

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA

Departamento de Energía



TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Diseño de calentadores solares termosifónicos.

Autor: Javier Luis Delgado

Tutor: MSc .Jesús Betancourt Mena.

CURSO 2006-2007

PENSAMIENTO:

Basta para ser grande, intentar lo grande...

Fidel Castro Ruz

"No se le puede enseñar nada a un hombre; sólo ayudarle a encontrar la respuesta dentro de sí mismo."

GALILEO GALILEI,

No basta dar pasos que puedan conducir hasta la meta; sino que cada paso sea una meta, sin dejar de ser un paso".

JOHANN PETER

DEDICATORIA:

A mi madre que ha sido mi estrella y mi guía desde que me traje al mundo, a ella le debo todo lo soy.

A mi padre por estar junto a mí en la etapa más difícil de la vida y por enseñarme a vivirla.

A mis hermanos, que no por estar separados dejan de estar presentes en los buenos y malos momentos.

A Sandra que ha sido mi compañera no sólo de mi vida sino también de esta, mi última etapa universitaria.

A toda mi familia.

AGRADECIMIENTOS:

Ante todo a DIOS por permitirme vivir este momento.

A mi tutor Jesús por ayudarme cuando más lo necesité.

A mis padres por ayudarme y guiarme durante estos cinco años.

A mis compañeros de aula y en especial a Mario A, y Yoannys.

A todos los profesores de la facultad por su enseñanza.

A todos los que han contribuido a mi formación.

A TODOS.... ¡MUCHAS GRACIAS!

RESUMEN

El empleo de tecnologías sustentadas en las fuentes de renovables energías es de vital importancia en la actualidad, especialmente para Cuba, debido a la situación existente en relación a los precios de los combustibles fósiles en el mercado internacional.

Este trabajo aborda la temática del aprovechamiento de la energía solar, específicamente la Energía Solar Térmica, así como distintas formas de su empleo. En el trabajo se discuten las consideraciones generales para el diseño térmico de calentadores de agua termosifónicos de colectores planos y se propone una metodología de diseño, cuya implementación computacional se realizó sobre el ambiente del asistente matemático Matemática v5.1.

El autor ejemplifica la utilización de la metodología propuesta en el cálculo de un calentador de agua termosifónico para suministrar agua caliente sanitaria a un dormitorio de estudiantes becados.

ABSTRACT

The utilization of renewable energy based technologies is of paramount importance in the world today, and fossil fuel cost and availability are factors that encourage the increasing use of these energy sources, especially in the Cuban context.

This work deals with the utilization of the thermal solar energy, the different ways this solar energy alternative is used. General considerations are also discussed for designing thermosyphon water heater with flat collectors and the proposed design methodology is implemented by using the software Mathematica v5.1.

A calculation example is given by the author in order to show the potential use of this methodology in a common practical situation.

INDICE

<i>INTRODUCCION</i>	1
<i>Capítulo I: Estudio del estado del arte en las aplicaciones de la energía solar térmica</i>	5
1.1- Aplicaciones de la Energía solar.	5
1.2- Energía solar térmica:	6
1.2.1-Aplicaciones de la Energía solar térmica:	7
1.2.2-Energía solar pasiva:.....	7
1.2.3-Ejemplo de sistemas térmicos de captación	8
1.2.4-Sistemas Activos de captación:	9
1.3-Análisis comparativo de tecnologías que emplean Energía solar térmica.....	11
1.3.1-Existen tres tipos básicos de calentadores solares por termosifón:	11
1.3.2- Los diferentes métodos de generación de Hidrógeno.....	15
1.3.3-Secado en secadores solares.	18
1.4- Discusión o análisis crítico de las tecnologías que emplean EST.	20
1.5-Modelo de Zbyslaw Pluta	25
1.6-Método de Cálculo aproximado: Método del Índice Solar.....	30
<i>Capítulo II- Diseño de Calentadores solares termosifónicos</i>	32
2.1: Metodología de diseño para el cálculo de calentadores solares termosifónicos.....	32
2.1.1: Cálculo de la eficiencia del colector	32
2.1.2: Calculo del número de colectores que debe tener la instalación solar.....	43

2.2: Impacto medio ambiental.....	45
Capítulo III: Implementación computacional de la metodología de diseño.	46
<i>Valoración económica</i>	53
CONCLUSIONES	54
RECOMENDACIONES	55
REFERENCIAS	56
BIBLIOGRAFIA	60

INTRODUCCION

Actualmente existe la inquietud y búsqueda de soluciones eficientes a las nuevas exigencias dentro del campo de la energía, así como hacer frente a consumos siempre crecientes.[1]

El Sol, fuente de vida y origen de las demás formas de energía que el hombre ha utilizado desde los albores de la Historia, puede satisfacer todas nuestras necesidades, si aprendemos cómo aprovechar de forma racional la luz que continuamente derrama sobre el planeta.[2] En cada metro cuadrado del territorio nacional se recibe diariamente una cantidad de energía equivalente a medio kilogramo de petróleo combustible, valor prácticamente invariable durante todo el año.

No sería sensato pasar por alto el hecho de intentar aprovechar, por todos los medios técnicamente posibles, esta fuente energética gratuita, limpia e inagotable, que puede liberarnos definitivamente de la dependencia del petróleo o de otras alternativas poco seguras o, simplemente, contaminantes.

Antecedentes Históricos en el Uso de la energía solar.

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.

En el siglo XIX y a principios del XX importantes instalaciones fueron construidas, con la finalidad de producir energía mecánica a partir de la energía solar por intermedio del aire caliente o del vapor de agua.

Mouchot construyó una máquina, produciendo vapor a 3.5 atmósferas y un gran espejo cóncavo que sirvió para hacer funcionar la imprenta de la Exposición Universal de 1878. Por la misma época Pifre construyó una imprenta solar.

Se hicieron esfuerzos para construir dispositivos capaces de orientarse automáticamente hacia el Sol fin de mejorar el rendimiento y de alargar el período de utilización de las máquinas; pero los dispositivos eran pesados, muy complicados y por consiguiente muy costosos.

El presente trabajo ha sido estructurado como sigue: en el primer capítulo se trata lo referente a los aspectos generales de la revisión bibliográfica acerca de las instalaciones solares térmicas, viendo más detalladamente estudios y análisis que se le pueden realizar a dichas instalaciones existentes.

En el segundo capítulo se propone una metodología de diseño para una instalación de calentamiento de agua por termosifón, y se discuten sus principales consideraciones. Se han abordado además los principales aspectos medio ambientales ligados a la utilización de este tipo de instalaciones.

En el tercer capítulo está dedicado a la implementación computacional de la metodología de diseño antes tratada y un ejemplo de su utilización en una aplicación concreta.

Problema de investigación:

El diseño de instalaciones que utilizan la energía solar térmica ha sido tratado con diferentes niveles de aproximación, existiendo actualmente métodos de diseño que van desde la simplificación extrema de algunos métodos, hasta una alta complejidad de otros. Para el caso de aplicaciones en las que pueda ser utilizada este tipo de energía, es útil entonces una metodología que logre por un lado un nivel de precisión adecuado en los cálculos y por otro una simplificación que permita el uso de cualquier asistente matemático estándar, dígame por ejemplo MathLab, MathCad, Mathematica, MS Excel u otro en la implementación computacional de la metodología de diseño. Lo anteriormente planteado es especialmente útil en el caso del diseño de calentadores solares termosifónicos cuyas características operacionales y de costos fiabilidad, sencillez y adaptabilidad lo hacen atractivos en muchas aplicaciones de la vida diaria, contribuyendo a la disminución de las emisiones del CO₂.

Hipótesis:

El diseño de calentadores solares termosifónicos de colectores planos puede ser abordado con suficiente precisión y nivel adecuado de simplificación si se utiliza una metodología que considere por un lado los aspectos constructivos detallados de la geometría del colector y por otros correlaciones de cálculos de parámetros ligados a la transferencia de calor en el colector y la radiación solar diaria promedio.

Objetivos generales:

Hacer una revisión bibliográfica preliminar sobre las tecnologías que utilizan la energía solar térmica, así como el desarrollo en la implementación de metodologías para el calentamiento solar de agua con énfasis en los calentadores solares termosifónicos.

Objetivos específicos

Recopilar información sobre metodologías de diseño de calentadores solares termosifónicos.

Proponer una metodología general de diseño de calentadores solares termosifónicos así como su implementación computacional, con vista a su utilización práctica en aplicaciones diversas.

Capítulo I: Estudio del estado del arte en las aplicaciones de la energía solar térmica.

“Aproximadamente, cada m² de panel solar instalado ahorra 150 kg. de petróleo, 268 kg. de carbón, 90 kg. de gas butano y evita la emisión de 490 kg. de CO₂ anuales.”

1.1- Aplicaciones de la Energía solar.[3-6] [7-11]

Básicamente, tomando de forma adecuada la radiación solar, podemos obtener calor y electricidad:

El calor se logra mediante los colectores térmicos, y la electricidad, a través de los llamados módulos fotovoltaicos.

❖ En los sistemas de aprovechamiento térmico, el calor recogido en los colectores puede destinarse a satisfacer numerosas necesidades. Por ejemplo:

- Se puede obtener agua caliente para consumo doméstico o industrial.
- Climatizar las piscinas.
- Puede ser empleada en la refrigeración.
- Los secaderos agrícolas.
- Plantas de purificación o desalinización de aguas.
- Acondicionamiento de aire.
- Calefacción doméstica.
- Cocinas.
- Destilación.
- Evaporación

❖ La electricidad puede usarse de manera directa en diversas aplicaciones algunas de ellas pueden ser:

- Sacar agua de un pozo o para regar, mediante un motor eléctrico.
- Almacenarla en acumuladores para usarse en las horas nocturnas.
- Incluso es posible inyectar la electricidad sobrante a la red general.

Ejemplo de colectores térmicos y celdas FV [12, 13]



Fig. 1: Colectores térmicos



Fig.2: Celdas FV

1.2- Energía solar térmica:

La energía solar térmica o energía termo solar, consiste en el aprovechamiento de la energía del sol para producir calor que puede aprovecharse en varias aplicaciones.[14]

1.2.1-Aplicaciones de la Energía solar térmica:

El calor captado por los colectores puede destinarse a satisfacer numerosas necesidades, algunas de las cuales son:

- Obtener agua caliente para consumo doméstico o industrial.
- Para dar calefacción a nuestros hogares, hoteles, colegios, fábricas.
- Climatizar las piscinas.
- La refrigeración.

1.2.2-Energía solar pasiva:

La Energía solar pasiva es el aprovechamiento de la energía solar de forma directa, sin transformarla en otro tipo de energía para sus utilidades, requiere sistemas mecánicos ni aporte externo de energía, aunque pueden ser complementados por ellos, por ejemplo para su regulación.[9]

Sistemas pasivos de captación: No necesitan ningún dispositivo para captar la energía solar, cuyo aprovechamiento se logra aplicando distintos elementos arquitectónicos.[4, 12], [15]

1.2.3-Ejemplo de sistemas térmicos de captación

Instalación por termosifón: Es aquella en la que el fluido de trabajo circula por convección libre. [16]



Fig.3: Ejemplo de instalaciones por termosifón

Instalación con circulación forzada

Una instalación con circulación forzada es aquella equipada con dispositivos (bombas ventiladores, etc.) que provocan la circulación del fluido de trabajo.

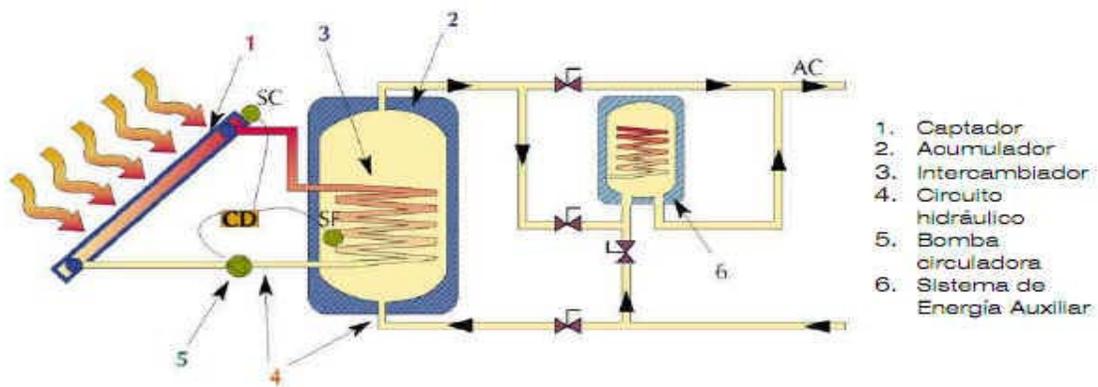


Fig.4: Ejemplo de Instalación con circulación forzada[8]

1.2.4-Sistemas Activos de captación:

Captan la radiación solar por medio de un colector, según sea este se puede llevar a cabo una conversión térmica (a baja, media o alta temperatura), aprovechando el calor contenido en la radiación solar.[4],[12], [17]

Sistema de captación de BAJA Temperatura: Consisten en al captación directa, la temperatura del fluido es por debajo del punto de ebullición. Generalmente el aprovechamiento térmico a baja temperatura se realiza a través de colectores planos, cuya característica común es que no tienen poder de concentración, es decir, la relación entre la superficie externa del colector y la superficie captadora, la interior, es prácticamente la unidad.

Sistema de captación con concentración.[4] [12]

Sistema de captación de MEDIA y ALTA temperatura: Para la obtención de elevadas temperaturas es necesario recurrir a colectores especiales, ya que con los planos es imposible, estos colectores son los colectores de concentración, cuya filosofía no es más que aumentar la radiación por unidad de superficie.

Podemos destacar de estos que la parte más importante es la forma de la superficie reflectora y las mismas pueden ser:[4]

- **Concentradores cilindro-parabólicos compuestos (CPC):** Constituidos por dos ramas de parábola, cuyos focos se encuentran en el extremo de la rama opuesta.
- **CPC sin truncar:** Son los que las ramas de parábola son simétricas, cubriendo ángulos iguales a ambos lados de la superficie reflectora.
- **CPC truncados:** Sus ramas de parábola no son simétricas, teniendo truncadas una o ambas ramas.
- **Asimétricos:** Tal como indica su nombre, no poseen simetría respecto del eje del concentrador.
- **Lentes de fresnel:** Son una derivación de las lentes plano-convexas.

Algunos ejemplo de colectores [17]



Fig.5: colector cilindro-parabólico.



Fig.6: Lentes de fresnel.



Fig.7: Paraboloidales.

Ejemplo de sistemas de captación con concentración

Las cocinas solares de concentración. Estas se basan en la concentración de la radiación solar en un punto, típicamente a través de un reflector parabólico. En dicho punto se coloca la olla que cocinará los alimentos. Generan altas temperaturas y permiten freír alimentos o hervir agua.



Fig.8: Ejemplo de cocina solar de concentración.

1.3-Análisis comparativo de tecnologías que emplean Energía solar térmica.

1.3.1-Existen tres tipos básicos de calentadores solares por termosifón:[16]

- Calentadores solares de taller.
- Calentadores solares con colectores de tecnología de placa plana.
- Calentadores solares de tubo de vacío.

Calentadores solares de taller.



Fig.9: Ejemplo de un calentador solares de taller.

Ventajas:

- El cambio o sustitución de componentes dañados o rotos no ofrece ninguna complicación ya que los materiales y técnicas empleados son sencillos y la empresa instaladora u otra similar no suele tener dificultad alguna en reparar lo dañado.
- Se tiene la posibilidad de realizar calentadores solares a la medida, atendiendo a las peculiaridades de la azotea o a necesidades específicas. Algo imposible en calentadores compactos estándares de fábrica.
- Se favorece a la pequeña empresa y a la fabricación nacional.

Desventajas:

- Los colectores no suelen pasar por ensayos en laboratorio para comprobar su grado de eficacia.
- Se corre el riesgo de estar ejecutado por personal sin la preparación adecuada.

Calentadores solares industriales de placa plana: Son aquellos similares a los anteriores pero de fabricación industrial en serie.



Fig.10: Ejemplo de un calentador solares de placa plana.

Ventajas:

- En algunos casos, ofrece unos rendimientos ligeramente superiores a los fabricados en taller. Estos rendimientos son además conocidos con precisión ya que se efectúan mediciones del colector en laboratorio siguiendo normas ISO.
- Es fácil dimensionar las instalaciones con ellos, para un técnico adecuadamente formado.

Desventaja:

- Muchos son de fabricación extranjera con lo que puede ser más difícil las reparaciones o los recambios de piezas en caso de desaparición de la empresa distribuidora

Calentadores solares de tubo de vacío:

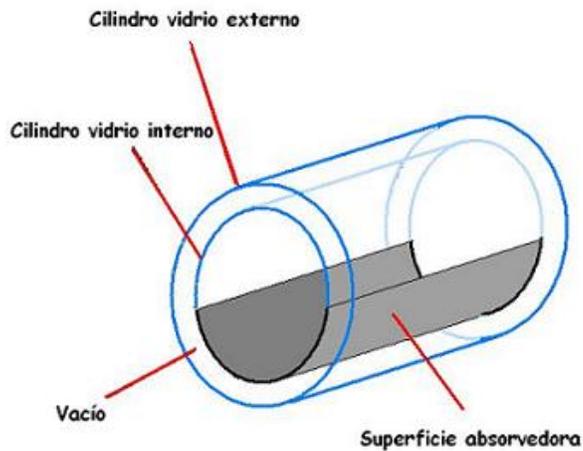
En este tipo de calentadores la tecnología de captación de la energía solar es diferente.



Fig.11: Ejemplo de un calentador con tubo de vacío.

Para ello se emplean los llamados tubos de vacío, dentro de los cuales se encuentra la superficie absorbente. Están provistos de una cámara al vacío en las paredes del tubo para minimizar las pérdidas de calor a la atmósfera.

SECCIÓN TUBO DE VACÍO



Ventajas:

- Ofrecen el mejor rendimiento de todos a un precio razonable.
- Suelen estar también testados en laboratorios para medir su rendimiento.

Desventajas:

- Pueden ser muy sensibles a la presión del agua.
- Son los menos resistentes de todos y al ser de fabricación extranjera puede llegar a haber dificultades a la hora de sustituir los tubos, en caso de desaparición de la empresa instaladora.
- El soporte suele tener una inclinación estandarizada en 45 grados. Con lo que se desaprovecha parte de la energía solar en regiones tropicales, como México, Sin embargo en países de regiones templadas, (buena parte de Chile) este problema no existe

Comparativa de sistema con paneles planos y sistema con tubos de vacío

- Para Aplicaciones que no requieran del empleo de elevadas temperaturas de trabajo, es más idóneo el uso de paneles planos.
- La eficiencia mejora mucho a mayores temperaturas, por eso los paneles solares de tubos de vacío, que alcanzan temperaturas de hasta 100-190 °C, son más eficaces para mayores demandas que los de placa plana.

Sistemas Híbridos:

Un sistema FV híbrido es aquel que utiliza otras fuentes de energía (renovables o no) para complementar la acción generadora de los paneles FVs. [18], [19],[20]

Ejemplo de un Sistema Híbrido



Generación de Hidrógeno Termo Solar[21]

1.3.2- Los diferentes métodos de generación de Hidrógeno

1. Electrolisis del agua.
2. La gasificación de combustibles Fósiles.
3. La conversión térmica o Biológica de biomasa.
4. El craqueo termo solar del Metano.
5. El vapor reformando del gas natural.

A continuación se muestran las ventajas y desventajas de algunos de estos métodos.

Electrólisis del agua

Desventajas:

- Necesita una gran fuente de calor de temperatura inferior a 2500 K para un grado razonable de disociación.
- El H₂ de la electrolisis es extremadamente puro pero caro al mismo tiempo, es 10 veces más caro que el gas natural.

Ventajas:

- El H₂ y el O₂ se obtienen en diferentes pasos.
- Elimina la necesidad de altas temperaturas para la separación del gas.
- ZnO puede reciclarse en el primer paso.
- La eficacia global es de un 40%-50%.

Gasificación de los combustibles fósiles.

La desventaja:

- La producción de CO como un derivado que es dañino para el ambiente.

Ventajas:

- Usar residuos agrícolas y o especialmente biomasa para el uso de energía.
- Eficiencia global de 68%-78%.

El craqueo solar térmico del Metano.

Desventajas:

- Este proceso tiene un factor de capacidad bajo.
- No produce H₂ por la noche.

Ventajas:

- El valor reconversión de CH₄ es de un 70%.
- El carbón puede venderse en el Mercado, el cual disminuye su costo de producción en un 32%.

Generación de H₂ usando catalizadores

Ventajas:

- Reducción de la temperatura de operación (823K).
- Produce H₂ sin CO.
- El catalizador puede regenerarse.

Desventajas:

- El valor de conversión del CH₄ se reduce.
- El valor de conversión de baja temperatura se reduce.
- Los catalizadores pierden su actividad cuando se deposita carbón en ellos.

1.3.3-Secado en secadores solares.[22]

En los secadores solares simples, fuera de aprovechar el secado del aire natural, la energía solar acumulada promueve el calentamiento del aire, aumentando ese potencial y favoreciendo el movimiento del mismo por convección natural. Existen diversas configuraciones para este tipo de secador.

En el secador solar con precalentamiento del aire, este último se calienta en el colector solar antes de pasar a la cámara de secado. El producto se coloca sobre una malla de 1,5 mm. Este secador almacena la energía solar debido al lecho de piedras, el que se debe pintar de color negro opaco. El aire entra por la abertura inferior del secador, se calienta con la energía almacenada en el lecho de piedras, el cual está cubierto con un plástico transparente, sube por convección natural y pasa por la cámara de secado retirando la humedad del producto.

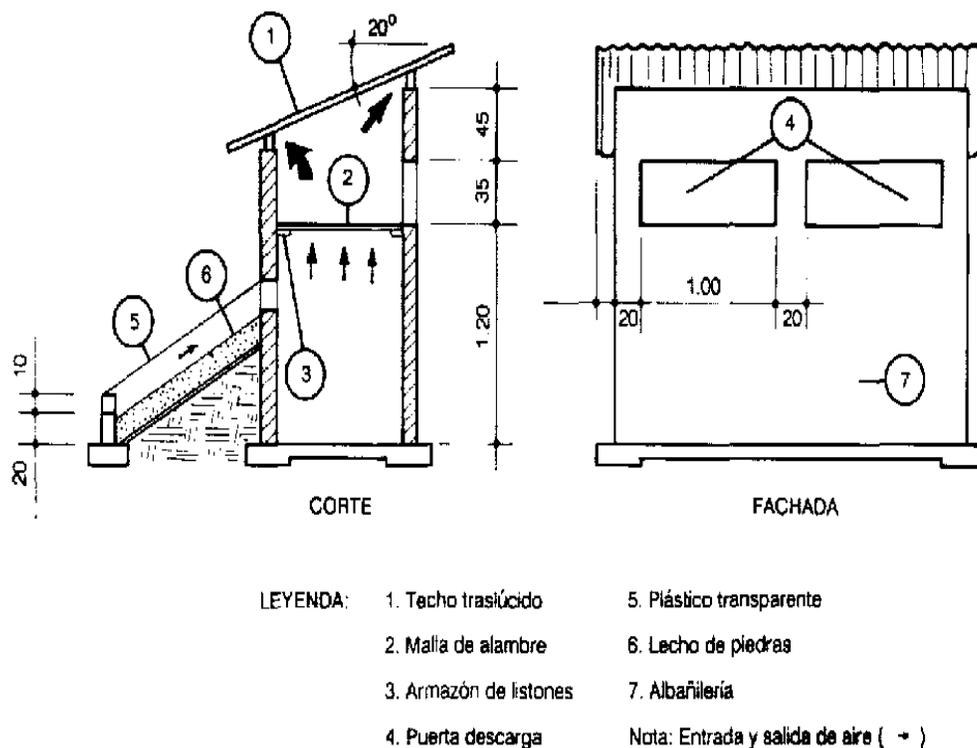


Fig.12: El secador solar con precalentamiento del aire.

Secador solar tipo invernadero:

Este secador se puede construir con una armazón de madera y plástico. La cara inclinada del secador se cubre con plástico transparente y se vuelve hacia el sol, las caras laterales se pueden cubrir con plástico de calidad inferior, el piso se cubre con plástico, sin orificios, sobre el cual se coloca una capa de 0,10 a 0,15 m de grano para secar; los bordes del piso pueden ser de madera y deben estar protegidos con plástico hasta una altura de 0,2 m. para evitar la entrada de agua de lluvia. En la parte inferior del lado inclinado y de las paredes laterales se debe dejar una abertura de 0,2 a 0,3 m de altura para facilitar la entrada del aire. Se debe dejar la misma abertura en la parte superior del lado opuesto al lado inclinado, para facilitar la salida del aire. El aire que entra por la base del secador se calienta ahí mismo, lo que aumenta su potencial de secado y provoca su salida por convección natural, en la parte superior. En el Municipio de Santa Rosa, en el Brasil, que esta a una latitud de 28°, se obtuvo una temperatura media superior en 3° a 5°C a la temperatura ambiente, en invierno, y hasta en 30°C, en primavera. En la misma localidad el tiempo de secado fue de tres a cinco días asoleados en invierno y de uno a dos días de sol en primavera, con lo cual se logró reducir el grado de humedad de los granos, de 20 a 14%. [23]

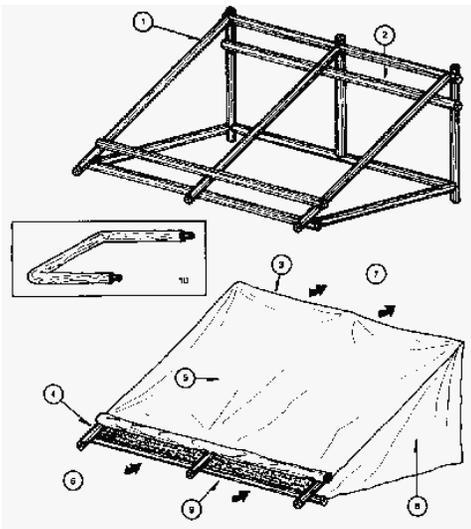


Fig.13: Secador solar tipo invernadero

1.4- Discusión o análisis crítico de las tecnologías que emplean EST.

Dentro de las tecnologías que utilizan la energía solar térmica se puede encontrar:

- Calentar agua con energía solar.
- Calefacción con energía solar.
- Climatización de piscinas con energía solar.
- La refrigeración con energía solar.

El calentamiento del agua es una de las aplicaciones que más se está extendiendo, ya que une el ahorro energético y el respeto al medio ambiente con una importante rentabilidad económica.

A continuación se estudiara la obtención de agua caliente para diversos usos, dentro de ellos ACS (Agua Caliente Sanitaria), muy adecuado tanto para uso doméstico como para clubes deportivos o duchas múltiples en donde se suele requerir temperaturas del agua de aproximadamente 45 grados centígrados.

El calentador solar por termosifón es la manera más práctica y económica de obtener agua caliente para el hogar. La sencillez de su diseño, su durabilidad y la eficacia de su funcionamiento hacen de este el sistema más adecuado para regiones de características climáticas cálidas.



Funcionamiento de un calentador solar termosifónico.[24-26]

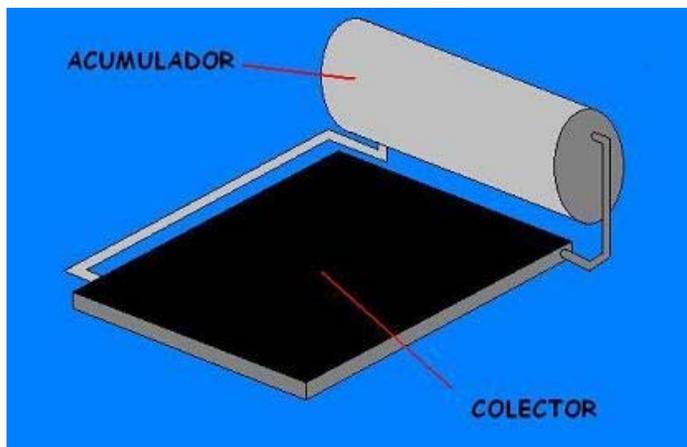
El funcionamiento del calentador solar es sencillo y efectivo. El Calentador consta de dos partes fundamentales:

-El colector: Elemento encargado de captar la energía del sol y transformarlo en calor. Por medio de una estructura metálica se dota a los colectores de una inclinación idónea para lograr que la captación sea óptima en el conjunto del año.

Este 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.
- El acumulador o tanque: Depósito donde se almacena el agua caliente para su consumo. Para evitar que el agua pierda su calor durante la noche el tanque acumulador se halla termo sellado con materiales aislantes apropiados.

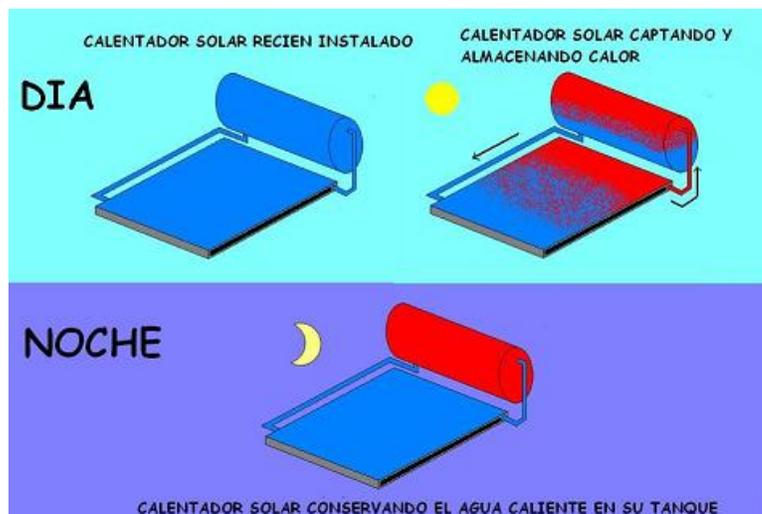
El acumulador y el colector están unidos entre sí por tuberías.



El proceso de calentamiento del agua se inicia cuando los rayos solares inciden sobre la superficie del colector y elevan la temperatura del agua que circula por los conductos que tiene en su interior.

El agua al calentarse pierde densidad y tiende a ascender pasando a través de las tuberías al acumulador que esta situado encima. El espacio que deja libre el agua que ha ascendido es reemplazado por agua que aún no ha sido calentada proveniente del acumulador. Esta agua se calienta a su vez por el mismo procedimiento y vuelve a ascender repitiéndose el proceso mientras los rayos solares incidan en el colector. Así se establece un circuito natural en el cual toda la energía solar captada en el colector pasa al tanque. [25].[27]

Al final del día tenemos agua caliente, entre 45 y 75 grados centígrados, almacenada en el tanque termo sellado. Se estima que la pérdida media de temperatura durante la noche en el interior del tanque es de entre 3 y 7 grados centígrados, por lo tanto se puede disfrutar de agua caliente almacenada durante la madrugada o por la mañana antes de que vuelva a salir el sol.



La acción termosifónica es de una naturaleza muy compleja, que hace que la aparente sencillez constructiva y estructural de los calentadores de termosifón no compense la complejidad de los modelos de comportamiento que pretenden describir el funcionamiento de estas instalaciones. Por la razón antes mencionada a la temática del diseño y evaluación de calentadores termosifónicos se le ha dedicado un gran número de estudios teóricos y experimentales, entre los que pueden señalarse los siguientes:

AUTOR	OBSERVACIONES
Close D. J [43]*	Modelo analítico simple de parámetros agrupados.
Gupta C. L et al [44]*	Modelo de Close mejorado con la inclusión de la eficiencia térmica del absorbedor y la capacidad térmica del sistema.
Ong K. S [45]*	Modelo basado en un análisis numérico del termosifón con distribución lineal de temperatura en el tanque de almacenamiento.
Huang B. J [46]*	Primer modelo basado en la teoría de semejanza que involucraba diez parámetros adimensionales, sin embargo el modelo no relacionaba estos parámetros con las variables de salida o parámetros globales de funcionamiento del calentador.
Merthol A. et al [47]*	Modelo que de forma comprensible incluía la pérdida térmica del tanque de almacenamiento, tuberías de conexión y el consumo de agua por los usuarios del sistema. El modelo consideraba una distribución lineal constante de la temperatura del agua dentro del tanque de almacenamiento y coeficiente de expansión térmico del agua independiente de la temperatura, lo

cual limitaba el uso del modelo a muy estrechas condicione externas.

Ee- Tong Pak [48]++
y Young [49]

Describieron experimentalmente los problemas de mezclado y estratificación dentro del tanque de almacenamiento, aspectos que por lo general no habían sido adecuadamente tratados en los modelos matemáticos anteriormente descritos.

Zbyslaw Pluta [50]*

Modelo matemático que, apoyado en los resultados experimentales de Ee- Tong Pak y Young considera la existencia de zonas de mezcla completa en la parte del tanque de almacenamiento sujeta a circulación.

(++): Modelos Matemáticos. (*): Resultados experimentales

Los trabajos referidos arriba por lo general han sido utilizados para describir el comportamiento térmico de calentadores termosifónicos y en tanto son útiles para la evaluación de dicho comportamiento han devenido también herramientas para el diseño de estas instalaciones.

Un grupo de investigadores en el área de la utilización de la energía solar térmica [10] han desarrollado, además métodos simplificados que de forma rápida permiten el dimensionamiento. No obstante estos métodos adolecen del factor subjetividad por el hecho de que se construyen sobre índices que no siempre suministran información suficiente.

Con el objetivo de ilustrar lo discutido en la formulación del problema de investigación se ha considerado útil describir brevemente las características de dos trabajos, que pudiendo ser ambos utilizados para los propósitos del diseño, abordan los aspectos del cálculo de los calentadores solares con niveles de aproximación y complejidad matemática muy dispares.

1.5- Modelo de Zbyslaw Pluta [26].

Zbyslaw Pluta (en "Archivos de termodinámica" Vol.19 (1988), No.1-2, 33-44) modeló un calentador solar termosifónico como el mostrado en la figura 14, a partir del planteamiento de un modelo matemático que describe el sistema en términos de las siguientes ecuaciones de gobierno, referidas a la figura 14-a:

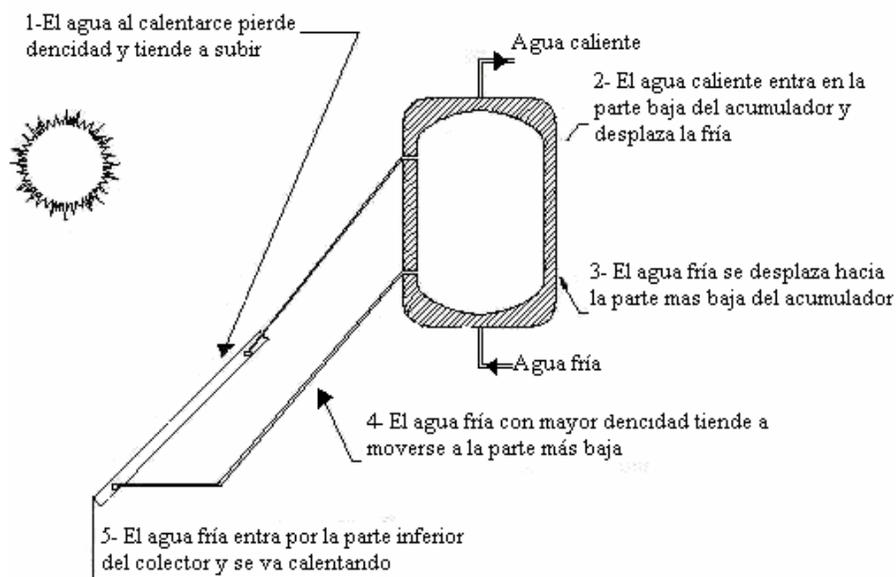


Fig.14: Esquema de un calentador solar termosifónico.

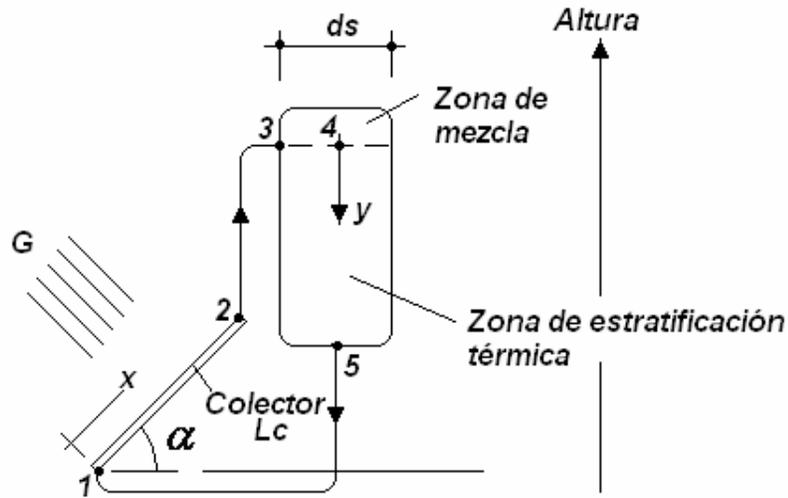


Figura 14-a

Ecuación de la energía del plato absorbedor:

$$\frac{\partial T_a}{\partial \tau} = \frac{k_a}{\rho_a C_a} \frac{\partial^2 T_a}{\partial x^2} + \frac{W}{F_a \rho_a C_a} \left[\frac{\pi \cdot H}{2t} (\tau \alpha) \text{Sen} \left(\frac{\pi \cdot \tau}{t} \right) - U_a (T_a - T_z) - U_a \frac{F'}{1 - F'} (T_a - T_c) \right]$$

Ecuación del balance de Energía del agua que llena los tubos del colector:

$$\frac{\partial T_s}{\partial \tau} + n \left(\frac{d_c}{d_s} \right)^2 \frac{\partial}{\partial y} (v_c T_s) = \frac{k_f}{\rho_f C_f} \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} - \frac{4U_s}{d_s \rho_f C_f} (T_s - T_z)$$

Ecuación del balance de energía en la zona de mezclado del tanque de almacenamiento:

$$\frac{\partial T_{\text{min}}}{\partial \tau} = n \left(\frac{d_c}{d_s} \right)^2 \frac{v_c}{h_{\text{min}}} (T_c|_{x=L_c} - T_{\text{mix}}) - \frac{F_{\text{mix}} U_s}{F_s h_{\text{mix}} \rho_f C_f} (T_{\text{mix}} - T_z)$$

Ecuación de la cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial v_c}{\partial \tau} = \frac{\Delta P_w - \Delta P_t}{n \cdot F_c \cdot \rho_f \cdot \sum_i \left(\frac{L_i}{F_i} \right)}$$

Donde, $\Delta P_w = g \cdot \left(\int_1^2 \rho \cdot \text{Sen}(\alpha) \cdot dx + (h_1 - h_2) \cdot \rho_2 + \int_4^5 \rho \cdot dy + (h_1 - h_5) \cdot \rho_5 \right)$ es la fuerza motriz y

$$\Delta p_t = \frac{2\mu_f \cdot v_c}{d_c} \left[16 \cdot \left(\frac{L_c}{d_c} + n \cdot d_c^3 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{d_i^4} \right) - 7000 + \frac{n-2}{2n} \left(\frac{d_c}{d_u} \right)^3 \left(550 + 1550 \frac{n}{n-2} \right) \right]$$
 es la

suma de las caídas de presión locales y por fricción.

Este sistema de ecuaciones diferenciales se completa con el conjunto de condiciones de frontera siguientes:

$$\tau = 0; T_a = T_{a_o}; T_c = T_{c_o}; T_s = T_{s_o}; T_{mix} = T_{s_o}; v_c = 0$$

$$\tau > 0, x = 0; T_c = T_s \Big|_{y=h_s}; \frac{\partial T_a}{\partial x} = 0$$

$$x = L_c; \frac{\partial T_a}{\partial x} = 0$$

$$y = 0; T_s = T_{mix}$$

$$y = h_s; -k_f \cdot \frac{\partial T_s}{\partial y} = U_s (T_s - T_z)$$

En el referido trabajo se introduce una normalización de las variables como sigue:

$$\bar{T} = \frac{(T - T_o) \cdot U_a \cdot t}{H}; \quad \bar{\tau} = \frac{\tau}{t}; \quad \bar{v}_c = \frac{v_c t}{L_c}; \quad \bar{x} = \frac{x}{L_c}; \quad \bar{y}_c = \frac{y}{L_c}$$

que condujeron a un sistema de ecuaciones diferenciales adimensionales equivalente al descrito arriba. Dicho sistema fue resuelto numéricamente mediante el método de las diferencias finitas y los resultados graficados fundamentales se muestran en las gráficas 15,16 y 17.

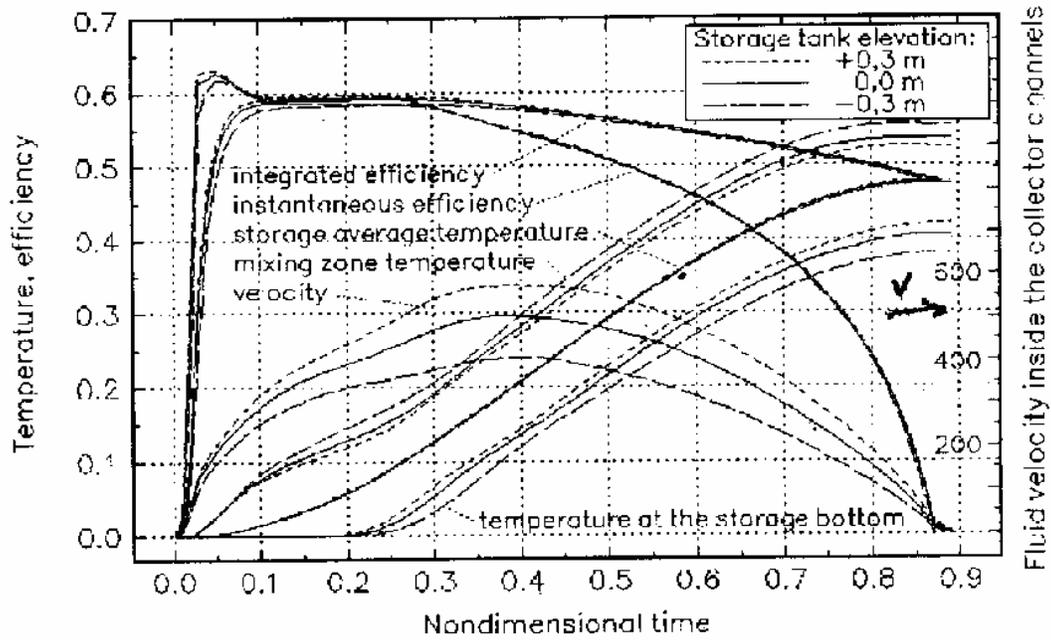


Fig.15: La actuación del calentador para tres tanques a diferentes alturas.

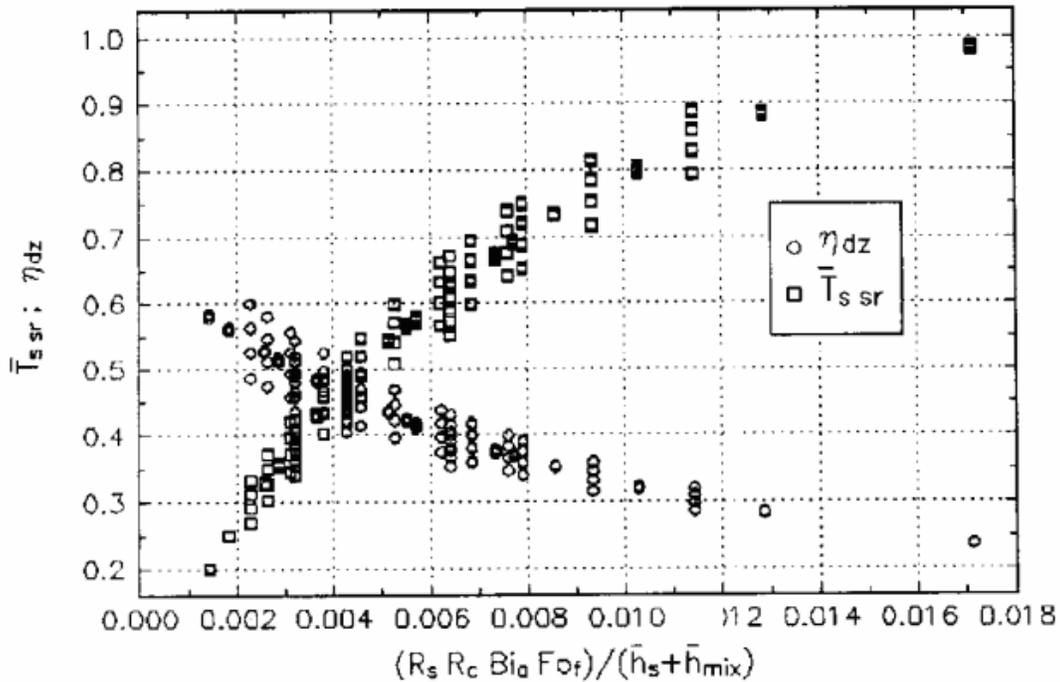


Fig.16: Resultados de las simulaciones realizadas.

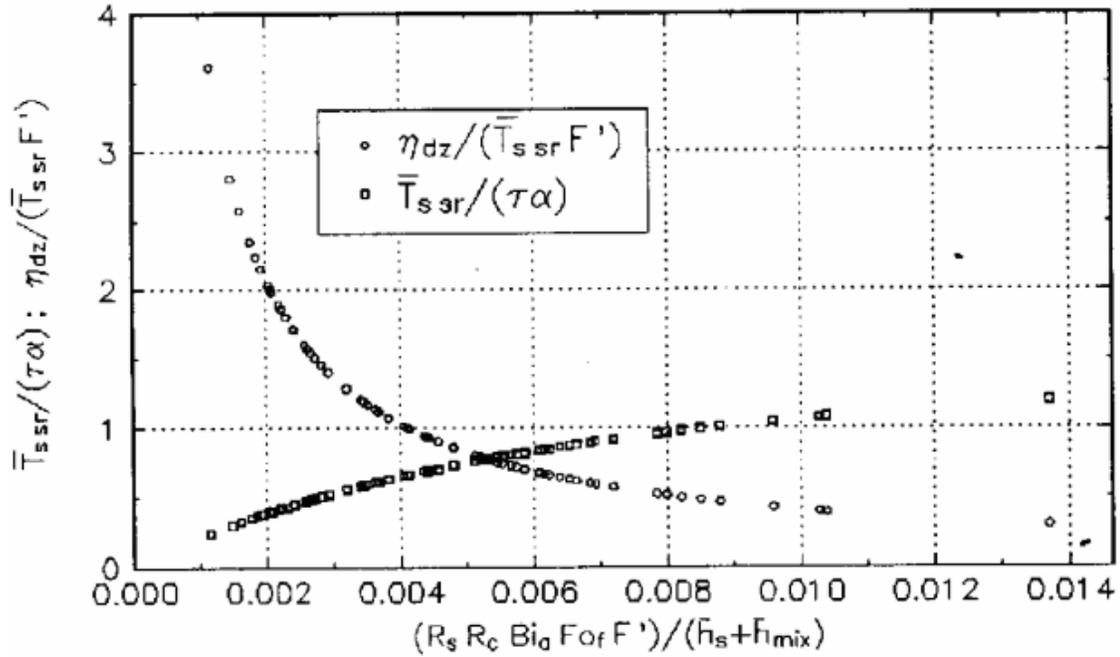


Fig.17: Resultados normalizados de los cálculos.

Zbyslaw Pluta propone las funciones de aproximación dadas abajo para las distribuciones de puntos en la figura 4, y las refiere como fórmulas muy útiles para propósitos de diseño.

$$\bar{T}_{ssr} = 0.7378 (\tau \alpha) \left(\frac{R_s R_c B_{i_a} F_{o_f} F'}{\bar{h}_s + \bar{h}_{mix}} \right) \left[0.112 \log \left(\frac{R_s R_c B_{i_a} F_{o_f} F'}{\bar{h}_s + \bar{h}_{mix}} \right)^{-0.598} \right] \quad (1.4)$$

$$n_{dz} = 0.00412 \frac{\bar{T}_{ssr} (\bar{h}_s + \bar{h}_{mix})}{R_s R_c B_{i_a} F_{o_f}} \quad (1.5)$$

A pesar de las potencialidades del presente trabajo, el mismo suministra expresiones de los coeficientes y parámetros geométricos del colector que no cubren toda la diversidad existente de los mismos.

Observación: la nomenclatura y expresiones de los coeficientes en el modelo descrito se dan en detalle en [25].

1.6- Método de Cálculo aproximado: Método del Índice Solar (IS)

Un método de sencilla aplicación [10], se basa en la estimación del denominado índice solar propio del lugar donde se va a ubicar la instalación, el cuál se calcula sin más que sumar los valores parciales de cada una de las cuatro entradas de la tabla I.

La suma de los cuatro valores parciales elegidos en cada una de las líneas de la tabla es lo que se denomina índice solar del lugar.

Tipo de viento predominante en la zona	Fuerte	Moderado	Flojo	Despreciable o nulo
Valor parcial	0	0.5	1	1.5

Soleamiento anual medio	Muy escaso (abundantes lluvias y mucha nubosidad)	Bastante nubosidad	Nubosidad media o variable	Escasez de nubes	Cielos despejados
Valor Parcial	0	2	4	7	12

Temperatura ambiente media	Muy fría	Fría	Media (Templada)	Calurosa	Muy Calurosa
Valor Parcial	0	1	1.5	2	3

Temperatura media del agua de la red	Fría	Normal	Templada
Valor parcial	0	1	2

Tabla I. Parámetros de cálculo del índice solar (IS).

La utilidad de la determinación del IS está también en que, si se divide el número 10 entre dicho índice el resultado nos da directamente el número de m² de colectores que serán aproximadamente necesarios para satisfacer los requerimientos de agua caliente sanitaria de una persona. Bastará después multiplicar por el número de personas que habitan en la vivienda para conocer la superficie total que será necesaria instalar, y por tanto, poder evaluar el costo de los colectores.

Observación: como puede observarse este método aunque de extrema sencillez desatiende la geometría del colector y depende mucho de índices globales, cuya evaluación está sujeta también a la subjetividad.

En el próximo capítulo el autor propone una metodología, que sin llegar a considerar elementos de la dinámica o funcionamiento instantáneo del calentador, fundamenta el cálculo en parámetros promediados de radiación solar horaria, parámetros geométricos y de configuración y correlaciones de la transferencia de calor ligadas a este tipo de aplicaciones.

Capítulo II- Diseño de Calentadores solares termosifónicos

2.1: Metodología de diseño para el cálculo de calentadores solares termosifónicos

Fundamentos para el cálculo de una instalación solar.

El cálculo de una instalación solar se divide en dos aspectos fundamentales: [28, 29]

- 1)-Cálculo de la eficiencia del colector solar.
- 2)-Cálculo del número de colectores de una instalación solar.

2.1.1: Cálculo de la eficiencia del colector

La eficiencia del colector solar esta definida por la relación entre la energía útil ganada en un tiempo determinado y la energía total incidente el colector en el mismo periodo, esta es:

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

Donde: $Q_u \Rightarrow$ Energía útil que absorbe el colector.

$A_c \Rightarrow$ Área del colector.

$H_T \Rightarrow$ Radiación solar total incidente por unidad de área en la superficie del colector.

$\tau \Rightarrow$ Tiempo.

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

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

La eficiencia diaria se calcula por:

$$\eta_{día} = \frac{\sum Q_u}{A_c \sum H_T} \quad (2.3)$$

El valor de la eficiencia diaria puede calcularse para cualquier día del año, o p ara un día promedio:

$$H_T = (H - H_d) R_b + H_d \frac{1 + \cos s}{2} + H \frac{(1 - \cos s) P_t}{2} \quad [\text{kJ}/(\text{m}^2\text{h})] \quad (2.4)$$

Donde: $H \Rightarrow$ Radiación total horaria que cae sobre una superficie horizontal.

$S \Rightarrow$ Angulo de inclinación del colector [grados]

$R_b \Rightarrow$ Relación entra radiación directa que sobre una superficie inclinada y la radiación sobre una superficie horizontal., este factor depende fuertemente del ángulo S .

$P_t \Rightarrow$ Reflexividad de la tierra; 0.2 (Para Cuba).

El 1^{er} término representa la energía directa, el 2^{do} la cantidad de energía difusa incidente y el 3^{ro} la cantidad de energía que llega al colector reflejada por el suelo.

Se recomienda dar a los colectores una inclinación de 0.9θ , donde θ es la latitud del lugar.

El valor de Q_u , se puede determinar para cada hora por medio de la expresión:

$$Q_u = A_c F_R [S - U_L (T_F - T_A)] \quad [\text{kJ}/\text{h}] \quad (2.5)$$

Donde: $S \Rightarrow$ Radiación absorbida por el colector en la unidad de área en una hora.

$U_L \Rightarrow$ Coeficiente de pérdidas del colector.

$T_F \Rightarrow$ Temperatura del fluido a la entrada del colector.

$T_A \Rightarrow$ Temperatura ambiente.

$F_R \Rightarrow$ Factor de absorción de calor del colector.

$$S = H_T (\tau\alpha)_e (1-a)(1-b) \quad [\text{kJ}/(\text{m}^2\text{h})] \quad (2.6)$$

Siendo: $(T\alpha) \Rightarrow$ valor efectivo del producto transmisividad-absorbencia en el colector.

(1-a) \Rightarrow Factor de efecto del polvo sobre el colector.

(1-b) \Rightarrow Factor de efecto de la sombra sobre el plato de absorción.

Se recomienda tomar $a = 0.02$.

Para un colector de dos placas transparentes separadas 20mm, se usa $b = 0.03$.

El coeficiente de pérdidas U_L se calcula por medio de un proceso iterativo, basado en la teoría de transferencia de calor por conducción, convección y radiación. [30]

$$U_L = U_t + U_b + U_e \quad [\text{kJ}/(\text{m}^2\text{hK})] \quad (2.7)$$

Donde: $U_t \Rightarrow$ coeficiente de pérdidas por la cubierta del colector.

$U_b \Rightarrow$ coeficiente de pérdidas por el fondo.

$U_e \Rightarrow$ coeficiente reducido de pérdidas por los laterales.

Aquí U_t es el mayor de todos estos coeficientes y según Klein, puede evaluarse directamente por la siguiente ecuación:

$$U_t = \frac{1}{\frac{C}{T_p} \left(\frac{T_p - T_A}{N + F} \right)^e + \frac{1}{h_w}} + \frac{\sigma(T_p + T_A)(T_p^2 + T_A^2)}{\frac{1}{\varepsilon_p + 0.059 N h_w} + \frac{2N + F - 1 + 0.133 \varepsilon_g}{\varepsilon_g} - N} \quad (2.8)$$

$$\text{Donde: } C = 520(1 - 0.000051s^2) \quad (2.9)$$

$$F = (1 - 0.089 h_w + 0.1166 h_w \varepsilon_p) (1 + 0.07866N) \quad (2.10)$$

$$e = 0.43 \left(1 - \frac{100}{T_p} \right) \quad (2.11)$$

$$h_w = 20.52 + 13.68\varpi \quad [\text{kJ/m}^2\text{hK}]$$

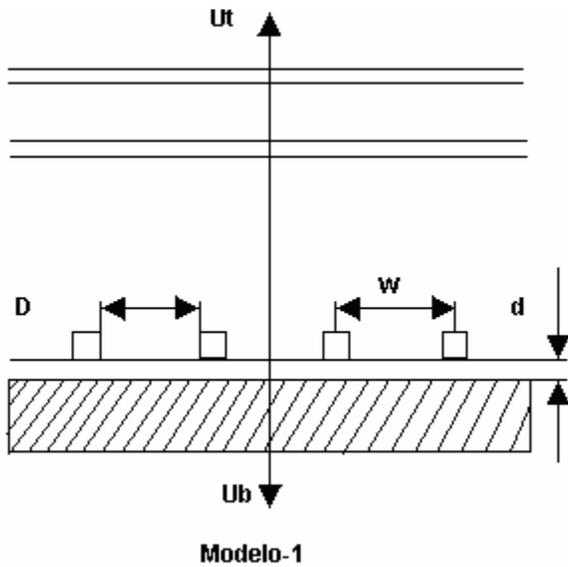
Conviene expresar el factor F_R en función del factor F' del colector:[31]

$$F_R = \frac{\dot{m} C_p}{A_C U_L} \left[1 - \text{Exp} \left(-\frac{F U_L A_c}{\dot{m} C_p} \right) \right] \quad (2.12)$$

F' depende principalmente de la forma geométrica del plato de absorción y de las propiedades de los materiales de su construcción.

A continuación se muestran diferentes valores de F' acorde con su modelo:

Modelo-1



$$F' = \frac{1}{\frac{W U_L}{\pi D h} + \frac{W}{D + (W - D)F}} \quad (2.13)$$

Donde:

$$F = \frac{\text{Tan} \left[\left(\frac{U_L}{k_d d} \right)^{1/2} \frac{(W - D)}{2} \right]}{\left(\frac{U_L}{k_d d} \right)^{1/2} \frac{(W - D)}{2}} \quad (2.14)$$

Siendo: $W \Rightarrow$ Distancia entre los tubos o canales del colector medidor centro a centro. [m].

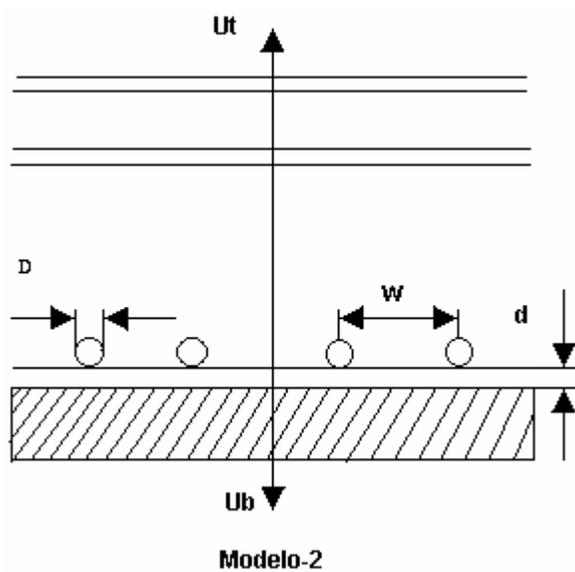
$D \Rightarrow$ Diámetro o ancho de tubo o canal respectivamente. [m].

$d \Rightarrow$ Espesor de la placa del plato de absorción . [m].

$k_d \Rightarrow$ Conductividad térmica.

$$U_L = U_T + U_b \quad (2.15)$$

Modelo-2

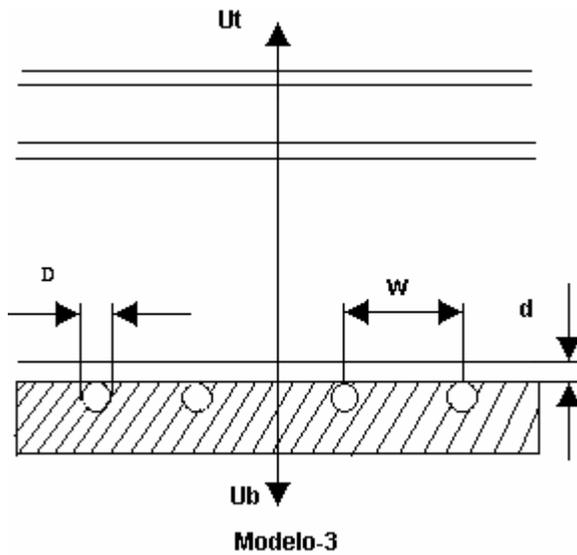


$$F' = \frac{1}{\frac{W U_L}{\pi D h} + \frac{D}{W} + \frac{1}{\frac{W U_L}{C_b} + \frac{W}{(W - Q)F}}} \quad (2.16)$$

Donde: F y U_L se calculan igual al modelo 1.

$C_b = 108 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \text{ K}) \Rightarrow$ Conductancia térmica de la unión.

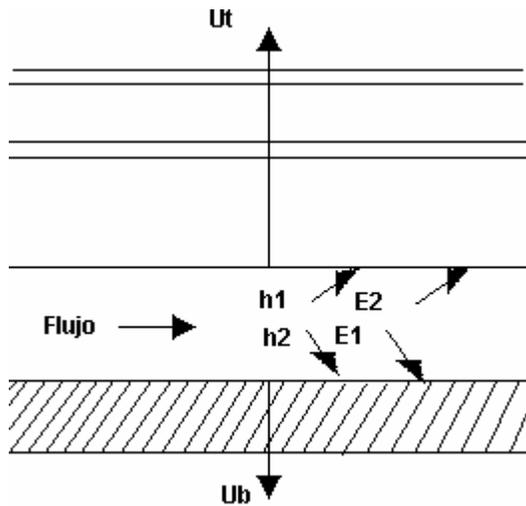
Modelo-3



$$F' = \frac{1}{\frac{W U_L}{\pi D h} + \frac{W U_L}{C_b} + \frac{W}{D + (W - D)F}} \quad (2.17)$$

Donde F y U_L se calculan igual al modelo -1.

Modelo-4



Modelo-4

$$F' = \frac{1}{1 + \frac{U_L}{h_1 + \frac{1}{\frac{1}{h_2} + \frac{1}{h_r}}}} \quad (2.18)$$

Donde: $h_{1,2} \Rightarrow$ coeficiente de transferencia de calor el fluido y la pared del tubo o canal del plato de absorción. [kJ/m²hK]

$h=1000$ kJ/m²hK para circulación natural.

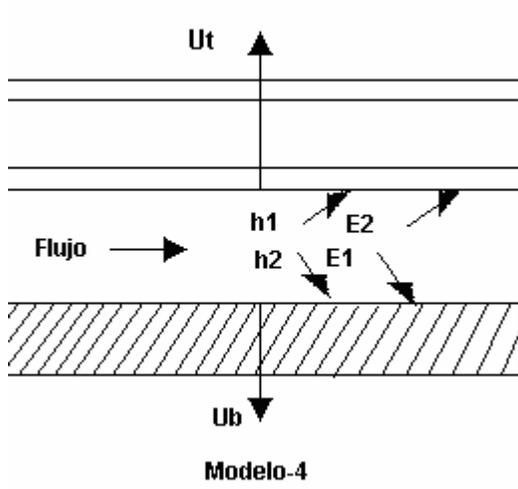
$$U_L = U_T + U_b \quad (2.18)$$

$$h_r = \frac{\sigma \left(T_1^2 + T_2^2 \right) \left(T_1 + T_2 \right)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (2.19)$$

Siendo: $\varepsilon_{1,2} \Rightarrow$ Emisividad de superficies en el colector.

$$\sigma = 20.41 \cdot 10^{-8} \text{ kJ} / \text{m}^2 \text{K}^4 \Rightarrow \text{Constante de Stefan-Voltzman.} \quad (2.20)$$

Modelo-5

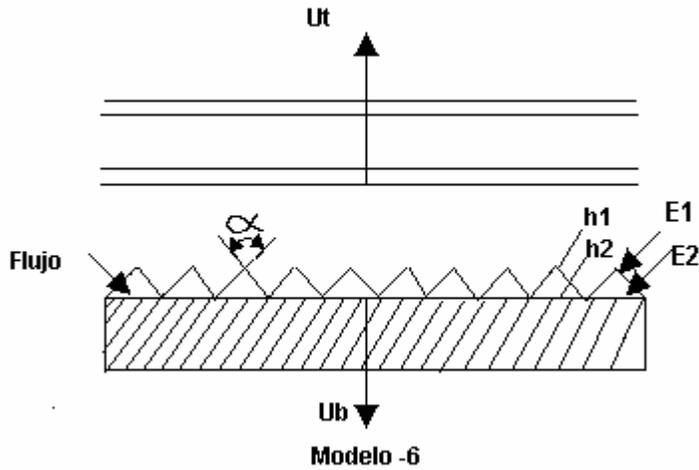


$$F' = \frac{1}{1 + \frac{h_r U_L}{h_1 h_2 + h_2 U_L + h_2 h_r + h_1 h_2}} \quad (2.21)$$

Donde: h_r se calcula igual al modelo-4.

$$U_L = \frac{U_T + U_b}{1 + \frac{(U_L + U_b) h_2}{h_1 h_2 + h_1 h_r + h_2 h_r}} \quad (2.22)$$

Modelo-6



$$F' = \frac{1}{1 + \frac{U_L}{\frac{h_1}{\sin \frac{\alpha}{2}} + \frac{1}{\frac{1}{h_2} + \frac{1}{h_r}}}} \quad (2.23)$$

Donde: $\alpha \Rightarrow$ Absorbencia angular del plato de absorción del colector.

Otras Fórmulas útiles. [32-38]

Declinación

$$\delta = 23.45 \sin \left(360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad [\text{Grados}]$$

Angulo horario de la salida del sol

$$w_s = \arccos(-\tan \phi \tan \delta) \quad [\text{Grados}]$$

Radiación extraterrestre diaria sobre una superficie horizontal.

$$H'_0 = \frac{24}{\pi} I_{sc} \left\{ 1 + 0.033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \left[\cos \phi \cos \delta \sin w_s + \frac{2\pi}{360} w_s \sin \phi \sin \delta \right] \right\} \quad [\text{kJ/m}^2 \text{ día}]$$

Radiación total diaria que cae sobre una superficie horizontal.

$$H' = K_T H'_0 \quad [\text{kJ/m}^2\text{día}]$$

Radiación total horaria que cae sobre una superficie horizontal.

$$H = KH' \quad [\text{kJ/m}^2\text{h}]$$

Radiación difusa diaria sobre una superficie horizontal.

$$H'_d = f(K_T)H' \quad [\text{kJ/m}^2\text{día}]$$

Donde:

$$f(K_T) = 1.3903 - 4.0273K_T + 5.5315K_T^2 - 3.1080K_T^3$$

Radiación difusa horaria que cae sobre una superficie horizontal.

$$H_d = K_d H'_d \quad [\text{kJ/m}^2\text{h}]$$

Angulo de incidencia de la radiación directa (θ_r)

$$\cos \theta_r = \cos(\theta - s) \cos \delta \cos \varpi + \text{sen}(\theta - s) \text{sen} \delta$$

Angulo del zenit (θ_z)

$$\cos \theta_z = \cos \theta \cos \delta \cos \varpi + \text{sen} \theta \text{sen} \delta$$

Angulo der refracción

$$\theta_r = \text{arcsen} \left(\frac{\text{sen} \theta_z}{n_{21}} \right)$$

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

$$Rb = \frac{\cos \theta_r}{\cos \theta_z}$$

Reflexividad de la luz polarizada sobre el plano de incidencia.

$$\rho_s = \frac{\text{sen}^2(\theta_T - \theta_r)}{\text{sen}^2(\theta_T + \theta_r)} \quad [\text{grados}]$$

Reflexividad de la luz polarizada perpendicularmente al plano de incidencia.

$$\rho_s = \frac{\tan^2(\theta_T - \theta_r)}{\tan^2(\theta_T + \theta_r)} \quad [\text{grados}]$$

Transmicividad debido a la reflexión

$$\tau_r = \frac{1}{2} \left[\frac{1 - \rho_s}{1 + (2n - 1)\rho_s} + \frac{1 - \rho_p}{1 + (2n - 1)\rho_p} \right]$$

Transmicividad debido a la absorción.

$$\tau_a = e^{-KaNL / \cos \theta_r}$$

Transmicividad solar.

$$\tau = \tau_r \tau_a$$

Producto tramitancia absorbencia

$$(\tau\alpha) = \tau \left[\frac{\alpha}{1 - (1 - \alpha)\rho d} \right]$$

Valor efectivo del producto tramitancia absorbencia

$$(\tau\alpha)_e = (\tau\alpha) + 0.27(1 - \tau\alpha)$$

Después de conocidos los valores de Q_u y H_T , para hora del día y de U_L y F_R , se determinan η .

2.1.2: *Calculo del número de colectores que debe tener la instalación solar.*

El tanque de almacenamiento de una instalación solar debe tener una capacidad tal que:

$$m_s = 2.5m_L \quad (2.24)$$

Siendo: $m_s \Rightarrow$ Capacidad del tanque de almacenamiento.

$m_L \Rightarrow$ Demanda de agua caliente en el día. Para que el cálculo de la instalación sea aceptable, debe conocerse la demanda de agua caliente en función de la hora del día

Un valor aproximado de energía diaria es:

$$Q_L' = m_L C_p (T_S - T_L) \quad (2.25)$$

$T_S \Rightarrow$ Temperatura de demanda del fluido.

$T_L \Rightarrow$ Temperatura del fluido en el depósito general.

Debido a las pérdidas se estima que la energía útil que debe ganar la batería de colectores en un día es:

$$Q_T' = 1.15Q_L' \quad (2.26)$$

Y el número de colectores para el sistema será:

$$N_c = \frac{Q_T'}{\eta A_c \sum H_T} \quad (2.27)$$

Donde debe tomarse el valor entero aproximado por exceso.

Con este número de colectores debe comprobarse si la instalación satisface las necesidades requeridas en cada hora del día. Esta operación se realiza calculando el valor de temperatura del fluido en el tanque de almacenamiento al finalizar cada hora por medio de la ecuación:

$$T_{s,i} = T_{s,i-1} + \frac{\Delta\tau}{M_s C_p} (Q_T - Q_p - Q_L) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.28)$$

$T_{s,i-1} \Rightarrow$ Temperatura del fluido en el tanque de almacenamiento al comenzar cada hora.

$\Delta\tau \Rightarrow$ Periodo de tiempo, normalmente tomado como 1 hora.

$Q_T \Rightarrow$ Energía útil ganada por al batería en 1 hora

$Q_p \Rightarrow$ Energía perdida en el almacenamiento es 1 hora.

$Q_L \Rightarrow$ Demanda de energía en la misma hora.

$$Q_T = n_c A_c F_r \left[S_a - U_L (T_{s,i-1} - T_{ra}) \right] \text{ [kJ/h]} \quad (2.29)$$

$$Q_p = (UA)_s (T_{s,i-1} - T_{ra}) \text{ [kJ/h]} \quad (2.30)$$

$$Q_L = \overset{\circ}{m} C_p (T_s - T_L) \text{ [kJ/h]} \quad (2.31)$$

$\overset{\circ}{m} \Rightarrow$ Flujo de la demanda

$T_{s,i-1} \Rightarrow$ Temperatura del fluido en el tanque al comenzar la hora. [$^{\circ}\text{C}$]

$T_s \Rightarrow \Rightarrow$ Temperatura de demanda del fluido. [$^{\circ}\text{C}$]

2.2: Impacto medio ambiental[10]

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 dan lugar a la formación de NO_x.
 - 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 .

Capítulo III: Implementación computacional de la metodología de diseño.

En este capítulo se realizará el cálculo para una instalación de calentamiento de agua por termosifón, para un dormitorio de 30 estudiantes para bañarse al finalizar la tarde.

El cálculo se realizó para un día de condiciones medias, para el cual se disponía de la variación de temperatura de bulbo seco del aire según se plantea en [39], (ver figura 18)

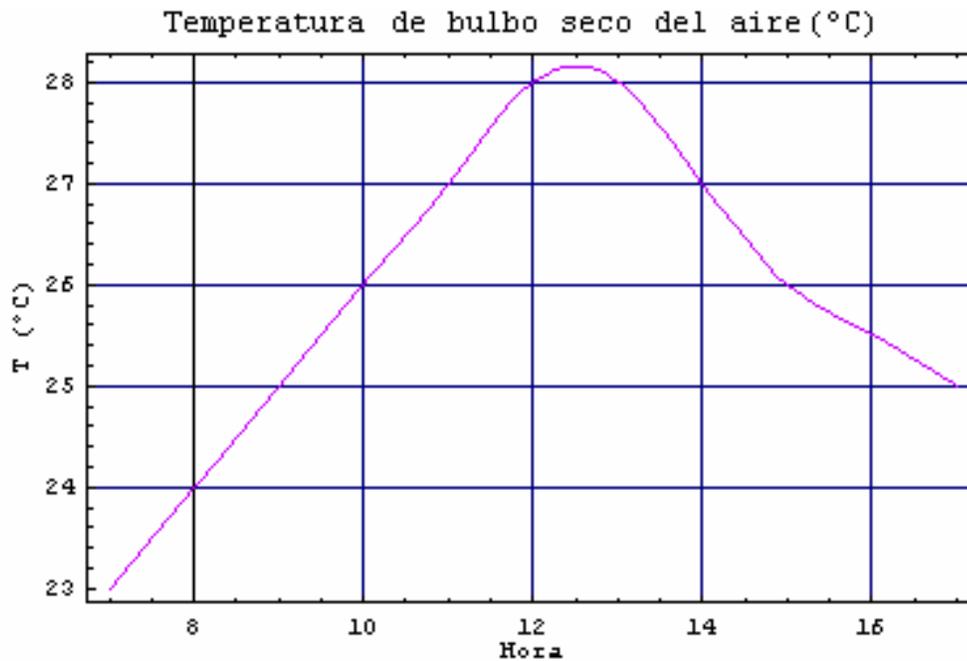


Figura 18

La inclinación del colector se estima según [10],[29] como $s = \pm 10^\circ$ se escogió $s = \phi$ para que el colector se mantuviese trabajando la mayor parte del año a valores elevados de eficiencia.

El coeficiente (h) entre el fluido y la pared del tubo del plato de absorción se asume $h=1000$ $\text{kJ}/(\text{m}^2\text{hK})$ para circulación natural.[29]

Asignación de una norma de consumo de agua caliente por persona.

Definido un consumo diario de 60 litros de agua caliente por persona a una temperatura de 45 °C.

El colector empleado es un colector solar de placa plana (CSPP) el cual tiene como función recibir la energía proveniente del sol, absorberla y transferirla a un fluido. Este tipo de colector se caracteriza por una geometría o estructura sencillas, por su larga duración y por un costo que es relativamente bajo, además trabaja con radiación directa y difusa.[40]

Los colectores solares planos pueden ser divididos en dos categorías básicas: los que utilizan como fluido de trabajo un líquido (agua) y los que utilizan un gas (aire).[41]

En el caso que nos ocupas se empleara la primera categoría (los que utilizan como fluido de trabajo un líquido (agua). **El cofre o caja**, esta construido con acero inoxidable, garantizando una gran estabilidad estructural en el tiempo, evitando el deterioro del mismo por efectos de atmósfera. Las características constructivas de este material lo hacen muy resistente a las variaciones térmicas y a los impactos de agentes externo ocasionales.

Además según [31] contamos con los siguientes datos:

Configuración del Calentador Solar Termocifónico		
Material de los tubos del colector		Cobre
Conductividad térmica del material	Kd (kJ/mhk)	0.1
Diámetros de los tubos (Exterior)	D (m)	0.015
Longitud de los tubos del colector	L(m)	2.0
Espaciado entre los tubos	W(m)	0.1

El material de la placa debe caracterizarse por tener una buena conductividad térmica

Placa absorbidora		
Material	Acero galvanizado	
Conductividad	171 kJ/(m h K)	
Absortividad	0.98	
Emisividad	0.98	
Espesor	d (m)	0.006
Dimensiones	L x A (m)	2 x 1

Por lo general esta placa absorbadora debe estar pintada para absorber la mayor parte de la radiación solar incidente.

Propiedades de la pintura de la placa absorbadora [42]		
Tipo	α	ε
Negra (Parson o similares)	0.98	.098

La elección del material de la cubierta se hizo teniendo en cuenta su influencia sobre el coeficiente de pérdidas totales UL (W/m^2K), que es la energía por unidad de tiempo y de área que se pierde debido a la diferencia de temperatura entre el colector y el medio ambiente, este depende de la conductividad térmica del aislante, de su espesor, del número y material de las cubiertas.[31]

Propiedades de la cubierta	
Material	vidrio corriente
Número de placas	2
Espesor de las placas (m)	0.004

El aislamiento térmico: Disminuye las pérdidas por radiación y convección.

Propiedades del aislante		
Tipo	Espesor (m)	Conductividad(kJ/mhk)
Fibra de Vidrio	0.025	0.144

A continuación se muestra el esquema del colector seleccionado para el cálculo así como los resultados del mismo.

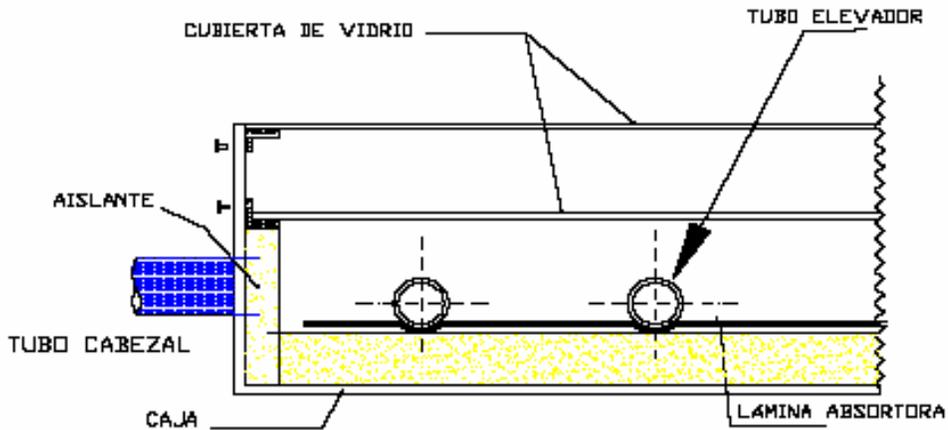


Fig.19: Esquema del colector.

Resultados:

Mediante la metodología propuesta en el capítulo II se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 3.1 en los que se muestran las variaciones horarias de H_t , S , U_L , Q_u/A_c , $(T_i - T_a)/H_t$ y η en función de la hora del día.

Hora		H_{total} ($\text{kJm}^{-2}\text{h}^{-1}$)	T_a °C	S (kJ/m^2)	U_L ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)	Q_u/A_c (kJ/m^2)	$(T_i - T_a)/H_t$ (m^2KW^{-1})	η Horaria
7	8	779.4	23	311.6	3.84	225.5	0.079	0.289
8	9	1240.2	24	827.6	4.81	714.4	0.046	0.576
9	10	1707.0	25	1276.2	4.83	1155.9	0.032	0.677
10	11	2109.7	26	1620.3	4.86	1497.6	0.024	0.710
11	12	2382.6	27	1842.3	4.88	1723.9	0.020	0.724
12	13	2479.2	28	1919.5	4.89	1813.3	0.017	0.731
13	14	2382.6	28	1842.3	4.90	1740.2	0.018	0.730
14	15	2109.7	27	1620.3	4.90	1513.4	0.022	0.717
15	16	1707.0	26	1276.2	4.89	1171.3	0.030	0.686
16	17	1240.2	25.5	827.6	4.86	738.1	0.042	0.595

A continuación se relacionan los resultados obtenidos para la radiación total diaria, la ganancia térmica y otros parámetros de interés en el diseño del colector. Los valores del producto Transisividad- absortividad, factor de eficiencia del colector y factor de remoción del calor del colector han sido calculados para condiciones medias.

Radiación Total =	18137.8	(kJ/m ²)
Qu/Ac Total =	12293.5	(kJ/m ²)
Coefficiente total de pérdida de Calor =	4.8	(Wm ⁻² K ⁻¹)
Eficiencia diaria =	67.8	%
Producto Tramitancia-Absorbancia =	0.75	
Factor de Eficiencia del colector =	0.95	
Factor de Remoción del calor del colector =	0.87	

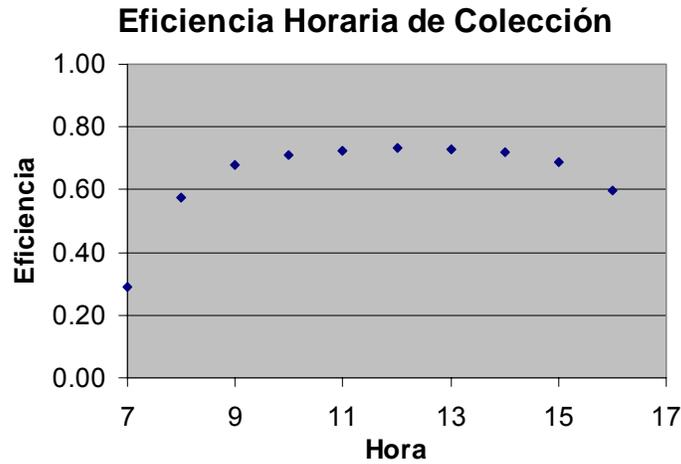


Figura 20- Eficiencia horaria del colector.

Eficiencia teórica del colector

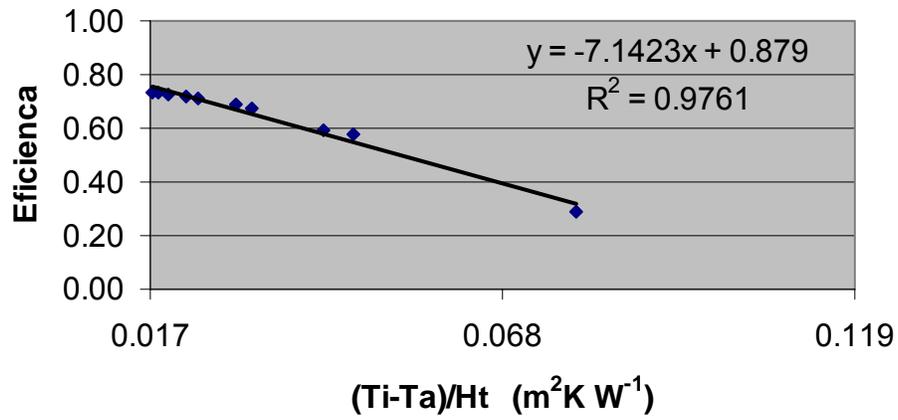


Figura 21- Eficiencia teórica del colector.

Cálculo del número de colectores (N_c)

$$N_c = \frac{\left(\frac{Q_u}{A_c}\right)_{Total}}{2 A_c H_T \eta_{dia}}$$

$$N_c = \frac{12293.5}{2 \cdot 18137.8 \cdot 0.678} = 7$$

Valoración económica

Inicialmente resulta más caro comprar un calentador solar que uno convencional de gas. Sin embargo el calentador solar utiliza la energía gratuita del sol mientras que el calentador convencional utiliza gas de origen fósil el cual tiene un costo considerable. Se estima que el período promedio de recuperación del dinero invertido en el calentador solar es de entre 1 y 3 años dependiendo del uso que se haga de él. A ello hemos de añadirle que el precio del gas está en constante aumento, lo que provoca que el tiempo de recuperación se reduzca cada vez más. El porcentaje de sustitución de gas por energía solar para calentar el agua se estima en torno al 80%.

Un equipo compacto de termosifón sencillo consta de uno o dos paneles de aproximadamente 2m^2 cada uno, y un depósito de 150 o 300 litros de capacidad. En cuanto al precio de estos equipos se estima entre 1000y 1500 euros para el termosifón de un colector de 2m^2 .

En instalaciones medianas y grandes (urbanización con servicio centralizado, hoteles residencias)el punto de diseño se puede fijar sobre la base del espacio disponible la optimización económica .Hay que tener en cuenta que dentro del costo total de la instalación solar se suele invertir un 30% en los colectores solares, otro 30% en depósitos, bombas, tuberías, y el 40% restante se destinaría a otros gastos al montaje y otros gastos indirectos

Para hallar la superficie de optimización desde el punto de vista económico en instalaciones medianas o grandes es necesario probar de forma iterativa diferentes casos. Se elige aquel que el costo anual de servicio de agua caliente sea menor.

CONCLUSIONES

- 1) La búsqueda bibliográfica realizada permite reconocer a las diversas tecnologías que utilizan la energía solar térmica como (entiéndase secadores solares, refrigeración solar, calentamiento solar de agua, acondicionamiento de aire) como alternativas prometedoras para lograr una independencia sobre el uso de los combustibles fósiles y así de esta manera disminuir la contaminación ambiental, por concepto de la reducción de las emisiones de CO₂ a la atmósfera.
- 2) El análisis comparativo de las tecnologías, aunque permite establecer un conjunto de consideraciones preliminares para la selección, diseño e implementación de tecnología que utilizan el calentamiento solar, debe ser complementado con la aplicación de leyes generales y particulares, así como de criterios económicos integrados en procedimientos más generales y completos.
- 3) La metodología de diseño de calentadores solares termosifónicos presentada en el trabajo posee un carácter general y detallado, en tanto es lo suficientemente comprensible como para su fácil implementación computacional en el ambiente del asistente matemático Matemática v5.1 y del MS Excel.
- 4) La metodología propuesta permite, además obtener las dependencias gráficas de la eficiencia horaria del colector y de esta respecto al parámetro de operación $(T_i - T_a) \cdot Ht^{-1}$, la cual puede ser comparada con la dependencia experimental que se obtendría del equipo construido una vez en operación.

RECOMENDACIONES

- 1) Realizar un análisis más profundo sobre la temática de diseño, con vistas a la incorporación de criterios termoeconómicos en la selección de parámetros geométricos y materiales.
- 2) Realizar un análisis comparativo con otras geometrías del colector.
- 3) Incorporar a la metodología los efectos de la capacitancia térmica del colector sobre la eficiencia del colector.

REFERENCIAS

1. Gordillo, F.A., *Tecnologías del régimen especial conectadas a la red eléctrica de suministros en entornos urbanos*. p. 4.
2. Autores, C.d.,, *ENERGIA SOLAR TÉRMICA*. consultado 2007
3. Autores, C.d., *ENERGIA SOLAR TÉRMICA*. 2000
4. Autores, C.d., *ENERGIA SOLAR TÉRMICA*. [Citado 10/03/2007, Disponible en: <http://html.rincondelvago.com/instalacion-de-energia-solar-termica.html>
5. Autores, C.d., *Energía solar térmica*. [Citado 12/03/2007, Disponible en: <http://www.sitiosolar.com/>.
6. Autores, C.d., *La energía solar* [Citado 13/03/2007, Disponible en: <http://ftp.fim.uclv.edu.cu/ftp/databases/Energy/Fluidodinamica>.
7. Autores, C.d., *Aire Acondicionado con Energía Solar*. 2007.
8. Autores, C.d., *CAPTACIÓN TÉRMICA DE LA ENERGÍA SOLAR*. 2006.
9. Autores., C.d., in *wikipedia*. 2007.
10. M.Castro Gil, A.C.S., *Energía Solar Térmica de Baja Temperatura*. 2004.
11. CENSOLAR, *La energía solar. Aplicaciones prácticas*. 1991.
12. Autores, C.d., *ENERGIA SOLAR TÉRMICA*. consultado2007.
13. CIEMAT., *Fundamentos dimensionados y aplicaciones de la energía solar fotovoltaica*. (1997).
14. Autores, C.d., *ENERGIA SOLAR TERMICA*
15. Sevilla, A., *Diseños Solares Pasivos*. . 2007.

16. Autores, C.d., *Venta e instalación de equipos de energía solar y energía eólica en Alicante, España.* [Citado 10/03/2007, Disponible en: <http://www.energy-spain.com/> -.
17. Autores, C.d., *ENERGIA SOLAR TÉRMICA*. 2007: p. 90.
18. Autores, C.d., *SISTEMAS FVs MIXTOS E HIBRIDOS*.
19. R. Z. WANG , M.L., Y. X. XU and J. Y. WU, *AN ENERGY EFFICIENT HYBRID SYSTEM OF SOLAR POWERED WATER HEATER AND ADSORPTION ICE MAKER*. 1999.
20. R. Corkish, R.L., R. Largent , C.B. Honsberg , N. Shaw , R. Constable , P. Dagger., *MONTAGUE ISLAND PHOTOVOLTAIC/DIESEL HYBRID SYSTEM*. 2007.
21. Khan, M.A., *Process Analysis, Modeling and Simulation of Solar Thermal Hydrogen Generation*. 2002.
22. Autores., c.d., *Secadores solares de baja temperatura*. 2007.
23. PETERSEN, *Secarores Solares* 1986.
24. Autores, C.d., *Guía práctica para el comprador de calentadores solares*. 2007.
25. PLUTA, Z., *Analysis of thermosphonics*. 1988. **Vol.19** p. 1-2, 33-44.
26. IDAE, ed. *Guía de las energías renovables en España*. Edición especial Cinco Días ed. (1996). Madrid
27. Ing. Jesús M. Iglesias Ferrer, I.Y.A.M., Dr. Ing. Guillermo Quesada, *Instalación Solar Térmica, Hotel "Puesta de Sol". Análisis de Factibilidad Energética.*, in *Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables, CETER- CUJAE*. 2007, CUJAE. : C. Habana.
28. IDAE, *Manual de energía solar térmica*. Vol. Vol. 5. (1996).
29. BECKMAN, J.D.a.W., *Solar energy thermal process*. 1974.
30. Wiley, L., *Solar Thermal Engeneering*

31. C. Plazas, N.M., C. Sánchez, *DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA CON PARAMETROS DE RENDIMIENTO MODIFICABLES.*, in *REVISTA COLOMBIANA DE FISICA*,. 2001.
32. Cooper, P.I., *Solar Energy*, in "The Absorption of Solar Radiation in Solar Stills." 1969.
33. Eibling, J.A., R.E.Thomas, and B. A. Landry,, *report to the Office of Saline Water, U.S. Department of the Interior in An Investigation of Multiple-Effect Evaporation of Saline Water by Steam from Solar Radiation.*"1953.
34. Coulson, K.L., R. E. Thomas, and *Terrestrial Radiation*, Academic Press. (1975). New York.
35. Frohlich, C., *paper in The Solar Output and its Variation*, , in "Contemporary Measures of the Solar Constant." C.A.U. Press, Editor. (1977).
36. Hand, I.F., *Heating and Ventilating*, in "Chart to Obtain Solar Altitudes and Azimuths." (October 1948). . p. 45, 86
37. Hottel, H.C.a.B.B.W., *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, , in "Perforance of Flat-Plate Solar Heat Collector " (1942). p. 64, 91.
38. S.A., F., *Solar Energy Calculations of Monthly Average insolations Tilted Surfases*"(1977): p. 19.325
39. A.Marrero, G., "*Sicrometría del aire exterior cubano*".
40. Manrique, J., *Energía solar fundamentos y aplicaciones fototermicas*. 1984.
41. Autores, C.d., *COLECTORES SOLARES PLANOS*. 2007.
42. Encoperha, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. **2**: p. p.761-782.
43. CLOSE D. J.:The performance of solar water heater with natural circulation,Solar Energy 6(1962),33-38

- 44 GUPTA C. L., GARG H. P.: Sistem design in solar water heater with natural circulation, Solar Energy 12 (1968),163-182
- 45 ONG K S.: A finite -diference method to evaluative the thermal performance solar water heater,Solar Energy 16 (1964),137-147
- 46 HUANG B.J.: Similariti theory of solar water heater with natural circulation,Solar Energy,25(1979),105-116.
- 47 MERTOL A. ,Place W., Detailer loop model (DLM) analysis of liquid solar thermosyphon with heat exchanger , Solar Energy 27 (1981),367-386.
- 48 Ee-TONG PAK :Thermally stratified hot water storange, Solar World Congress-Proc . of the Biennial Congressof the international Solar Energy Society ,Denver, Colorado,USA,19-23,Augt1991,1417-1423
- 49 YOUNG M. F. :The performance of a thermosyphon Solar Domestic hot water sistem with hot water removal, Solar Energy 32,(1984),655-638.
- 50 PLUTA Z. :Investigations of the models of solar thermosyphonic installation for preparation of utility hot water under laboratory conditions ,Proc of the XI Symposium on Heat and Mass Transfer , (1995),183-191.

BIBLIOGRAFIA

1. Autores, C.d *ENERGIA SOLAR TÉRMICA*.
2. Autores, C.d, *ENERGIA SOLAR TÉRMICA*. 2000
3. Autores, C.d *ENERGIA SOLAR TÉRMICA*. [Citado 10/03/2007 Visible en: <http://html.rincondelvago.com/instalacion-de-energia-solar-termica.html>
4. .autores, C.d *Energía Solar Térmica*. [Citado 12/03/2007 visible en: <http://www.sitiosolar.com/>.
5. Autores, C.d. *La Energía solar* [Citado 15/03/2007 visible en: <http://ftp.fim.uclv.edu.cu/ftp/databases/Energy/Fluidodinamica>.
6. Autores, C.d., *Aire Acondicionado con Energía Solar*. 2007.
7. Autores, C.d *CAPTACIÓN TÉRMICA DE LA ENERGÍA SOLAR*. 2006.
8. Autores, C.d., in *wikipedia*. 2007.
9. Autores, C.d *ENERGIA SOLAR TÉRMICA*. consultado2007.
10. autores, C.d., *ENERGIA SOLAR TERMICA*
11. Autores, C.d *Venta e instalación de equipos de energía solar y energía eólica en Alicante, España*. 2007 [cited; Available from: <http://www.energy-spain.com/> -.
12. Autores, C.d *ENERGIA SOLAR TÉRMICA*. 2007: p. 90.
13. .autores, C.d., *SISTEMAS FVs MIXTOS E HIBRIDOS*.
14. Autores, C.d., *Guía práctica para el comprador de calentadores solares*. 2007.
15. Autores, C.d., *COLECTORES SOLARES PLANOS*. 2007.
16. A. Marrero, G., "Sicrometría del aire exterior cubano."

17. Anderson, L.B., H.C. Hottel, and A. Whillier, *Solar Energy Research*, 47, University of Wisconsin Press, Madison (1955). "Solar Heating Design Problems."
18. BECKMAN, J.D.a.W., *Solar energy thermal process*. 1974.
19. **Brooks**, F. A. and W, paper in *Introduction to the Utilization of Solar Energy*, A. M. Zarem and D. D. Erway, Eds., New York, McGraw-Hill (1963). "Availability of Solar Energy."
20. Bugler.J.W. *Solar energy*, 21, 477 (1977)The determination of Hourly Insolationon an Insider plane use a Diffuse Irradiance Model based on hourly Measure Global Horizontal Insolation.
21. **CENSOLAR**, *La Energía solar. Aplicaciones prácticas*. 1991.
22. .CIEMAT. , *Fundamentos dimensionados y aplicaciones de la energía solar fotovoltaica*. (1997).
23. C. Plazas, N.M., C. Sánchez, *DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA CON PARAMETROS DE RENDIMIENTO MODIFICABLES.*, in *REVISTA COLOMBIANA DE FISICA.*, 2001.
24. Cooper, P.I., *Solar Energy*, in "The Absorption of Solar Radiation in Solar Stills." 1969.
25. Coulson, K.L., R. E. Thomas, and *Terrestrial Radiation*, Academic Press. (1975). New York.
26. Cooper, P. I., *Solar Energy*, 12, 3(1969). "The Absorption of Solar Radiation in Solar Stills."
27. Coulson, K. L., R. E. Thomas, and *Terrestrial Radiation*, Academic Press, New York (1975).

28. Closse D.J. *Solar Energy* 11, 112 (1967) "A design Approach for Solar Processes
29. Encoperha, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 2: p. p.761-782.
30. -Eibling, J.A., R.E. Thomas, and B. A. Landry, report to the Office of Saline Water, U.S. Department of the Interior (1953). "An Investigation of Multiple-Effect Evaporation of Saline Water by Steam from Solar Radiation."
31. Eibling, J.A., R.E. Thomas, and B. A. Landry,, *report to the Office of Saline Water, U.S. Department of the Interior in An Investigation of Multiple-Effect Evaporation of Saline Water by Steam from Solar Radiation.*"1953.
32. Flein S.A., *Solar Energy* 19.325 (1977) "Calculations of Monthly Average insulations Tilted Surfaces.
33. Frohlich, C., *paper in The Solar Output and its Variation*, in "*Contemporary Measures of the Solar Constant.*" C.A.U. Press, Editor. (1977).
34. Frohlich, C., *paper in The Solar Output and its Variation*, O. R. White (ed.) Colorado Associated University Press, Boulder (1977). "Contemporary Measures of the Solar Constant.
35. Garg, H.P., *Solar Energy*, 15, 299 (1974). "Effect of Dirt on Transparent Covers in Flat-Plate Solar Energy Collectors."
36. Gordillo, F.A., *Tecnologías del régimen especial conectadas a la red eléctrica de suministros en entornos urbanos*. p. 4.
37. Hand, I. F., *Heating and Ventilating*, 45, 86 (October 1948). "Chart to Obtain Solar Altitudes and Azimuths."
38. Hand, I.F., *Heating and Ventilating*, in "*Chart to Obtain Solar Altitudes and Azimuths.*" (October 1948). . p. 45, 86
39. Heywood, H. *Solar Energy* 10, 51 (1966)"The Computations of Solar Radiations Insities."

40. Hill, J.E and E.R. Streed, paper in *Applications of Solar Energy for Heating and Cooling of Buildings*, Jordan and Liu, Eds., ASHRAE GRP 170 (1977). "Testing and Rating of Solar Collectors."
41. Hooper, F. C. and C. R. Attwater, paper in *Heat Transfer in Solar Energy Systems*, American Society of Mechanical Engineers, New York (1977). "A design Method for Heat Loss Calculation for In-Ground Heat Storage Tanks."
42. Hottel, H. C. and B.B. Woertz, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 64, 91 (1942). "Perforance of Flat-Plate Solar-Heat Collectors."
43. IDAE, *Manual de energía solar térmica*. Vol. Vol. 5. (1996).
44. IDAE, ED. *Guía de las energías renovables en España*. Edición especial Cinco Días ED. (1996). Madrid
45. Ing. Jesús M. Iglesias Ferrer, I.Y. A.M., Dr. Ing. Guillermo Quesada, *Instalación Solar Térmica, Hotel "Puesta de Sol". Análisis de Factibilidad Energética.*, in *Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables, CETER- CUJAE*. 2007, CUJAE. : C. Habana.
46. Johnson F.S. *Journal of meteorology* .11, 431.(1954) "The Solar Constant".
47. Khan, M.A., *Process Analysis, Modeling and Simulation of Solar Thermal Hydrogen Generation*. 2002.
48. Klein, S.A., *Solar Energy*, 23, 547(1979). "Calculations of the Monthly- Average Transmittance-Absorptance Product."
49. Klein, S.A., *Solar Energy*, 17, 79 (1975). "Calculation of Flat-Plate Loss Coefficients."
50. Liu, B. Y. H. and R.R., Jordan in *Aplications of Solar Energy for heating and Cooling of Buildings*. New York (1977) Amiability of solar Energy for Flat-Plate heat collectors.

51. Manrique, J., *Energía solar fundamentos y aplicaciones fototérmicas*. 1984.
52. M. Castro Gil, A.C.S., *Energía Solar Térmica de Baja Temperatura*. 2004.
53. PETERSEN, *Secarores Solares* 1986.
54. Pettit, R.B., and R. P. Sowell. *Journal of vacuum Science and technology*, 13 (1976) "Solar Absorptance and Emetine Properties."
55. .PLUTA, Z., *Analysis of thermosphonics*. 1988. **Vol.19** p. 1-2, 33-44
56. R. Z. WANG, M.L., Y. X. XU and J. Y. WU, *AN ENERGY EFFICIENT HYBRID SYSTEM OF SOLAR POWERED WATER HEATER AND ADSORPTION ICE MAKER*. 1999.
57. R. Corkish, R.L., R. Largent , C.B. Honsberg , N. Shaw , R. Constable , P. Dagger., *MONTAGUE ISLAND PHOTOVOLTAIC/DIESEL HYBRID SYSTEM*. 2007.15. Sevilla, A., *Diseños Solares Pasivos*. . 2007.
58. S.A., F., *Solar Energy Calculations of Monthly Average insulations Tilted Surfaces* (1977): p.19.325. , J.F.S., *Journal of meteorology*. "The Solar Constant", (1954) : p. 11, 431.
59. Selcuk, K., *Solar Energy*, 13, 165 (1971). "Thermal and Economic Analysis of the Overlapped-Glass Plate Solar-Air Heaters."
60. Tabor, H., *Bulletin of the research council of Israel* 5 A, (2) ,119 (Jan 1956). "Selective radiation."
61. Tabor, H., *Bulletin of the Research Council of Israel*, 6C, 155(1958). "Radiation, Convection, and Conduction Coefficients in Solar Collectors."
62. Tabor, H, *Low Temperature Engineering aplicaciones of Solar Energy*, ASHRAE, New York (1967) "Selective surfaces for Solar Collectors "

63. Tabor, H., paper in *Applications of Solar Energy for Heating and Cooling of Buildings*, ASHRAE GRP-170, New Cork (1977). "Selective Surfaces for Solar Collectors".
64. Thekaekara, M. P. *Supplement to the proceeding of the 20th Annual Meeting of institute for Environmental Science.21, (1974)*"Data on Incident Solar Energy."
65. University of Minnesota and Honeywell Corp. Progress Report No. 2 to the National Science Foundation, NSF/RANN/SE/GI-34871/PR/73/2 (1973). "Research Applied to Solar-Thermal Power Systems."
66. Whillier A., ScD. Thesis, MIT, (1953), "Solar Energy Collection and its Utilizations for House Heating."
67. Whillier A., *Solar Energy*, 7, 148 (1963). "Plastic Covers for Solar Collectors."
68. Whillier A., *Solar Energy* 9, 169 (1979) "Solar Radiations Grapes"
69. Wiley, L., *Solar Thermal Engineering*.
70. Wijesundera, N.E., *Solar Energy*, 21, 517 (1978). "Comparison of Transient Heat Transfer Models for Flat Plate Collectors."
71. Yelloutt J., I., in *Applications of Solar Energy for Heating and Cooling of Buildings*, ASHARE, New Cork (1977)"Solar Radiations Measurement."
72. Hollands, K. G. T., *Solar Energy*, 13, 149 (1971). "A Concentrator for Thin-Film Solar Cells."