poliuretano con una constante de conducción  $k_2 = .036 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ . Las condiciones interiores del tubo son: agua caliente a una temperatura de  $T_1 = 50^\circ\text{C}$  y con un coeficiente de convección  $h_1 = 1500 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ; las condiciones exteriores aire a una temperatura de  $T_2 = 25^\circ\text{C}$  y un coeficiente de convección de  $h_2 = 25 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Los radios de  $r_1, r_2, r_3$  son respectivamente .0119,.0159,.0286 metros.

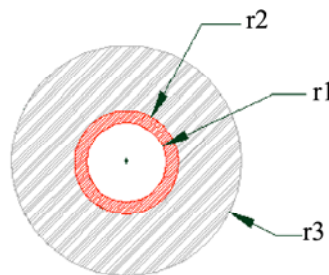


Figura 4.1 Vista de un tubo de cobre

La figura 4.1 presenta una sección de un tubo. Se le denomina  $r_1$  al radio interno del tubo,  $r_2$  al radio externo y  $r_3$  al radio externo del aislante. Las áreas para la resolución de este problema se encuentran a continuación.

$$A_1 = 2\pi r_1 L$$

$$A_2 = 2\pi r_2 L$$

$$A_3 = 2\pi r_3 L$$

La  $R$  es la resistencia térmica, es análogo a la resistencia eléctrica y nos permite saber como se comporta el flujo de calor a través de un material o fluido.

$$R_{total} = \sum R$$

A continuación se presenta la resistencia térmica para el interior del tubo, la conducción por el cobre y el aislante y finalmente para el exterior del tubo.

$$R_{interior} = \frac{1}{h_1 A_1}; R_1 = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi k_1 L}; R_2 = \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi k_2 L}; R_{exterior} = \frac{1}{h_2 A_{(2o3)}}$$

La fórmula siguiente permite calcular la pérdida de calor de un tubo no aislado.

$$\dot{Q}_{tubo} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{h_1 A_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi k_1 L} + \frac{1}{h_2 A_2}}$$

Esta fórmula se utiliza para calcular la pérdida de calor en un tubo aislado.

$$\dot{Q}_{Aislado} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{h_1 A_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi k_1 L} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi k_2 L} + \frac{1}{h_2 A_3}}$$

Con base en los cálculos se obtiene la pérdida de calor por cada metro de largo para el tubo sin aislante, siendo de 5.28 MJ/día. De forma similar se obtiene la pérdida de calor para el tubo con aislante por cada metro de largo .764 MJ/día. Se utilizó un metro de largo para ejemplificar la pérdida de calor. Para calcular la pérdida total es necesario obtener el largo total de la tubería y multiplicarlo por el valor obtenido. En el análisis financiero se elaborará el cálculo de energía y se podrá comparar con la pérdida por las tuberías.

El sistema combinado de calentamiento se diseñó para instalar en una vivienda que cuenta con un sistema de calentamiento por tanque eléctrico convencional. Los paneles solares se colocarán en la terraza del segundo nivel y el calentador eléctrico se encuentra en el primer nivel. En la figura 4.2 se muestra un esquema del sistema combinado.



sistema de termosifón es precalentar el agua de suministro para reducir la carga del calentador eléctrico, de este modo no se sacrifica la comodidad del agua caliente en climas nublados. En las épocas despejadas, que para la ciudad de Guatemala son de febrero a abril y agosto debido a la canícula, es posible eliminar por completo el calentador eléctrico y utilizar sólo los paneles solares.

Las tuberías de agua precalentada y de agua caliente deben ser aisladas para evitar pérdida de calor a lo largo del recorrido. Los recolectores solares deben instalarse a una inclinación de 15 grados con respecto a una superficie plana y orientados hacia el sur, esto se debe a la inclinación de la Tierra para que reciba una mayor radiación durante todo el año.

Las dimensiones del tanque de almacenamiento deben ser de 1.25 a 1.6 veces la necesidad diaria. En el caso expuesto, el tanque debería ser de 250 litros aproximadamente.

El mantenimiento de los recolectores solares consiste en lavar dos veces al año los paneles, y revisar una vez al año las tuberías y mangueras que conectan los colectores con el tanque de almacenamiento y con línea de agua caliente.

## V. Análisis del sistema

Actualmente en el mercado guatemalteco existen tres equipos distintos de termosifón.

El más económico es el sistema no presurizado con un valor aproximado de 5,000 quetzales. El inconveniente de este sistema es que la presión de salida del sistema solar es muy baja.

La opción intermedia es el sistema presurizado con un valor aproximado de 10,000 quetzales. La ventaja de este sistema es que utiliza la presión ya instalada en la vivienda. Este es el sistema propuesto en el diseño del sistema combinado. La eficiencia de estos equipos es de un 90% del calor que incide en ellos.

La tercera opción, al igual que la anterior, es presurizada, con la diferencia que el agua no fluye a través de los recolectores. Los tubos de los recolectores solares están sellados al vacío y cuentan con una barra de cobre concéntrica a los tubos, y que pasa hasta el tanque de almacenamiento. La transferencia de calor se da de los paneles a la barra de cobre, luego al tanque por conducción a través de la barra. La ventaja de este sistema es que si ingresa agua fría al sistema (cuando esté vacío o tenga un nivel bajo) no hay peligro que se rajen los tubos por el fuerte cambio de temperaturas debido a que el agua no pasa por los tubos. En el caso de los otros sistemas, si esto pasa puede dañarse el equipo. El costo de este sistema es de aproximadamente 15,000 quetzales.

La vida útil de los colectores depende de la calidad de los fabricantes. Un promedio es de 15 años, aunque hay marcas que estiman una vida útil mayor (EUROTECAM especifica en sus folletos una vida útil de 40 años).

### A. Análisis del calentador eléctrico

Con base a la primera ley de termodinámica que expone que la energía no puede crearse ni destruirse, sólo transformarse se obtiene que la energía que entra al sistema debe ser igual a la energía que sale de éste.

$$\dot{E}_{entra} = \dot{E}_{sale}$$

Se puede reescribir la fórmula de la siguiente manera, siendo  $Q$  la tasa de transferencia de calor,  $W$  el trabajo,  $h$  la entalpía del fluido,  $V_e$  la velocidad y finalmente  $Z_e$  la altura para obtener la energía potencial.

$$\dot{Q}_{entra} + \dot{W}_{entra} + \sum \dot{m}_e \theta_e = \dot{Q}_{sale} + \dot{W}_{sale} + \sum \dot{m}_s \theta_s$$

$$\sum \dot{m}_e \theta_e = \sum \dot{m}_e \left( h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right)$$

El cambio en la energía cinética y potencial es despreciable debido a que al sistema sólo está entrando energía proporcionada por el calentador y sale energía por pérdidas de calor. De esto se obtiene la siguiente ecuación.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

Se puede considerar la variación de entalpías lineal para cambios de temperaturas bajos, por lo que:

$$\dot{m}(h_2 - h_1) \cong \dot{m}C_p(T_2 - T_1)$$

Sin tomar en cuenta las pérdidas de calor por transferencia obtenemos:

$$\dot{Q} = \dot{m}C_p(T_2 - T_1)$$

Con base en esta fórmula se puede obtener la energía requerida para calentar agua. Se consideró una densidad de 997 kg/m<sup>3</sup>, un calor específico de 4.18 kJ/kg °C (obtenidos del libro de Termodinámica) y un caudal de .19 m<sup>3</sup>/día el cual se había calculado anteriormente en el diseño del sistema.

Se elaboró la tabla 5.1 para hacer los cálculos mensuales de requerimientos energéticos. La temperatura de suministro es un promedio de la temperatura media del ambiente obtenida con base en las tablas obtenidas del INSIVUMEH. La energía por día se obtuvo por medio de la ecuación mencionada anteriormente.

Debido a que el calentador que se analiza es un calentador convencional, es necesario calcular la pérdida de calor por espera. El calentador es un recipiente cilíndrico de 1 metro de alto con un diámetro de .5 metros. El tanque está aislado con poliuretano el cual tiene un coeficiente

de conducción  $k_1 = .023 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$  y un espesor de 5 cm. Los coeficientes de convección son  $h_{\text{interior}} = 50 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  y  $h_{\text{exterior}} = 12 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ . La temperatura del agua es de  $T_{\text{interior}} = 50^\circ\text{C}$  y la temperatura del aire es de  $T_{\text{exterior}} = 20^\circ\text{C}$ .

Las áreas a considerar para la resolución de este problema están enumeradas a continuación.

$$A_1 = 2\pi r_1 L$$

$$A_2 = 2\pi r_2 L$$

$$A_3 = \pi r_2^2$$

A continuación se presenta la resistencia térmica para el interior del tanque, la conducción por el aislante y finalmente para el exterior del tanque.

$$R_i = \frac{1}{h_1 A_1}; R_1 = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi k_1 L}; R_e = \frac{1}{h_2 A_2}; R_{\text{pared}} = \frac{L}{k_1 A_3}$$

Se determina la pérdida de calor en el tanque por el cilindro.

$$\dot{Q}_{\text{cilindro}} = \frac{T_{\text{interior}} - T_{\text{exterior}}}{\frac{1}{h_1 A_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi k_1 L} + \frac{1}{h_2 A_2}}$$

Se determina la pérdida de calor en el tanque por la parte superior e inferior del cilindro.

$$\dot{Q}_{\text{Tapaderas}} = 2 \cdot \left( \frac{T_{\text{interior}} - T_{\text{exterior}}}{\frac{L}{k_1 A_3}} \right)$$

La pérdida de calor total por espera es la suma de la pérdida por el cilindro y por las tapaderas.

$$\dot{Q}_{\text{Total}} = \dot{Q}_{\text{cilindro}} + \dot{Q}_{\text{tapaderas}}$$

La pérdida de calor en el cilindro es de 1.97MJ/día, lo cual equivale a una pérdida de 718 MJ/ año. La pérdida de calor en las tapaderas es de .674 MJ/día, lo cual es equivalente a 246 MJ/año. En total tenemos una pérdida de calor por espera de 964 MJ/año.

**Tabla 5.1 Energía de un calentador eléctrico**

	T <sub>suministro</sub> °C	ΔT °C	Energía MJ/día	# Días	Energía MJ/mes
ENE	17.7	32.3	25.60	31.00	793.7
FEB	18.7	31.3	24.81	28.00	694.7
MAR	20.2	29.8	23.62	31.00	732.2
ABR	21.0	29.0	22.96	30.00	688.9
MAY	21.0	29.0	23.00	31.00	712.9
JUN	20.0	30.0	23.75	30.00	712.5
JUL	20.1	29.9	23.66	31.00	733.6
AGO	20.0	30.0	23.74	31.00	735.9
SPE	19.5	30.5	24.16	30.00	724.9
OCT	19.5	30.5	24.12	31.00	747.6
NOV	18.6	31.4	24.85	30.00	745.6
DIC	17.9	32.1	25.39	31.00	787.2
				<b>Anual</b>	<b>8,809.59</b>
	Flujo másico	189.43	kg/día	Pérdida	964
	Temperatura	50	°C	<b>TOTAL</b>	<b>9,773.59</b>

## B. Análisis de los recolectores solares

La radiación solar mensual se determinó con base en las horas de brillo solar al mes de la tabla 3.3 por la radiación solar media mensual obtenidas de la tabla 3.2. Se puede observar en la tabla 5.2 los cálculos elaborados para el cálculo de la radiación. Se consideró un área de colector de 2.4 m<sup>2</sup> y una eficiencia de 90%, como se había mencionado anteriormente.

Se puede observar en la tabla la radiación mensual por metro cuadrado. Si comparamos con los valores de energía obtenidos del calentador solar, podemos ver que la generación solar es de más del 50% de la demanda del calentador.

**Tabla 5.2 Energía solar**

	Brillo solar Horas al mes	Rad. Cal/cm <sup>2</sup> /min.	Rad. KJ/m <sup>2</sup> /hr	Rad. Al mes MJ/m <sup>2</sup>	Rad. Al mes MJ
ENE	245	0.34	851.32	208.4	450.2
FEB	238	0.37	935.05	223.0	481.6
MAR	249	0.37	937.84	233.4	504.2
ABR	240	0.37	918.30	220.6	476.5
MAY	191	0.34	848.52	161.7	349.2
JUN	164	0.36	901.56	147.7	319.0
JUL	192	0.36	915.51	175.5	379.0
AGO	199	0.37	937.84	186.9	403.8
SPE	162	0.33	820.61	132.9	287.1
OCT	186	0.34	862.48	160.1	345.9
NOV	207	0.34	862.48	178.5	385.7
DIC	200	0.34	856.90	171.6	370.8
				<b>Anual</b>	<b>4,753.0</b>
	$A_{\text{colector}}$	2.4 m <sup>2</sup>			
	$\eta_{\text{colector}}$	0.90			

### C. Análisis financiero

En el análisis financiero (tabla 5.3) se tienen dos opciones, la opción A es el calentamiento de agua por medio de un calentador eléctrico convencional; la opción B es el sistema combinado que utiliza la energía solar y la energía eléctrica. Los proyectos fueron elaborados en base a la premisa que la vida útil de los colectores es de 15 años. Se tomó como interés un 13.2% y la inflación como un 5% (datos obtenidos por proyecciones elaboradas por Carlos Prera Gerente Financiero de Citigroup). El costo de la energía eléctrica se obtuvo de la empresa eléctrica de la tarifa residencial de la zona 15, cabe mencionar que el precio incluye el IVA y la tasa municipal.

La opción C considera el ahorro monetario obtenido de la energía producida por los colectores solares y a inversión inicial. Con base a esto se puede obtener la tasa interna de retorno.

Tabla 5.3 Análisis financiero

n	A FEN	B FEN	n	C FEN
0	0.00	10,000.00	0	(10,000.00)
1	4,767.85	2,449.21	1	2,318.64
2	4,767.85	2,449.21	2	2,318.64
3	4,767.85	2,449.21	3	2,318.64
4	4,767.85	2,449.21	4	2,318.64
5	4,767.85	2,449.21	5	2,318.64
6	4,767.85	2,449.21	6	2,318.64
7	4,767.85	2,449.21	7	2,318.64
8	4,767.85	2,449.21	8	2,318.64
9	4,767.85	2,449.21	9	2,318.64
10	4,767.85	2,449.21	10	2,318.64
11	4,767.85	2,449.21	11	2,318.64
12	4,767.85	2,449.21	12	2,318.64
13	4,767.85	2,449.21	13	2,318.64
14	4,767.85	2,449.21	14	2,318.64
15	4,767.85	2,449.21	15	2,318.64

<b>VPN</b>	Q23,386.79	<b>VPN</b>	Q22,013.63	<b>VPN</b>	Q1,373.16
				<b>TIR</b>	22%
	Interés	13.2%			
	Inflación	5%	<b>IC</b>	18.86%	
	Costo KWH	Q1.756678			

De acuerdo a los datos obtenidos de los flujos futuros proyectados se puede observar que el proyecto tiene un valor presente neto de Q1,373.16 y una tasa interna de retorno del 22% la cual se considera una tasa altamente factible. Para hacer una comparación del retorno obtenido del proyecto, se compara la tasa interna de retorno con el mismo dinero depositado a plazo fijo por 15 años en un banco del sistema guatemalteco. Si los depositaran en el banco el retorno de ahorro a plazo fijo sería de aproximadamente 7.2% anual, ahora quitándole la inflación esperada del 5% la tasa de interés real sería de 2.2%, por lo que el retorno monetario anual durante quince años sería únicamente de Q789.95 Si se compara esta anualidad con la obtenida por la generación de los paneles solares (Q2,318.64), el dinero estaría mejor invertido en un sistema de calentamiento en base a paneles solares, ya que estaría recibiendo mayor valor.

Se elaboró un análisis de sensibilidad para determinar qué variables afectan la tasa interna de retorno. Las variables que se consideraron son el costo de la energía eléctrica, la energía anual solar y la inversión inicial.

A continuación se presentan los datos obtenidos en el análisis de sensibilidad en la tabla 5.4 y se puede observar la gráfica en la figura 5.1

**Tabla 5.4 Análisis de sensibilidad**

	Costo (KWH)	TIR	Energía Anual (MJ)	TIR	Inversión (Q)	TIR	$\eta$ panel	TIR
50%	0.878	7.9%	2614	7.9%	-5000	46.2%	45%	7.9%
40%	1.054	11.0%	3137	11.0%	-6000	38.4%	54%	11.0%
30%	1.230	13.9%	3660	13.9%	-7000	32.7%	63%	13.9%
20%	1.405	16.7%	4183	16.7%	-8000	28.3%	72%	16.7%
10%	1.581	19.4%	4705	19.4%	-9000	24.8%	81%	19.4%
0%	1.757	22.0%	5228	22.0%	-10000	22.0%	90%	22.0%
10%	1.932	24.6%	5751	24.6%	-11000	19.7%	99%	24.6%
20%	2.108	27.1%	6274	27.1%	-12000	17.6%		
30%	2.284	29.5%	6797	29.5%	-13000	15.9%		
40%	2.459	31.9%	7320	32.0%	-14000	14.3%		
50%	2.635	34.4%	7842	34.4%	-15000	13.0%		

Se puede observar del análisis de sensibilidad que al disminuir el costo inicial aumenta el tasa interna de retorno del proyecto. Si Aumenta el costo del KWH aumenta también la tasa interna de retorno. Tanto el costo del KWH como la recolección anual y la eficiencia de los paneles varían con la misma pendiente. La recolección anual depende de factores como radiación, brillo solar, eficiencia de los recolectores, el clima de Guatemala y la contaminación causada por partículas y humo. Si el costo del KWH es menor que 1.23 quetzales la tasa interna de retorno será menor de 13.9% lo cual hace el proyecto no rentable. Si la inversión inicial (compra de los paneles solares) fuese mayor de 14000 quetzales el proyecto no sería rentable. En el caso de que la eficiencia de los paneles fuera menor de 63% el proyecto no sería rentable.

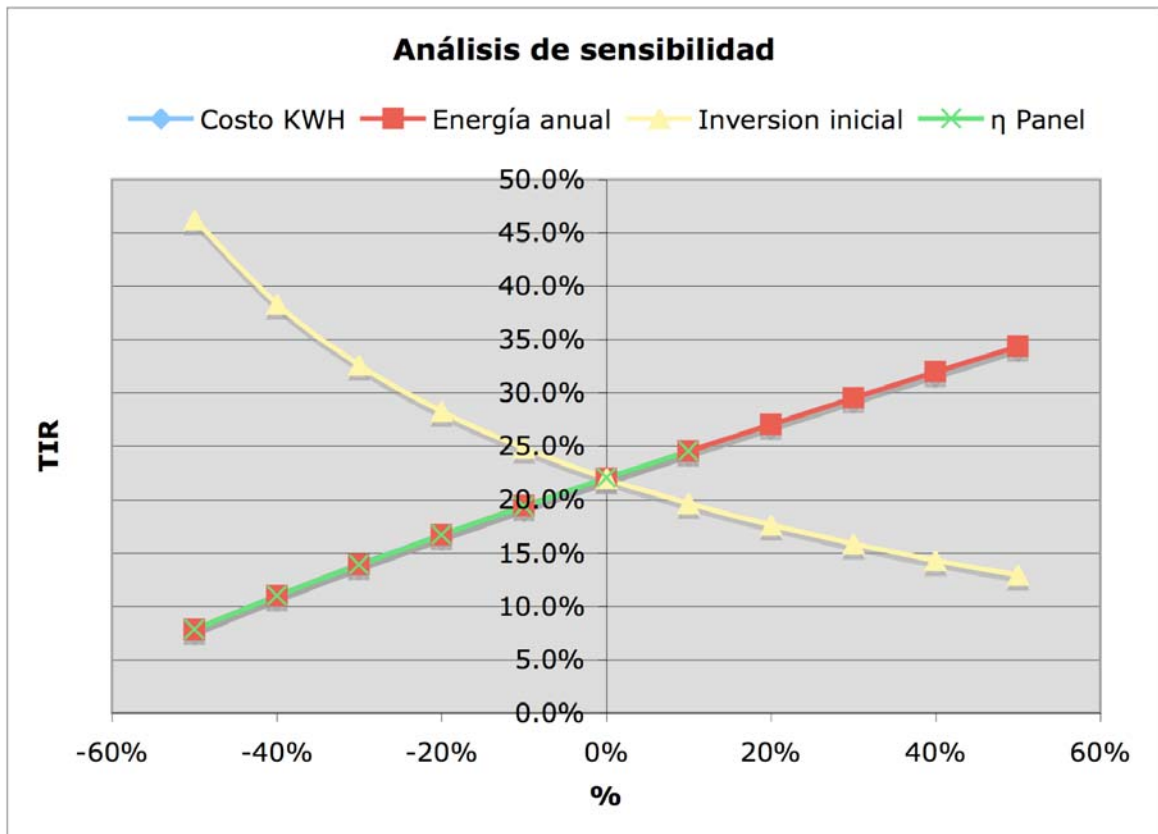


Figura 5.1 Análisis de sensibilidad

## I. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- En el diseño de sistemas de energía solar es necesario tomar en cuenta el número de habitantes, el consumo de agua caliente y el diseño de la casa.
- La tasa interna de retorno obtenida del sistema combinado es de 22% la cual es mayor que la tasa de interés por lo que se recomienda la inversión en el proyecto.
- Si varían los valores de energía eléctrica, la radiación solar en Guatemala, la inversión inicial y la eficiencia de los paneles es posible determinar por medio del análisis de sensibilidad si el proyecto continua siendo una buena inversión.
- Se recomienda :
  - En la instalación del sistema hacer un cálculo real del consumo de agua caliente.
  - El tanque de almacenamiento, los paneles solares y lugares donde se utilice el agua caliente deben de estar lo más cerca posible para reducir las pérdidas por transferencia de calor.
  - Si el sistema a instalar es de termosifón se debe de tener un especial cuidado en la colocación de la tubería para que la convección natural no sea afectada.

## II. BIBLIOGRAFÍA

Blank, Leland; A. Tarquin. 2004. *Ingeniería Económica*. 5ta ed. México, McGraw-Hill. 796 Págs.

Çengel, Yanus A. 2004. *Transferencia de Calor*. 2da ed. México, McGraw-Hill. 793 Págs.

Çengel, Yanus A.; M. Boles. 2003. *Termodinámica*. 4ta ed. México, McGraw-Hill. 829 Págs.

Godinez, Guillermo A. 1995. *Análisis Preliminar Sobre Radiación y Brillo Solar En Guatemala*. Guatemala, INSIVUMEH. 21 Págs.

Harris, N.; C. Millar y I. Thomas. 1985. *Solar Energy Systems Design*. USA. 774 Págs.

Kreith, Frank; J. Kreider. 1978. *Principles Of Solar Engineering*. USA, Hemisphere. 778 Págs.

McQuiston, Faye; J. Parker y J. Spitler. 2003. *Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado*. 1era ed. México, Limusa. 622 Págs.

Villegas, Miguel A. *Aspectos Generales del Clima de Guatemala*. Guatemala, INSIVUMEH.

Williams, J. Richard. 1974. *Solar Energy: Technology and Applications*. Michigan, Ann Arbor Science.

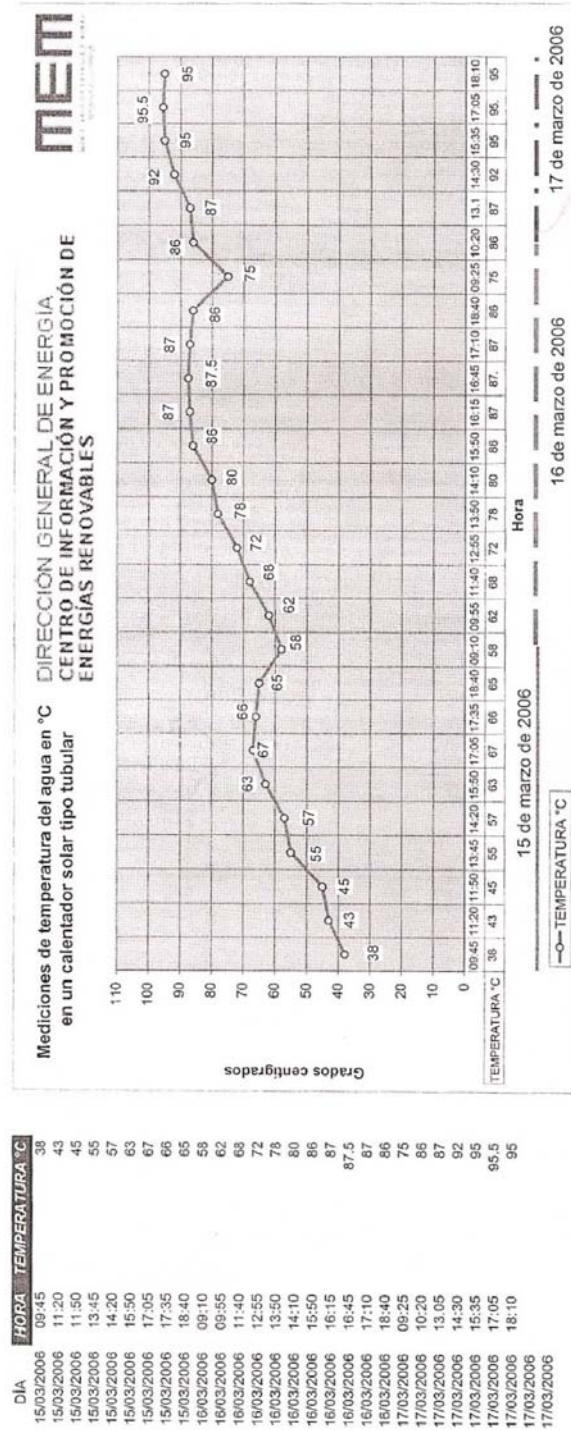
<http://www.insivumeh.gob.gt/>

<http://www.mem.gob.gt/Portal/Intro.htm>

<http://www.eere.energy.gov/>

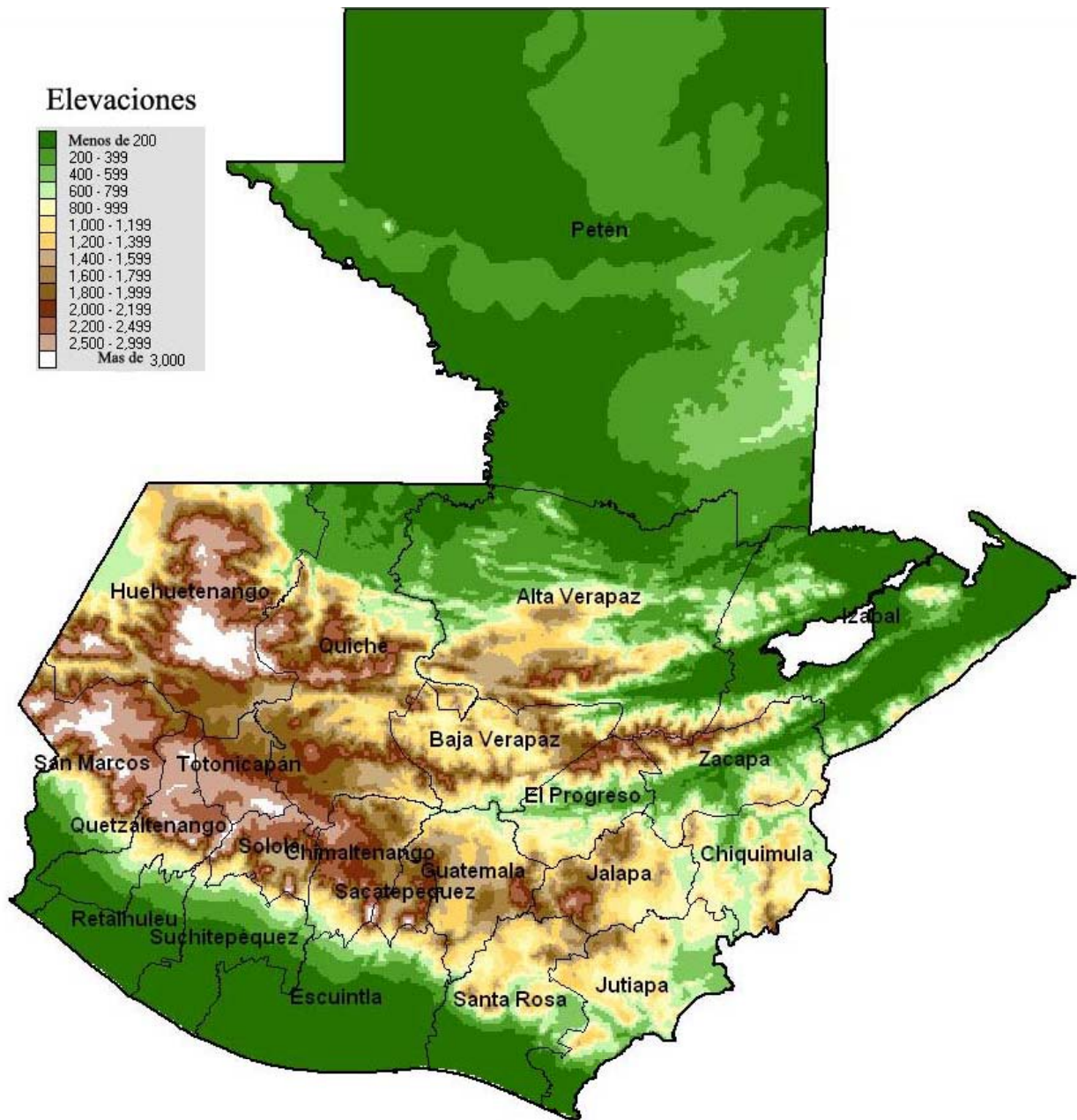
### III. APÉNDICES

#### APÉNDICE A: Temperatura de un calentador solar



(Dirección de Energía)

## APÉNDICE B: Mapa de elevaciones de Guatemala



(Dirección de Energía)

## APÉNDICE c: Mapa de las regiones de Guatemala

