

**MODIFICACION, EVALUACION Y ANALISIS DE EFICIENCIA DEL
COLECTOR SOLAR DE TUBOS AL VACIO COMERCIAL**

JUAN GUILLERMO PINEDA MEDINA

**UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGIA
ESCUELA DE TECNOLOGIA MECANICA
PEREIRA
2014**

**MODIFICACION, EVALUACION Y ANALISIS DE EFICIENCIA DEL
COLECTOR SOLAR DE TUBOS AL VACIO COMERCIAL**

JUAN GUILLERMO PINEDA MEDINA

**Trabajo de grado presentado para optar al título de
Tecnólogo Mecánico**

**Dirigido por:
PH.D Edgar Salazar**

**UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGIA
ESCUELA DE TECNOLOGIA MECANICA
PEREIRA
2014**

Pereira, Agosto de 2014

Nota de aceptación

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de grado, el cual he culminado con mucho esfuerzo, cariño y dedicación a mi madre Gabriela Medina quien durante todo este tiempo me ha brindado su apoyo y ha sabido ejercer su rol de madre de la mejor manera.

A ella debo lo que soy, se con certeza que no hay amor que se compare al de una madre y que por más errores, tropiezos y momentos difíciles que pueda tener a lo largo de mi vida, ese amor siempre permanecerá intacto; es por eso que deseo dedicar a ella cada triunfo de mi vida, producto de la educación, valores y principios que me ha inculcado.

AGRADECIMIENTOS

Hoy, sé que este trabajo no se hubiese podido llevar cabo sin el apoyo de muchas personas que me acompañaron a lo largo de esta etapa, a quienes agradezco profundamente por haber estado presentes.

Le agradezco a la Universidad y especialmente al profesor Edgar Salazar por manifestarme su interés en dirigir mi trabajo de grado, por su confianza, colaboración y constante apoyo.

Por último a mi familia y seres más queridos, en especial a mi Madre, quien a pesar de que se encuentra lejos, me brinda siempre su amor y apoyo incondicional.

CONTENIDO

CONTENIDO	6
INTRODUCCIÓN	8
1. RADIACIÓN SOLAR.....	10
1.1. Componentes de la radiación solar	11
1.2. Radiación solar en Colombia	13
2. CONCEPTO DE CALENTADOR SOLAR	16
2.1. Principio de funcionamiento	16
2.2. Definición de un calentador solar	17
2.3. Aplicación del calentador solar.....	19
2.4. Clasificación de los diferentes tipos de colectores solares.....	19
2.5. Componentes del calentador solar de tubos de vacío con flujo directo	26
2.6. Principio de funcionamiento del calentador solar con tubos de vacío	27
2.7. Influencia de la inclinación de una superficie con respecto a la radiación	28
3. MODIFICACION DEL CALENTADOR SOLAR.....	36
3.1. Montaje inicial del calentador solar	36
3.2. Montaje final del calentador solar.....	37
4. EVALUACION DE EFICIENCIAS Y ANALISIS DE RESULTADOS.....	41
4.1. Descripción del montaje de los instrumentos de medición.....	42
4.2. Variables para la prueba	43
4.3. Análisis de Datos.....	45
5. COSTOS.....	49
6. CONCLUSIONES	52
7. RECOMENDACIONES.....	53
8. BIBLIOGRAFIA.....	55

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de recursos energéticos disponibles	10
Figura 2. Espectro electromagnético de la radiación solar extra-atmosférica y en la superficie terrestre.	11
Figura 3. Flujo de energía solar en un colector solar.	13
Figura 4. Mapa de radiación solar en Colombia.	14
Figura 5. Registro de radiación solar Anual promedio.	15
Figura 6. Diferentes mecanismos de transferencia de calor.	16
Figura 7. Transmisión de calor en un panel solar	17
Figura 8. Partes principales del colector solar.	18
Figura 9. Captador solar parabólico.	20
Figura 10. Central solar térmica.	21
Figura 11. Diagrama óptico y térmico de sistema de generación eléctrica termosolar con reflector parabólico y motor Stirling	22
Figura 12. Calentador solar de tubos a vacío con resistencia eléctrica.	23
Figura 13. Captador solar de flujo indirecto.	24
Figura 14. Colector solar placa plana.	24
Figura 15. Sistema de climatización de piscina por medio de captador solar. .	25
Figura 16. Tubo colector	26
Figura 17. Instalación de colector solar y tuberías para un sistema doméstico	27
Figura 18. Esquema de colector solar de tubos	28
Figura 19. Movimiento de traslación de la tierra.	29
Figura 20. Elevación y azimut.	30
Figura 21. Movimiento solar	30
Figura 22. Posición de la tierra respecto al sol en el solsticio de invierno.	31
Figura 23. Carta solar.	32
Figura 24. Orientación panel solar.	34
Figura 25. Inclinación del colector.	34
Figura 26. Orientación de una superficie en el hemisferio norte.	35
Figura 27. Estructura original del calentador solar.	36
Figura 28. Colector solar en techo	38
Figura 29. Diagrama de distribución de cargas, cargas, y momentos de la viga.	38
Figura 30. Perfil rectangular de la viga de apoyo.	39
Figura 31. Montaje final del calentador solar (vista trasera).	40
Figura 32. Piranometro	41
Figura 33. Multímetro digital.	41
Figura 34. Termocupla	42
Figura 35. Esquema de una termocupla tipo J.	42

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1. Mediciones Pereira (Enero-2013)	15
Tabla 2. Inclinaciones recomendadas.....	35
Tabla 3. Referencia del calentador solar	44
Tabla 4. Medición de radiación solar y temperaturas del colector a 53° de inclinación (Montaje inicial).....	45
Tabla 5. Datos del colector inclinado 10° (Montaje modificado, sobre techo) ...	47
Tabla 6. Costos mano de obra.....	49
Tabla 7. Costos de insumos.....	50
Tabla 8. Costo de materiales	50
Tabla 9. Costos adicionales.....	51
Tabla 10. Costo total.....	51
Tabla 11. instructivo general para el mantenimiento del calentador solar.	53

INTRODUCCIÓN

En la sociedad moderna la demanda de energía aumenta a medida que la población y el consumo per cápita crecen, al punto que los recursos energéticos tales como el petróleo y sus derivados han disminuido en forma exponencial y por ende el elevado consumo de estos ocasiona la liberación de gases tóxicos a la atmosfera, causando daños irreparables; muestra de ello es el incremento de la temperatura terrestre, lo cual crea un efecto invernadero en la superficie de la tierra, haciendo que las zonas frías (polos norte y sur) se empiecen a calentar derritiendo los glaciales y provocando que el nivel del mar aumente. Cada año se aprecia como este tipo de fenómenos naturales se intensifican afectando poblaciones, desapareciendo especies animales y vegetales a causa del daño en los ecosistemas, haciendo que el planeta se convierta cada vez menos habitable para los humanos.

Comúnmente a las energías que provienen de recursos renovables se les denomina energías alternativas tales como la eólica la cual proviene de las corrientes de aire y es convertida en otras formas útiles de energía para actividades humanas, este es un recurso renovable, limpio y ayuda a disminuir las emisiones de gases del efecto invernadero; entre otros recursos renovables se encuentra el uso de biomasa, el movimiento ondulante de las mareas y la energía del sol; esta última está jugando un papel importante como la fuente de energía más potente con la cual cuenta la humanidad debido a que la energía solar que llega a la tierra durante un año puede suplir 6.720 veces más la necesidad energética del mundo en el mismo transcurso de tiempo.

Colombia es un país privilegiado con relación a la disponibilidad de este recurso, debido a su ubicación geográfica, la cual le permite recibir una buena descarga de radiación solar gran parte del día, todos los días del año. Sin embargo no es un país que se caracterice por ser creador de nuevas tecnologías que sean amigables con el medio ambiente, es un país importador de tecnologías producidas en países desarrollados e industrializados que en ocasiones no cumplen con las especificaciones de diseño requeridas para obtener un desempeño óptimo en otro país.

Este proyecto plantea una serie de adecuaciones sobre un colector de energía solar comercial de tubos al vacío, para que se logre aprovechar al máximo dicha energía y tenga un mayor rendimiento en varias zonas del país. De igual manera se pretende realizar un análisis del colector existente y de esta forma

la información recolectada pueda servir de base a quien esté interesado en mejorar o producir otros colectores.

Objetivo General

Modificar y adecuar un colector para que aproveche al máximo la energía solar, y funcione de manera correcta en el país, fomentando el uso de la energía renovable como forma de optimizar la calidad de vida de la población, disminuyendo en gastos y protegiendo el medio ambiente.

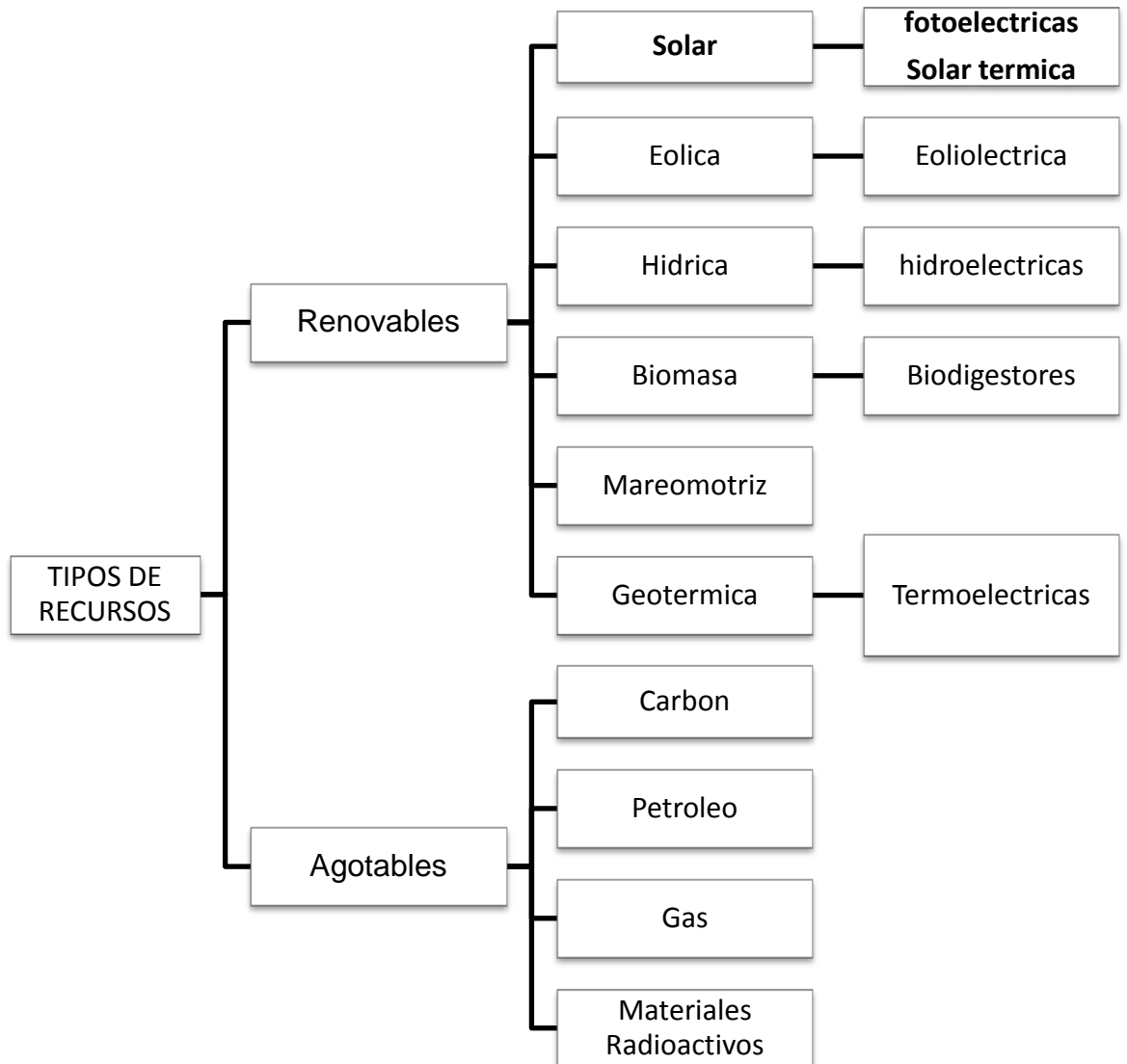
Objetivos específicos

- Definir el fundamento científico de la técnica que se utiliza para calentar el agua mediante un colector solar (Estado del arte en Colectores solares).
- Determinar los niveles de radiación promedio disponible para la zona cafetera.
- Analizar la temperatura promedio alcanzada por el tanque principal del colector.
- Establecer el ángulo adecuado de exposición.
- Optimizar el funcionamiento del colector solar modificando parámetros básicos de funcionamiento (posición, y pérdidas de calor).
- Realizar las mediciones necesarias para validar la variación de la eficiencia.

1. RADIACIÓN SOLAR

El amplio grupo de sustancias que conforman el conjunto de los recursos energéticos puede ser agrupado en dos categorías generales en función de su proceso de formación y de su disponibilidad. Ver **Figura 1**.

Figura 1. Diagrama de recursos energéticos disponibles



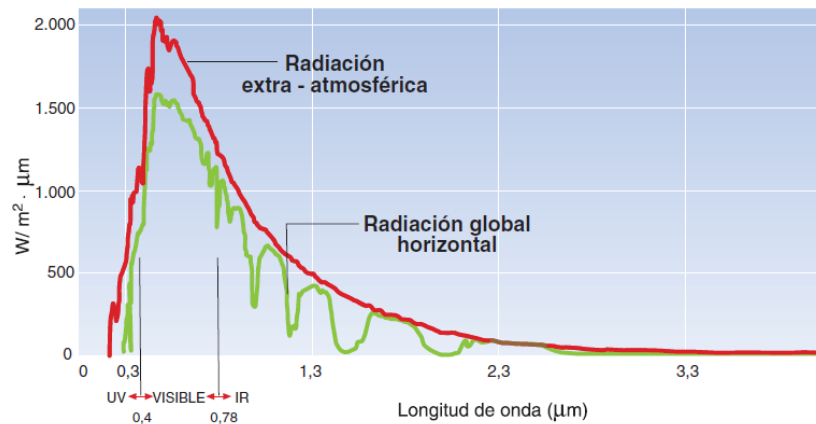
Fuente: Energía solar. Roldan, Cesar A. Isaza. 2009.

La radiación solar es un tipo de energía que se propaga a través del espacio, a la velocidad de la luz y en forma de ondas electromagnéticas; dicha radiación se distribuye sobre un rango de longitudes de onda a la que se le reconoce como espectro de radiación electromagnética. Dentro del espectro, la radiación

solar que llega a la superficie de la tierra está ubicada en el rango de longitud de onda comprendido entre 0,29 y 3,0 μm (**Figura 2**). [1]

La captación directa de la radiación solar se puede aprovechar para producir calor (solar térmica) o para producir electricidad (solar fotovoltaica).

Figura 2. Espectro electromagnético de la radiación solar extra-atmosférica y en la superficie terrestre.



Fuente: Guía práctica de energía solar térmica. Energía, AVEN (Agencia valenciana de la Valencia (España))

La parte del espectro que va de 0,40 μm a 0,78 μm forma el espectro visible que denominamos comúnmente luz. El resto del espectro, que no es visible, lo forman las radiaciones con longitudes de onda inferiores a 0,4 μm , denominadas radiaciones ultravioletas (UV) y con longitudes superiores a 0,75 μm denominadas radiaciones infrarrojas (IR). Ver **Figura 2**.

1.1. Componentes de la radiación solar

No toda la radiación solar que incide sobre la atmósfera llega hasta la superficie del planeta tierra; Los rayos solares al entrar en contacto y atravesar el obstáculo que supone la atmósfera, sufren una serie de fenómenos físicos entre los que se destacan los siguientes

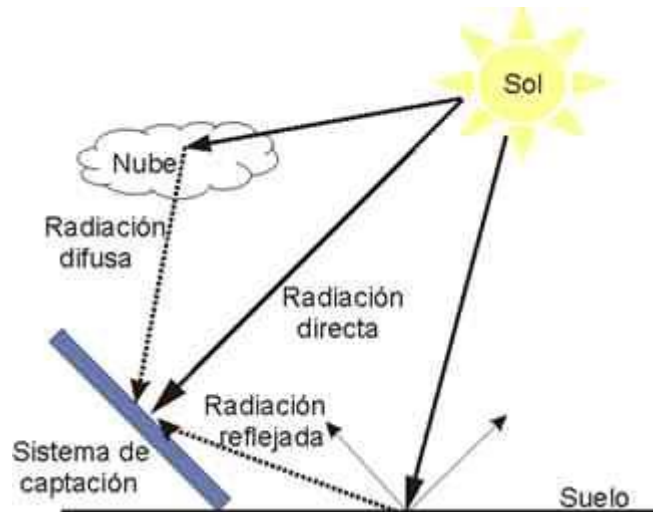
- I. **Reflexión.** Una parte de la radiación se refleja en la parte superior de las nubes (como en un espejo).

- II. **Difusión.** Los rayos solares chocan con las moléculas gaseosas y partículas de polvo difundiéndose en todas direcciones, de forma que una parte vuelve al espacio.
- III. **Absorción.** Una parte de la radiación es absorbida por las moléculas presentes en la atmósfera. Por ejemplo, a unos 25 km de altura el ozono predomina sobre otras moléculas absorbiendo principalmente las radiaciones de entre 0,2 a 0,32 μm que se corresponde con los rayos ultravioletas.

Debido a los anteriores fenómenos físicos, un objeto situado en la superficie terrestre recibirá los siguientes tipos de radiación (ver **Figura 3**):

- a) **Radiación directa.** Aquellos rayos que alcanzan la superficie terrestre sin ser desviados. Esta radiación en días nublados es muy pequeña y provoca sombras.
- b) **Radiación Difusa.** La que llega a la superficie terrestre después de haber cambiado varias veces de dirección al atravesar la atmósfera. A mayor nubosidad más importante es la radiación difusa.
- c) **Radiación Reflejada.** . La parte de radiación reflejada por el terreno y otros elementos de la superficie terrestre y que puede ser reabsorbida por otros objetos. Al cociente entre la radiación reflejada y la incidente en la superficie terrestre se le llama albedo. A la suma de los tres tipos de radiación recibida se le llama radiación total. En días despejados la radiación directa será mucho mayor que la difusa, la radiación difusa puede llegar en un porcentaje de un 10% a 15% en días claros y hasta un 95% en días nublados. A lo largo del año la radiación difusa supone aproximadamente un tercio de la radiación total que llega la superficie terrestre.[1]

Figura 3. Flujo de energía solar en un colector solar.



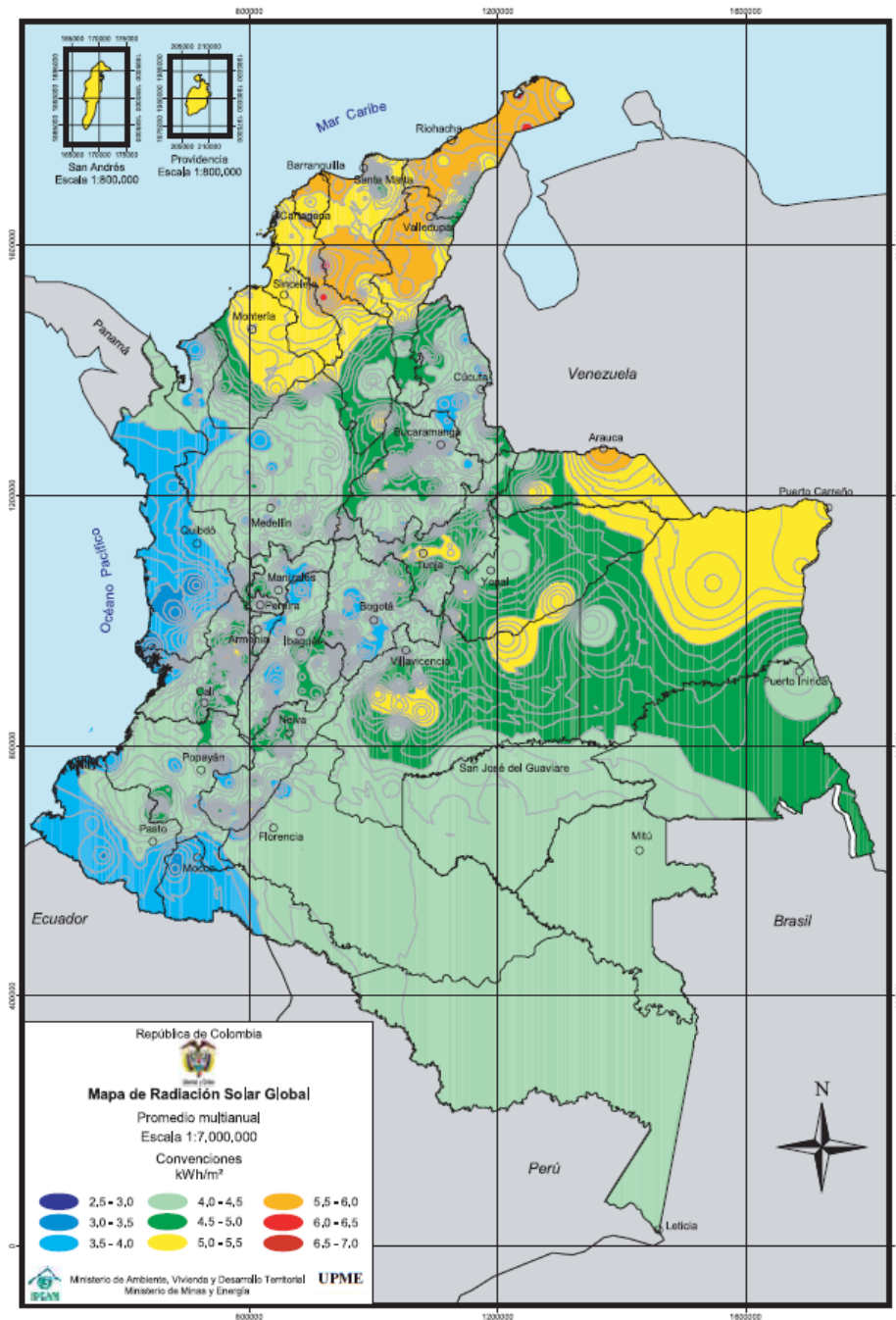
Fuente: J.C. González. Tesis de postgrado, Dpto. de Física. U. Nal. "Análisis de cubiertas transparentes y de superficies selectivas para colectores solares". 1981.

1.2. Radiación solar en Colombia

El mapa de brillo solar para Colombia presenta un promedio anual de 2600 horas (muestras tomadas de la Estación Nasaret, Guajira), dando aproximadamente un promedio diario anual de 7,1 horas. Los valores de radiación solar oscilan entre 5 y 6 kWh/m² día en el Norte del País y entre 3.5 y 5 kWh/m² en el resto del país.

La **Figura 4** muestra un panorama global de la radiación solar en Colombia, en donde las regiones del norte y oriente presentan altos niveles de radiación solar, al occidente, en la costa pacífica a pesar de ser una zona que se encuentra por debajo del nivel de mar, presenta una baja radiación solar.

Figura 4. Mapa de radiación solar en Colombia.



Fuente: Unidad de planeación minero energética. (UPME)

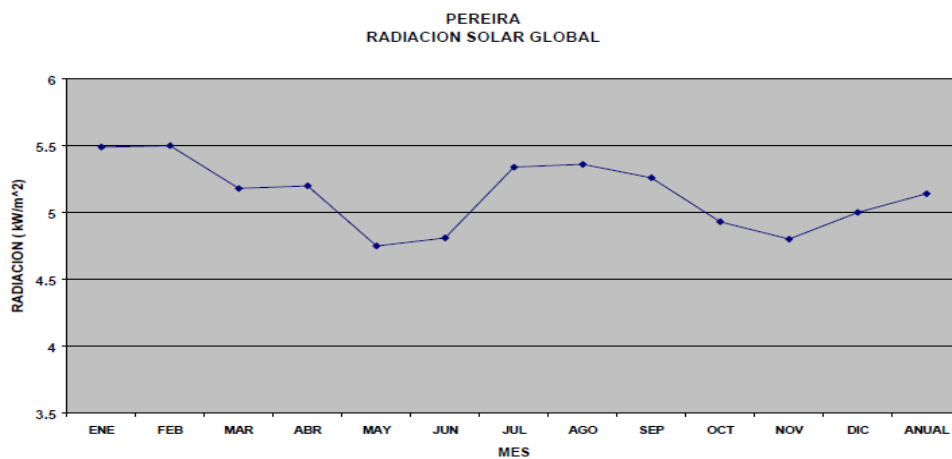
En la **Tabla 1** muestra que durante el mes de enero del 2013, periodo que normalmente es caluroso, se llegó a un máximo de temperatura y radiación solar de 28°C y 817w/m². La radiación varía dependiendo de la época del año, como se observa en la Figura 5, que muestra la variación de la radiación solar en el municipio de Pereira donde se realizó el estudio se puede observar que la radiación máxima se produce durante el mes de enero y parte de febrero con un promedio anual de 5,2 kwh/m².

Tabla 1. Mediciones Pereira (Enero-2013)

TEMPERATURAS EN EL MES DE ENERO EN PEREIRA				
ENERO DÍA	TEMPERATURA (°C)		RADIACIÓN SOLAR (W/M2)	
	MÁX.	MÍN.	MÁX.	MEDIA
1	27.33	17.94	731.00	393.02
2	-	-	-	-
3	28.06	20.28	768.00	345.75
4	29.06	19.56	877.00	281.56
5	28.28	18.56	693.00	322.09
6	27.89	19.28	817.00	239.07
7	26.83	18.06	626.00	258.51
8	29.67	17.67	638.00	340.51
9	28.28	17.61	633.00	294.32

Fuente: <http://www.eldiario.com.co/seccion/LOCAL/sube-la-temperatura-en-pereira130110.html>

Figura 5. Registro de radiación solar Anual promedio.



Fuente: [http://solutechnia.com.co/recursos radiación 20solar/20principales 20ciudades 20Colombia.pdf](http://solutechnia.com.co/recursos%20radiacion%20solar/20principales%20ciudades%20Colombia.pdf)

2. CONCEPTO DE CALENTADOR SOLAR

2.1. Principio de funcionamiento

La energía solar térmica aprovecha la componente directa y difusa de la radiación total (ver **Figura 3**). La conversión de energía radiante en calor, se realiza por los mecanismos de conducción, convección y radiación.

Figura 6. Diferentes mecanismos de transferencia de calor.



Fuente: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:todos_de_transferencia_de_calor.svg

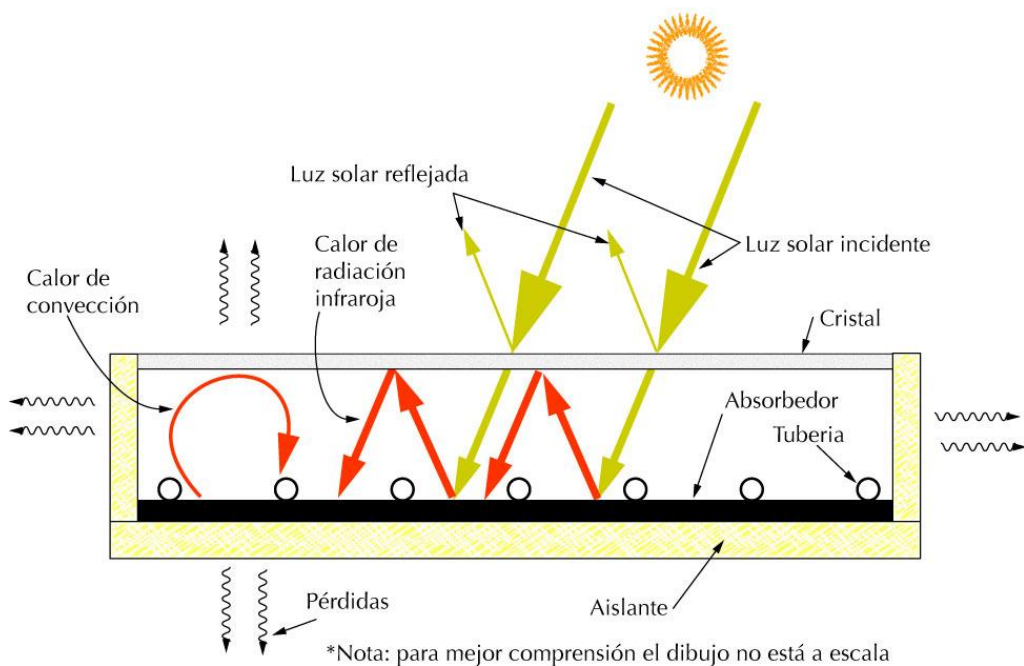
El calor se puede transferir en tres modos diferentes: conducción, convección, y radiación. Hay que tener en cuenta que para que haya transferencia de calor de un medio a otro es necesario que uno de estos esté a mayor temperatura que el otro, ya que esto sucede de un medio con la temperatura más alta hacia uno con la temperatura menor.

Por ejemplo la transferencia de calor por conducción se produce desde una región que está a una temperatura alta hasta otra que está a una temperatura inferior en el mismo medio o entre diferentes medios que se encuentran en contacto. Si la transferencia de calor se produce por el desplazamiento de materia entre regiones con diferentes temperaturas, entonces se trata de

convección. La convección se produce únicamente en materiales fluidos (líquido como el agua o gas como el aire). Al hablar de radiación, hacemos referencia al flujo de calor entre dos cuerpos que están a distinta temperatura, sin que en este caso se requiera ningún medio material. Ver Figura 6.

La radiación solar que llega a un colector lo hace sobre la cubierta transparente. Una parte será reflejada, volviendo al exterior y otra penetra la superficie, y de esta que se transmite, la cubierta absorberá una parte (ver **Figura 7**).

Figura 7. Transmisión de calor en un panel solar

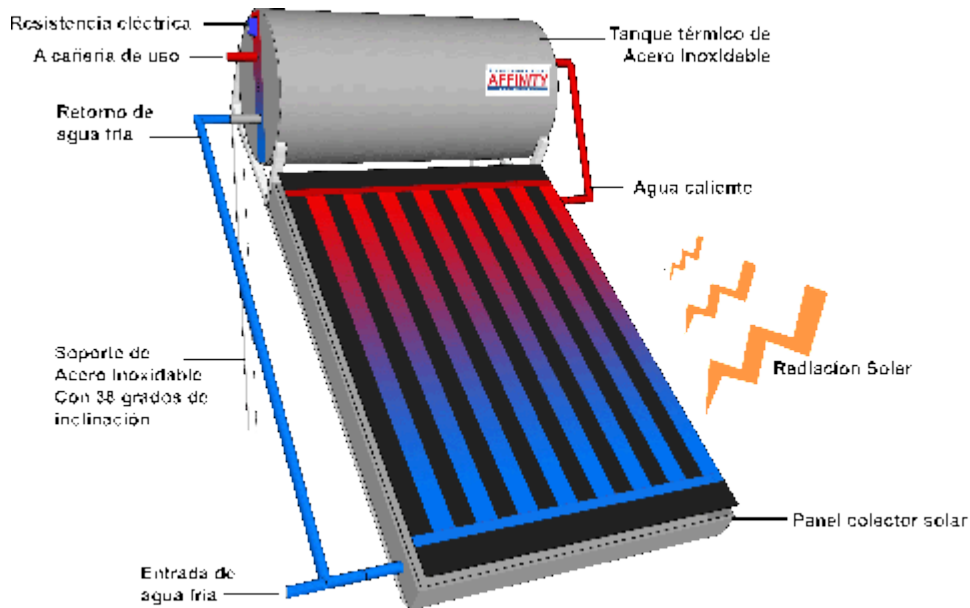


Fuente: http://suriaenergiasolar.es/jupgrade/images/stories/captador-solar_big.jpg

2.2. Definición de un calentador solar

El calentador solar es un aparato que se utiliza para calentar algún tipo de sustancia líquida a partir del calor de los rayos solares, disminuyendo de esta manera el consumo de gas o electricidad. Un calentador solar está compuesto por 4 partes básicas: colector, contenedor, sistema y sustancia de trabajo.

Figura 8. Partes principales del colector solar.



Fuente: http://4.bp.blogspot.com/-aELI5c8yluk/T5BSNi_QXLI/AAAAAAAAAJg/EWfGLqHcJLY/s1600/solarfunc.gif

aELI5c8yluk/T5BSNi_QXLI/AAAAAAAAAJg/EWfGLqHcJLY/s1600/solarfunc.gif

- a. El colector o panel es el que se encarga de transferir la energía solar en el agua a través de una serie de tuberías por donde esta fluye, se encuentran cubiertas con pintura negra para evitar que la luz de los rayos solares sea reflejada y así lograr una mayor absorción del calor.
- b. El contenedor es el recipiente que contiene el agua la cual al principio del proceso siempre va a ser fría, este se encuentra conectado con el colector y durante el día el agua recircula una y otra vez entre el colector y el contenedor, lo que hace que la energía solar capturada por el colector se guarde en el contenedor en forma de agua caliente. A medida que el agua caliente se extrae del tanque este vuelve a llenarse con agua fría y se repite el proceso.
- c. El sistema de un calentador solar son todas las tuberías, bombas, llaves de paso y accesorios con las que cuenta el calentador.
- d. La sustancia de trabajo es el líquido empleado para calentar a partir de los rayos solares, en este caso el agua.

Un colector siempre debe estar ubicado en un lugar despejado, y orientado de tal manera que pueda captarse al máximo posible el calor emitido por los rayos

solares. Bien se sabe que en ciertas horas del día (entre 11:00 am y 3:00 pm) los rayos del sol son más fuertes por ende deben ser aprovechados al máximo, por eso la importancia de que la inclinación del colector sea la correcta. También se debe tener en cuenta que aunque Colombia no cuenta con muchas estaciones, el clima no es el mismo todos los meses del año, es por eso que este proyecto explica cómo se puede establecer una inclinación promedio del colector para que los rayos del sol puedan ser aprovechados todos los días del año.

2.3. Aplicación del calentador solar

Su uso frecuente pero no masificado de colectores solares tanto a nivel doméstico como industrial, proporcionarían entre un 30% y 100% la demanda de agua caliente en sus instalaciones de producción, aunque esto depende en gran parte de su ubicación geográfica, por lo que su rendimiento puede variar según las estaciones climáticas y latitud.

Las aplicaciones más comunes para los colectores solares son las siguientes: Preparación de agua caliente para usos sanitarios, climatización de piscinas, calefacción, creación de vapor, cocinar, esterilización, pasteurización, desalinización, lavado, secado, entre otros. Pueden incluso servir de apoyo a sistemas de calefacción convencionales, que disminuiría los costos energéticos.

2.4. Clasificación de los diferentes tipos de colectores solares.

Existen dos tipos de captadores solares, estos son: *captadores de baja temperatura* y *captadores de alta temperatura*, un ejemplo de estos últimos son los concentradores parabólicos y los espejos reflectores, que enfocan los rayos solares en un punto común, por lo general tienen una temperatura de trabajo superior a 100°C y operan con un fluido especial que acumula el calor el cual por medio de un intercambiador de calor lo transfiere al agua. Hoy se utiliza para la producción de energía eléctrica bajo los mismos principios de energía convencional (intercambiador de calor, producción de vapor, expansión en turbina y generador).

Se instalan en lugares los cuales no cuentan con una fuente hidráulica o en donde la radiación solar es muy alta.

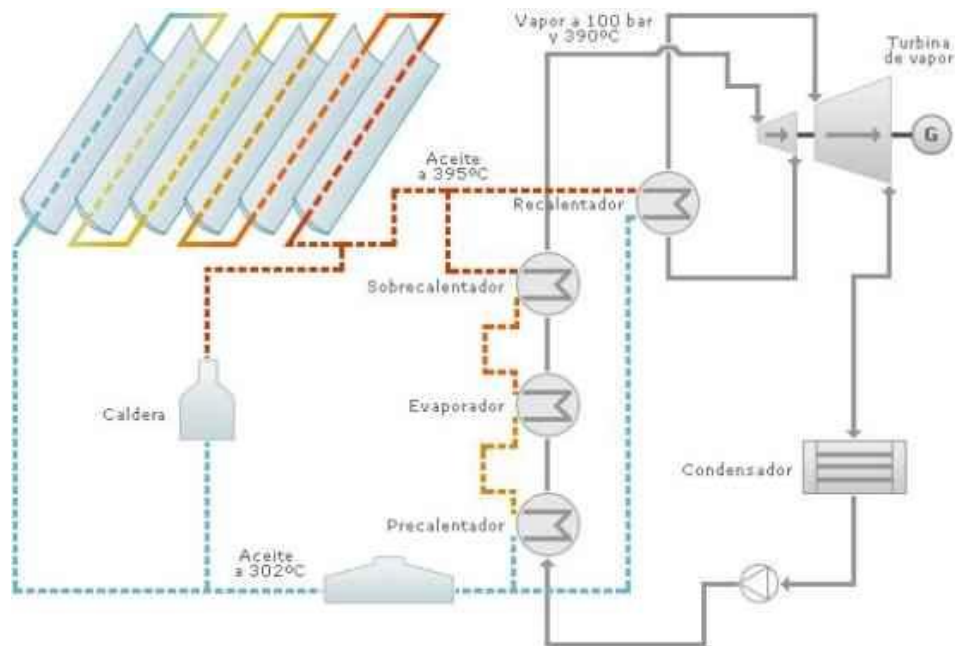
I. Captadores solares de alta temperatura

Los captadores solares de alta temperatura, son sistemas que entregan una temperatura útil superior a 150°C , esto lo logra con superficies reflectoras, que enfocan los rayos del sol en una pequeña parte de un elemento receptor, que se calienta y alcanza temperaturas en el orden de $150 -$ y 500°C , estas instalaciones se usan para la producir vapor de agua que luego se usa para generar energía eléctrica. Cabe destacar que las plantas solares termoeléctricas pueden producir electricidad cuando el sol ya se ha ocultado mediante el almacenamiento del fluido a 350°C .

Pueden ser:

- A. **Sistemas lineales** (de disposición cilíndrica): el fluido se calienta al recorrer la línea situada en el foco de la parábola (**Figura 9**).

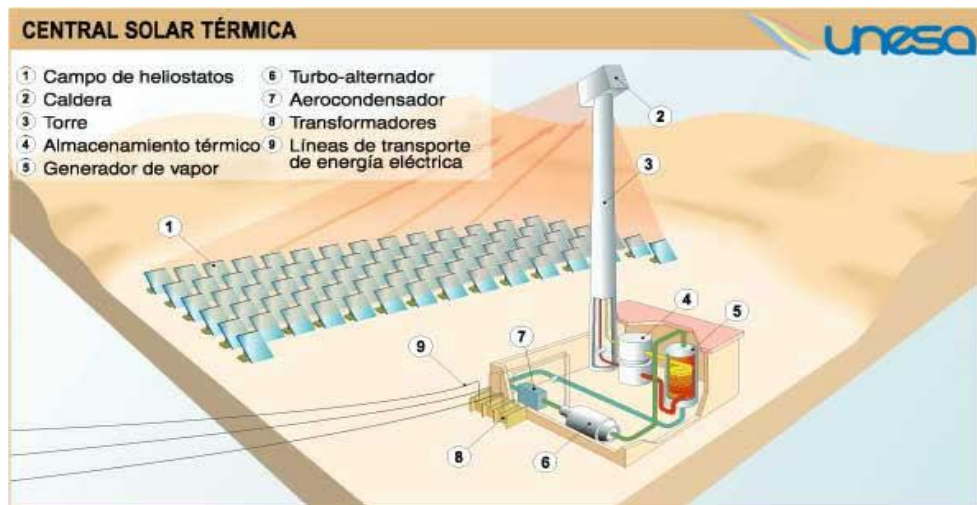
Figura 9. Captador solar parabólico.



Fuente: energiasolar44.blogspot.com

- B. **Sistemas puntuales** En los sistemas puntuales, la radiación solar se concentra en un único punto situado en una torre, en donde se genera vapor de agua para producir electricidad (ver **Figura 10**).

Figura 10. Central solar térmica.



Fuente: <http://www.unesa.es/sector-electrico/funcionamiento-de-las-centrales-electricas/1350-central-solartermica>

C. **Concentrador parabólico con motor Stirling:** En la **Figura 11** se muestra esquemáticamente un sistema de generación eléctrica termo solar de disco/Stirling que se compone por un concentrador solar, un receptor, el motor Stirling y un generador eléctrico. El absorbedor se coloca dentro de una cavidad para disminuir las pérdidas térmicas por convección y radiación hacia el ambiente. El motor utiliza helio como fluido de trabajo y tiene dos pistones de simple acción en acoplamiento tipo alfa, un regenerador de mallas metálicas y un disipador de calor compacto enfriado por aire directamente del tipo de tubos con aleta ondulada. Una de las ventajas de utilizar enfriamiento directo, es que elimina el circuito de tuberías, la bomba de agua y el intercambiador agua/aire utilizados en el enfriamiento indirecto convencional, reduciendo el costo y complejidad del sistema.

- a. **Captador solar de tubos de vacío con flujo directo:** el captador está formado por tubos dobles de vidrio (ver Figura 16.) que crea una cámara a vacío en cada uno de los pares, los tubos se configuran en paralelo y se conectan a un tanque con aislamiento térmico. Dentro de las cavidades internas de los tubos y el tanque circula agua, que va aumentando su temperatura con la acción del calentamiento de los tubos que transfiere su calor al líquido. Por consiguiente la recirculación se da porque se forma un ciclo en el que el agua que se calienta es menos densa que el agua fría, lo que ocasiona que el agua con menor temperatura descienda hacia el captador, empujando el agua caliente hacia arriba, así que cuando el agua caliente se ubique en la parte superior va ir disminuyendo su temperatura con el paso del tiempo enfriándose y repitiendo el ciclo. Para aumentar su rendimiento a algunos sistemas se les adapta una resistencia eléctrica que sirve de apoyo para cuando la radiación solar y la temperatura ambiente son bajas y el colector no llega a una temperatura de operación adecuada. (ver Figura 12).

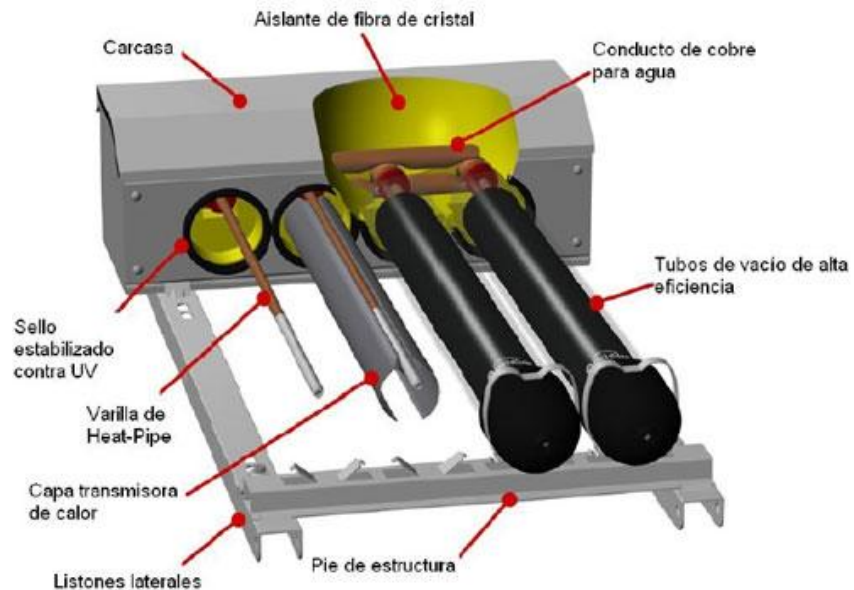
Figura 12. Calentador solar de tubos a vacío con resistencia eléctrica.



Fuente: <http://www.alternativaenergetica.com.mx/calentador/calentadorfaq.html>

- b. **Captador de flujo indirecto o heat pipe:** los tubos captadores almacenan una sustancia de trabajo, el calor evapora el fluido, y este transfiere su calor por conducción. Ver Figura 13.

Figura 13. Captador solar de flujo indirecto.



Fuente: http://www.solepanel.cl/sistemassolares_sst.html

- c. **Captador solar plano:** esencialmente, consiste en una superficie rectangular plana en general de color oscuro, reconocida como superficie colectora ejemplo de ello en la Figura 14. Al interior de este panel se encuentra el líquido de trabajo agua u otra sustancia, que circula por una serie de tubos configurados en paralelo, o un solo tubo en serpentin que cubre toda el área de captación. Ver la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

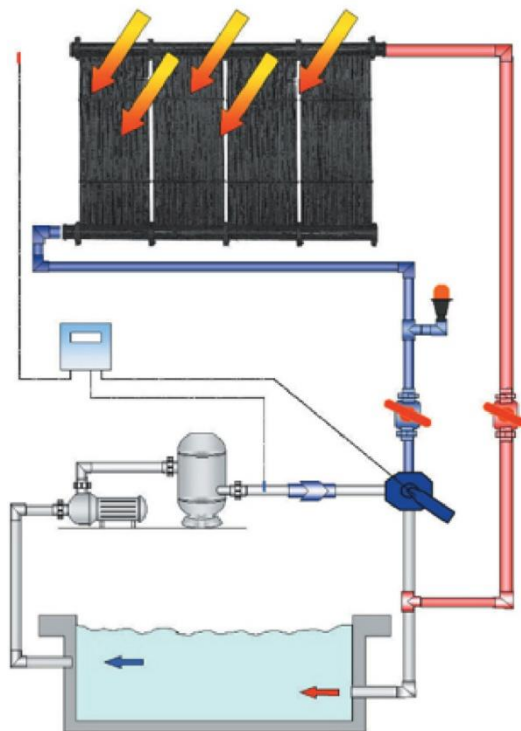
Figura 14. Colector solar placa plana.



Fuente: http://4.bp.blogspot.com/_jEeG2l2ioqs/TFHiNHggDRI/AAAAAAAAAKY/UIFtvFPR8I8/s1600/Imagen3.jpg

d. Captadores para climatización de piscinas: los colectores solares utilizados para calefacción de piscinas están hechos de materiales plásticos resistentes a los rayos UV del sol y se instalan sin recubrimiento normalmente encima del techo. Los materiales más usados son el polipropileno y polietileno, que dan buen rendimiento a bajas temperaturas de trabajo y que tienen un coste muy reducido. Se suelen utilizar en placas polipropileno flexible que son muy ligeras, resistentes y duraderas extendiéndose en zonas expuestas al sol. Por dentro de ellas circula la misma agua de la piscina. Además no reaccionan con el cloro de las piscinas y resisten bien a la corrosión. Estos colectores se utilizan principalmente en piscinas al aire libre. Una piscina requiere calentamiento que mantenga el agua a una temperatura de entre 22° y 27° Celsius. La circulación de agua es forzada, ya que los colectores se encuentran más elevados que la piscina, por lo que es necesario el uso de bombas. Ver Figura 15.

Figura 15. Sistema de climatización de piscina por medio de captador solar.



Fuente: <http://consultoravisionempresarial.blogspot.com/2011/08/el-papel-de-la-energia-solar-en-la.html>

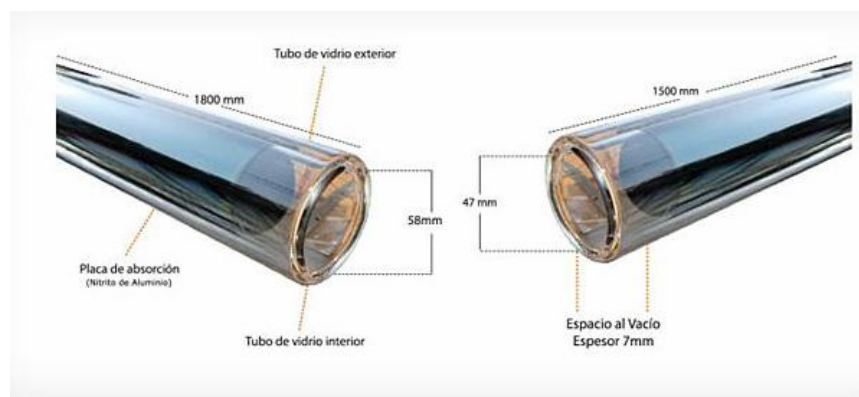
2.5. Componentes del calentador solar de tubos de vacío con flujo directo

Existen 3 componentes básicos en un calentador solar:

1. Colector

El colector utiliza tubos de vidrio al vacío fabricado 100% en cristal de boro silicato¹, no utiliza materiales conductores, los costos son mucho más baratos, que en caso de rotura o mantenimiento, sólo hay que cambiar un tubo y no todo el panel, en el caso de colectores de placa plana. También existen colectores de placa plana (ver Figura 14), que si bien capturan la radiación de la misma forma, algún daño en la superficie aumenta los costos de reparación.

Figura 16. Tubo colector



Fuente: www.limpiatumundo.com/calentadores-solare/

2. Tanque de almacenamiento

Es el recipiente de almacenamiento del fluido, se conecta con la entrada y la salida del colector.

Está compuesta de un tanque de acero inoxidable, encima una capa de material aislante (poliuretano), protegido con una lámina de acero pintada para protegerlo de la corrosión y prevenir el deterioro del aislante. Ver **Figura 12**.

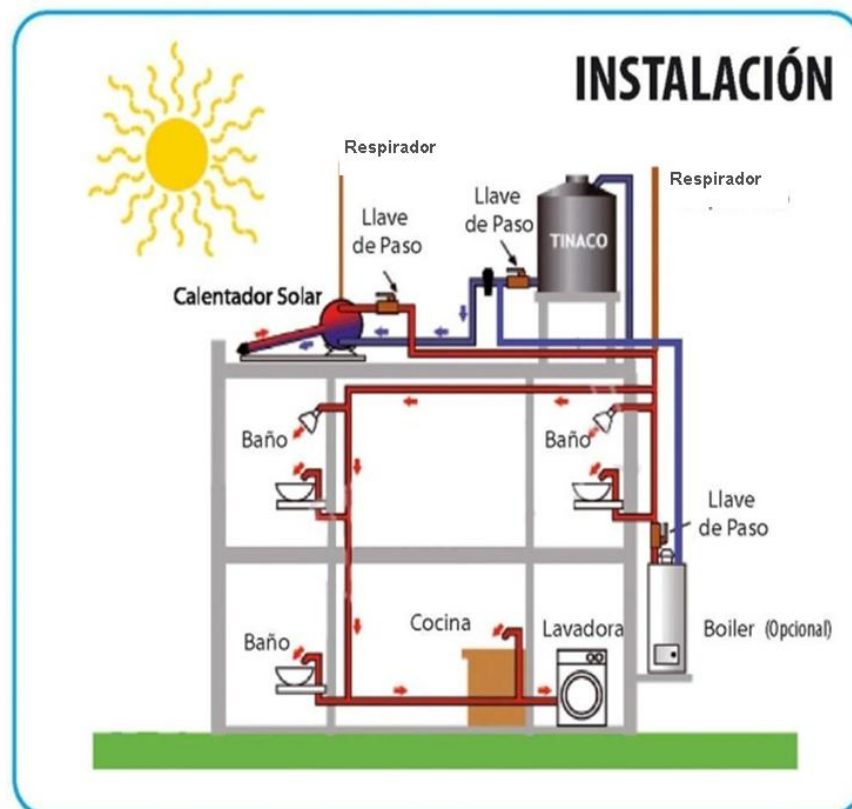
3. Sistema de distribución

¹ Es un material que se emplea para la elaboración de envases de laboratorio e instrumentos ópticos por sus buenas propiedades ópticas y mecánicas con muy baja dilatación térmica en comparación con otros vidrios, Composición química: (%) Sílice (SiO₂) 80,4 - Alúmina(Al₂O₃) 2,4 - Anhídrido Bórico(B₂O₃) 13,0 - Hidróxido Sódico(Na₂O) 3,9

² El efecto Seebeck es una propiedad termoeléctrica descubierta en 1821 por el físico alemán Thomas Johann Seebeck inversa al efecto Peltier. Este efecto provoca la conversión de una diferencia de

El sistema son todas las tuberías, bombas, sistemas de control, llaves de paso, y accesorios con las que cuente la entrada y la salida del calentador solar. Si la circulación es directa, se emplea agua potable; la misma que se utilizará en regaderas, lavabos, lavadoras, albercas, etc. En este caso, el agua se hace pasar por el colector para ser guardada en el contenedor. La línea de tubería que sale del tanque colector debe ir completamente aislada con el fin de disminuir las pérdidas de calor como se aprecia en el centro de la Figura 17.

Figura 17. Instalación de colector solar y tuberías para un sistema doméstico



Fuente: http://asistente.infored.mx/frameset.php?url=/313552_CALENTADORES-SOLARES.html

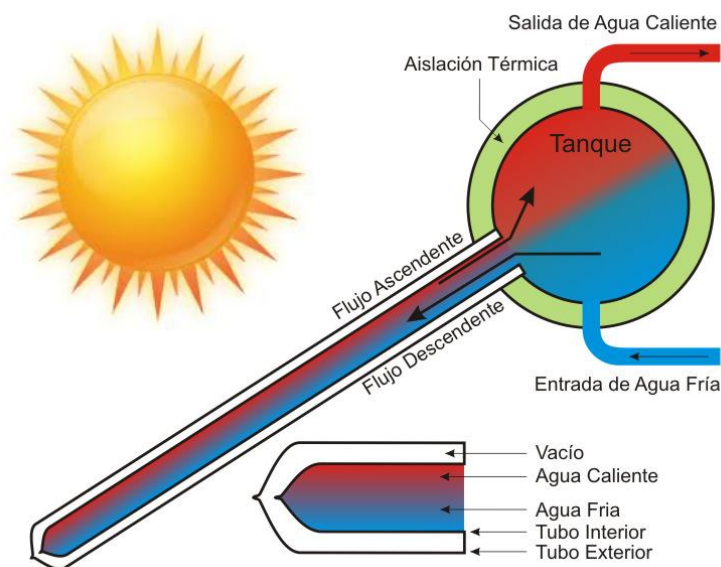
2.6. Principio de funcionamiento del calentador solar con tubos de vacío

El colector es el encargado de recibir la energía que emite el sol en forma de ondas electromagnéticas y transferirla al agua por conducción térmica, los captadores en su mayoría son de color oscuro o coloreados con pinturas como el cromo negro; la función principal de los captadores solares de baja energía

es absorber la radiación que produce el sol, aprovechándola al máximo y evitando que sea conducida o reflejada por fuera del sistema. Por eso cada uno de los tubos colectores tiene en su interior una cámara de vacío que permite que solo pase la radiación, se evite la conducción y la convección térmica al exterior.

Como se ha demostrado el agua a mayor temperatura disminuye su densidad y por el fenómeno termosifón esta sube y se deposita en el tanque de almacenamiento mientras que el agua fría más densa se precipita en el fondo luego esta agua fría absorbe el calor del captador y el ciclo se repite (Figura 18).

Figura 18. Esquema de colector solar de tubos



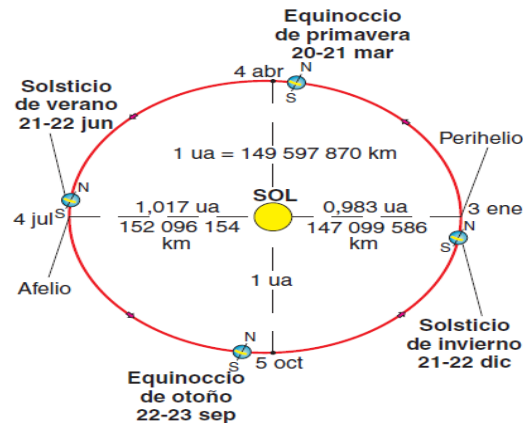
Fuente: <http://ex000006.ferozo.com/wp-content/uploads/2013/08/esquema-calefon-solar.jpg>

2.7. Influencia de la inclinación de una superficie con respecto a la radiación

I. Movimiento de la tierra:

El movimiento de la tierra alrededor del Sol se llama traslación, tiene una duración de 365 días, 5 horas y 48 minutos, una velocidad de 108.000 Km/hora (aprox.) Esta órbita está inclinada con respecto al plano del Ecuador a un ángulo de $23^{\circ}45'$, la tierra tiene un movimiento de rotación alrededor de su eje en el que emplea 24 horas, la duración del día y de la noche varía según la latitud del lugar (2).

Figura 19. Movimiento de traslación de la tierra.



Fuente: Guía práctica de energía solar térmica. Energía, AVEN (Agencia valenciana de la Valencia (España)

En la figura anterior se observa la posición de la tierra en 4 instantes claves que marcan la transición de una estación a otra, demarcando el invierno en el norte y verano en el sur y viceversa. Por encima de la línea del Ecuador los cambios de clima son menos acentuados que en las zonas que están cerca a los polos de la tierra, cabe resaltar que debido a esto, la zona que conforma el Ecuador se caracteriza por poseer un clima tropical.

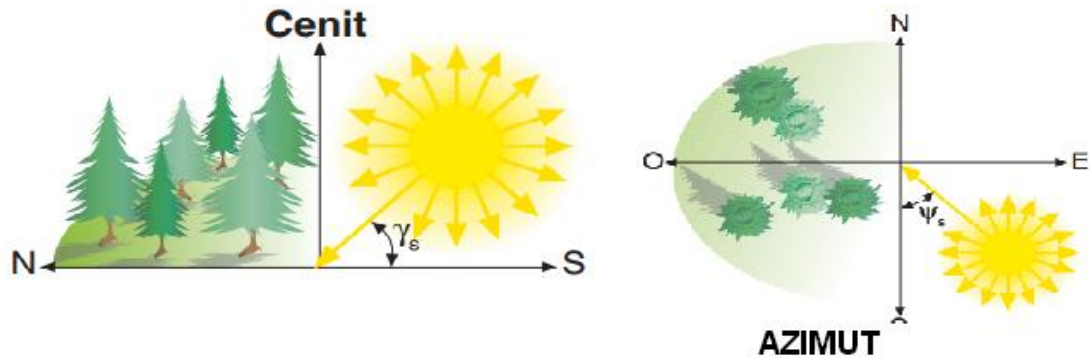
II. Movimiento solar:

El objetivo de cualquier instalación solar es el de captar la máxima radiación solar. En este sentido la inclinación y orientación del colector solar, así como las posibles sombras que se puedan proyectar sobre los paneles, son factores clave que determinarán el correcto funcionamiento de las instalaciones.

Cada día la Tierra efectúa una rotación completa sobre sí misma dando lugar a los días, aunque habitualmente se dice que el Sol sale por el Este y se oculta por el Oeste como si fuera el Sol el que realiza el movimiento.

Para definir correctamente la posición del Sol en cada instante con respecto a un punto situado en la Tierra se utilizan dos coordenadas, el azimut solar [Ψ_s] y la elevación solar (cenit) [γ_s]. Ver Figura 20.

Figura 20. Elevación y azimut.

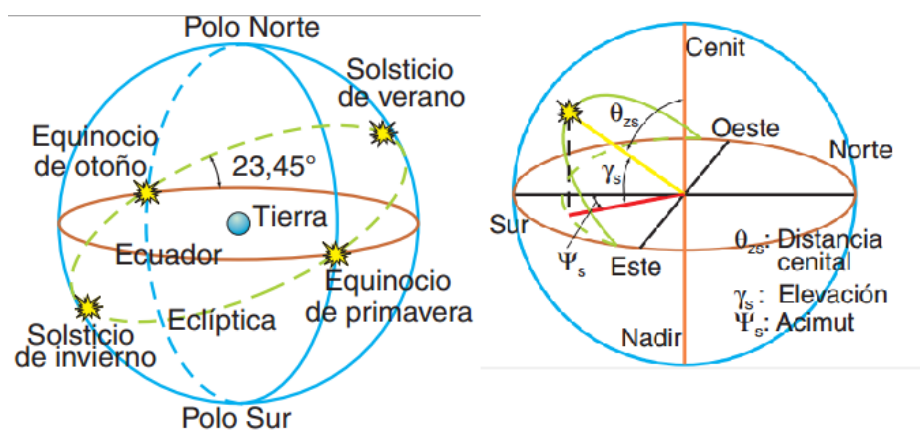


Fuente: Guía práctica de energía solar térmica. Energía, AVEN (Agencia valenciana de la Valencia (España)

El azimut es el ángulo de giro del Sol con respecto al sur geográfico medido sobre el plano horizontal. Un valor de 0° del azimut se dará cuando el Sol esté exactamente sobre el Sur geográfico y coincidirá con el mediodía solar.

La altura solar es el ángulo que forman los rayos solares sobre la horizontal, Este valor varía a lo largo del día y del año. El Sol sale desde la horizontal para llegar a su máxima altura al mediodía solar y luego ir disminuyendo hasta que se pone por el Oeste. Además, cada día del año el Sol alcanza una altura diferente consiguiendo la altura máxima durante el solsticio de verano (21 de junio en el hemisferio Norte) y la altura mínima durante el solsticio de invierno (21 de diciembre en el hemisferio Norte).

Figura 21. Movimiento solar.



Fuente: Guía práctica de energía solar térmica. Energía, AVEN (Agencia valenciana de la Valencia (España)

III. Declinación

La **declinación** (δ) (ver Figura 22) es el ángulo que forma el plano del ecuador de la Tierra con la línea situada en el **plano de la eclíptica**, que une los centros del Sol y de la Tierra (Figura 22). Este ángulo varía a lo largo de la órbita de la Tierra alrededor del Sol, alcanzando valores máximos en los solsticios de verano (declinación máxima positiva, $\delta = 23,45^\circ$) e invierno (declinación máxima negativa, $\delta = -23,45^\circ$) y valores nulos en los equinoccios (declinación nula, $\delta = 0^\circ$). Aunque la declinación varía se puede suponer que permanece constante a lo largo de un día. (4)

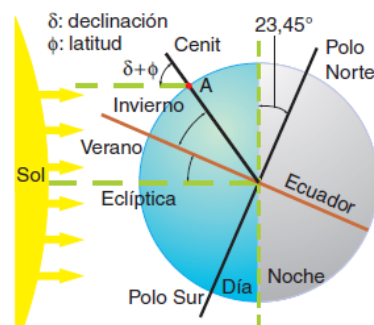
La expresión de la declinación para un determinado día se calcula con la siguiente ecuación:

$$\delta = 23,45 * \text{sen}\left(360 * \frac{284 + \delta n}{365}\right) \quad [1]$$

δ : declinación (grados).

δ_n : día del año (1...365, tomando 1 para el primer día de enero).

Figura 22. Posición de la tierra respecto al sol en el solsticio de invierno.



Fuente: Guía práctica de energía solar térmica. Energía, AVEN (Agencia valenciana de la Valencia (España))

La El resto del año, el Sol sigue trayectorias intermedias como bien lo muestra la Figura 23. La **elevación solar** alcanza en los solsticios de verano e invierno sus valores máximo y mínimo, respectivamente. Se ha marcado la posición del Sol a una hora determinada (10AM). El observador porta un plano en el que se reflejan las diferentes trayectorias anuales del Sol. Este plano recibe el nombre de carta solar.

El conjunto de trayectorias del Sol en un lugar determinado se puede representar en una **carta solar** (Figura 23) que refleja la posición del Sol,

azimut y elevación en cada hora, desde el punto de vista de un observador que mira hacia el Sur (en el hemisferio norte, en el hemisferio sur miraría hacia el Norte). Para interpretarlo se toma la línea que representa a un día, por ejemplo el 21 de marzo, si sitúa en la posición Este sucede lo siguiente.

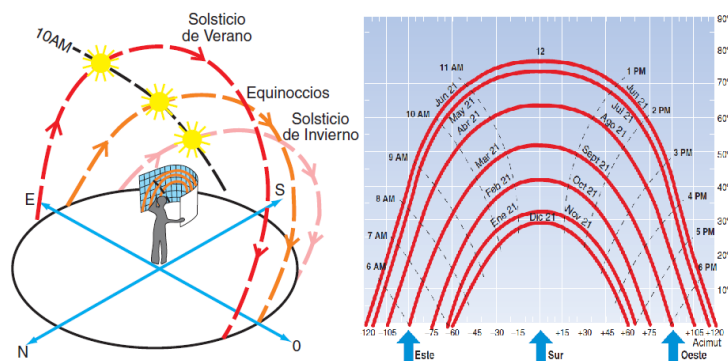
- Amanece a las 6 de la mañana (6 AM), elevación 0° y acimut -90°
- A las 11 de la mañana (11 AM), elevación 50° , acimut -22° aproximadamente
- Al mediodía (12), elevación 52° aproximadamente, acimut 0°
- A las 3 de la tarde (3 PM), elevación 32° aproximadamente; acimut $+60^{\circ}$.

Figura 23 representa las trayectorias aparentes del sol en los **solsticios** de verano e invierno y en los **equinoccios** de primavera y otoño, respecto de un observador que mira al Sur. El resto del año, el Sol sigue trayectorias intermedias como bien lo muestra la Figura 23. La **elevación solar** alcanza en los solsticios de verano e invierno sus valores máximo y mínimo, respectivamente. Se ha marcado la posición del Sol a una hora determinada (10AM). El observador porta un plano en el que se reflejan las diferentes trayectorias anuales del Sol. Este plano recibe el nombre de carta solar.

El conjunto de trayectorias del Sol en un lugar determinado se puede representar en una **carta solar** (Figura 23) que refleja la posición del Sol, azimut y elevación en cada hora, desde el punto de vista de un observador que mira hacia el Sur (en el hemisferio norte, en el hemisferio sur miraría hacia el Norte). Para interpretarlo se toma la línea que representa a un día, por ejemplo el 21 de marzo, si sitúa en la posición Este sucede lo siguiente.

- Amanece a las 6 de la mañana (6 AM), elevación 0° y acimut -90°
- A las 11 de la mañana (11 AM), elevación 50° , acimut -22° aproximadamente
- Al mediodía (12), elevación 52° aproximadamente, acimut 0°
- A las 3 de la tarde (3 PM), elevación 32° aproximadamente; acimut $+60^{\circ}$.

Figura 23. Carta solar.



Fuente: Guía práctica de energía solar térmica. Energía, AVEN (Agencia valenciana de la Valencia (España)

Orientación del colector solar

Una vez descritas las coordenadas que nos permiten situar el Sol en el cielo, hay que situar la superficie del generador fotovoltaico de manera que reciba la mayor cantidad posible de energía solar y esto depende de

- La orientación de la superficie del colector solar.
- El tiempo que se va a usar a lo largo del año: anual, estacional, etc.
- La aplicación que va a tener: residencial, industrial, etc.

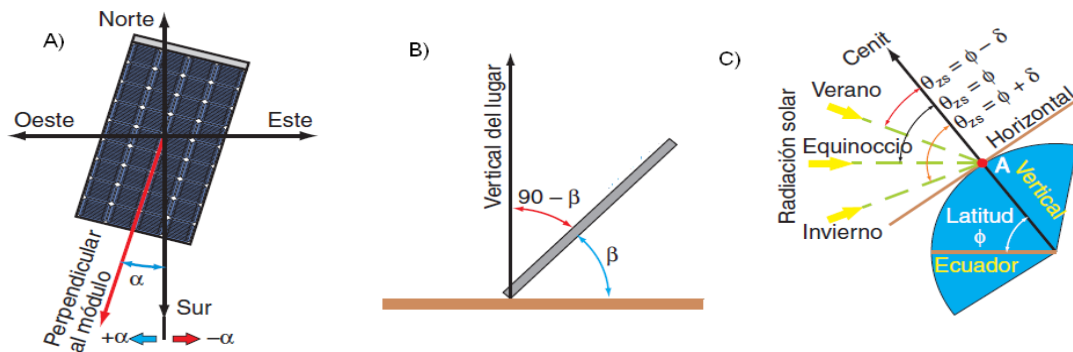
La orientación de un colector solar se define también mediante coordenadas angulares, similares a las utilizadas para definir la posición del Sol.

- Ángulo de azimut (α): ángulo que forma la proyección sobre el plano horizontal de la perpendicular a la superficie del generador y la dirección Sur. Vale 0° si coincide con la orientación Sur, es positivo hacia el Oeste y negativo hacia el Este. Si coincide con el Este su valor es -90° y si coincide con el Oeste su valor es $+90^\circ$.
- Ángulo de inclinación (β): ángulo que forma la superficie del generador con el plano horizontal (Figura 24). Su valor es 0° si el módulo se coloca horizontal y 90° si se coloca vertical.

Una superficie recibe la mayor cantidad posible de energía si es perpendicular a la dirección del Sol. Como la posición del Sol varía a lo largo del día, la posición óptima de la superficie también tendrá que ser variable. Veamos cómo es esa variación.

Se define la declinación (δ) como el ángulo variable que forma el ecuador con el plano de la eclíptica. Por lo tanto la dirección de la radiación solar incidente sobre la tierra varía en función de la declinación. La latitud (Φ) de un lugar A (Figura 24C) indica el ángulo que forma la vertical de ese lugar con el ecuador. Por lo tanto, a lo largo del año el ángulo cenital θ_{zs} que forma la vertical de un lugar A con la dirección de la radiación solar varía desde $\theta_{zs} = \Phi - \delta$ en el solsticio de verano a $\theta_{zs} = \Phi + \delta$ en el solsticio de invierno, pasando dos veces por el valor $\theta_{zs} = \Phi$ en los equinoccios del año.

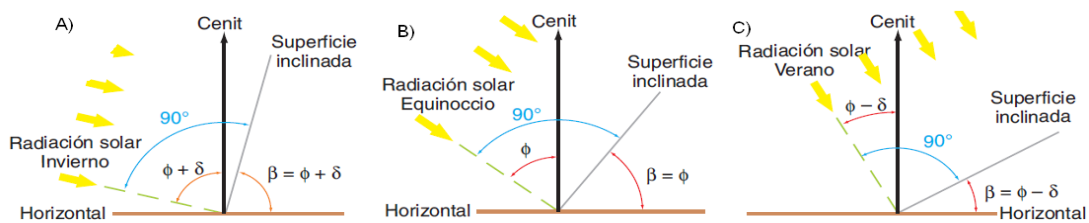
Figura 24. Orientación panel solar.



Fuente: Guía práctica de energía solar térmica. Energía, AVEN (Agencia valenciana de la Valencia (España))

Por lo tanto, para que una superficie reciba la radiación solar perpendicularmente (Figura 25) tendremos que inclinar la superficie un ángulo β con la horizontal igual al que forma la vertical del lugar con la radiación solar. Tendremos que variar el ángulo de inclinación desde $\beta = \Phi - \delta$ en el solsticio de verano (Figura 25.C) a $\beta = \Phi + \delta$ en el solsticio de invierno (Figura 25.A), pasando por el valor $\beta = \phi$ en los equinoccios (Figura 25.B).

Figura 25. Inclinación del colector.

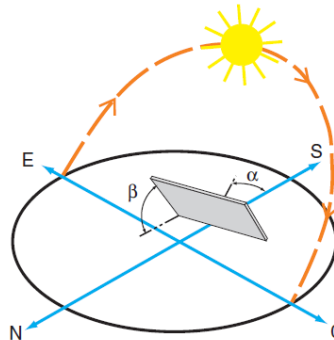


Fuente: Guía práctica de energía solar térmica. Energía, AVEN (Agencia valenciana de la Valencia (España))

La **orientación óptima** será un valor constante, con una inclinación (β) que va a depender de la latitud Φ del lugar y un azimut (α) que depende del hemisferio en el que está situado el colector.

La Figura 26 muestra una superficie situada en el hemisferio norte, donde el Sol sigue una trayectoria Este-Sur-Oeste. Si pretendemos maximizar la captación de energía solar, la superficie tendrá que estar orientada hacia el Sur y por lo tanto el ángulo de azimut (α) debe ser nulo. El **azimut óptimo** para que una superficie fija reciba la mayor cantidad posible de energía solar debe ser cero ($\alpha = 0^\circ$), la superficie se debe orientar hacia el Sur si está situada en el hemisferio norte o hacia el Norte si está en el hemisferio sur.

Figura 26. Orientación de una superficie en el hemisferio norte.



Fuente: Guía práctica de energía solar térmica. Energía, AVEN (Agencia valenciana de la. Valencia (España)

Para determinar la **inclinación óptima** de una superficie fija se usa una fórmula basada en análisis estadísticos de radiación solar anual sobre superficies con diferentes inclinaciones situadas en lugares de diferentes latitudes, que proporciona la **inclinación óptima en función de la latitud** del lugar:

$$\beta_{\text{opt}} = 3,7 + 0,69 \cdot |\Phi| \quad [2]$$

B_{opt} : ángulo de inclinación óptima (grados)

$|\Phi|$: latitud del lugar, sin signo (grados)

La fórmula es **válida para aplicaciones de utilización anual** que busquen la máxima captación de energía solar a lo largo del año. En la práctica también se utilizan expresiones, basadas en la experiencia y la observación, que proporcionan la **inclinación óptima en función del periodo de tiempo y el uso** que se le va a dar al colector. Ver **Tabla 2**.

Tabla 2. Inclinaciones recomendadas.

Periodo de utilización	Inclinación de los colectores
Anual con consumo constante	$B=\Phi$
Preferentemente en invierno	$B=\Phi+10^\circ$
Preferentemente en verano	$B=\Phi-10^\circ$

Fuente: autor

Se admiten en cualquiera de los tres casos desviaciones de $(\beta \pm 10^\circ)$ como máximo.

3. MODIFICACION DEL CALENTADOR SOLAR

Es un colector fabricado con baja emisividad del tubo (0,08), su alta absorptividad (0,93) y su aislamiento por vacío, ayudan a conseguir rendimientos superiores a otros tipos de colectores solares (colectores de placa plana). El aprovechamiento de la luz difusa permite lograr temperaturas por encima de 40 °C en días totalmente nublados. En días de radiación normal adquiere temperaturas superiores a los 75 °C.

La curvatura del tubo de vidrio (de 58 mm de diámetro) ofrece una mayor resistencia a los impactos que los colectores planos. Se reporta que ha superado pruebas equivalentes a un granizo de 15 mm. Su montaje es muy sencillo si se tiene experiencia. El mantenimiento es muy sencillo y solamente requiere de limpieza una vez al año.

En principio el colector se encontraba en una base metálica para estar muy por encima del nivel de piso (ver **Figura 27**), se optó por moverlo de ese sitio y ubicarlo encima del techo (ver Figura 28).

3.1. Montaje inicial del calentador solar

Figura 27. Estructura original del calentador solar.



Fuente: Autor

La modificación del calentador fue propuesta en un principio para mejorar la eficiencia original del colector (ver columna 8 Tabla 4) porque el colector tiene una inclinación alta (54° aprox); teniendo en cuenta que este colector se diseñó originalmente para operar en las latitudes del hemisferio norte, ósea para latitudes mayores a 30°, y superior a la recomendada para la latitud de la ciudad de Pereira (4°48'51"N).. Por eso, se tiene la posibilidad de que al declinarlo, el tanque colector aumente su temperatura y empiece a crear vapor de agua, por el hecho en que el líquido almacenado en el tanque llega a alcanzar una temperatura de 90 grados centígrados cercana al punto de ebullición del agua (100°C) como se verá más adelante en la **Tabla 5**.

Los siguientes son los problemas que presentaba el colector, además de la baja eficiencia por inclinación incorrecta:

1. El calentador solar estaba apoyado en una base muy débil que a la menor fuerza se movía de un lado a otro, ocasionando que las tuberías se empezaran a fatigar y/o que la estructura no soportara por mucho tiempo el peso del calentador solar.
2. La salida de agua caliente se encontraba muy lejos del punto de servicio, lo que ocasionaba que se perdiera calor por la larga extensión de la tubería.

3.2. Montaje final del calentador solar

Dado a que el colector tiene una estética agradable, con superficies lisas en cristal y un acabado cromado, algunos arquitectos optan por agregarlos a sus diseños para que hagan parte de la estructuras del techo, o sustituyendo al mismo. Por tal motivo se plantea apoyar el colector en la superficie del techo de una construcción existente, con el fin de que haga parte de la arquitectura y economizar recursos, aprovechando que la inclinación del techo es de 10°. (aproximadamente la inclinación óptima del colector).

Según la ecuación 2, con una latitud de 4° 48' 51" (4,814167°) la inclinación óptima para el colector es:

$$\beta_{\text{opt}} = 7,02177^{\circ} \approx 10^{\circ}$$

El colector lleno de agua tiene un peso total de 150 kg (Tubo de vidrio de 3 Kg por 15 unidades más la masa de agua que almacena los colectores y el tanque). Debido a que el tanque tiene un peso muy elevado al estar lleno, se

ha montado una estructura en perfil metálico para soportarlo. Los tubos llenos de agua son soportados sobre el techo que a su vez está montado sobre perfiles tubulares (vigas). De esta manera se calcula el esfuerzo máximo presente en las vigas teniendo en cuenta el peso del colector (tubos llenos) más el peso propio del techo, tomadas como cargas distribuidas.

Figura 28. Colector solar en techo



Fuente: Autor

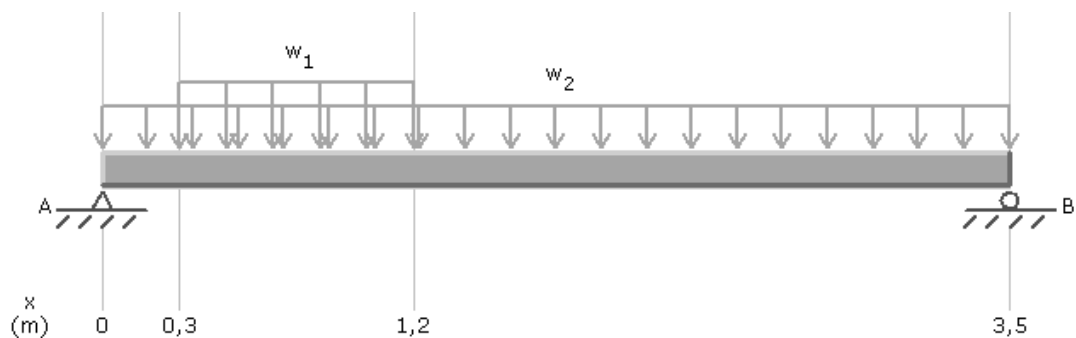
La viga tiene una luz de 3,5 m, el perfil es cuadrado 7,6x3,8 [cm] y 1,5 [mm] de espesor (ver **Figura 30**). Tubería de acero estructural grado 50 con un esfuerzo de fluencia ($\sigma_y = 34474 \text{ N/cm}^2$). $A = 2,65 \text{ cm}^2$

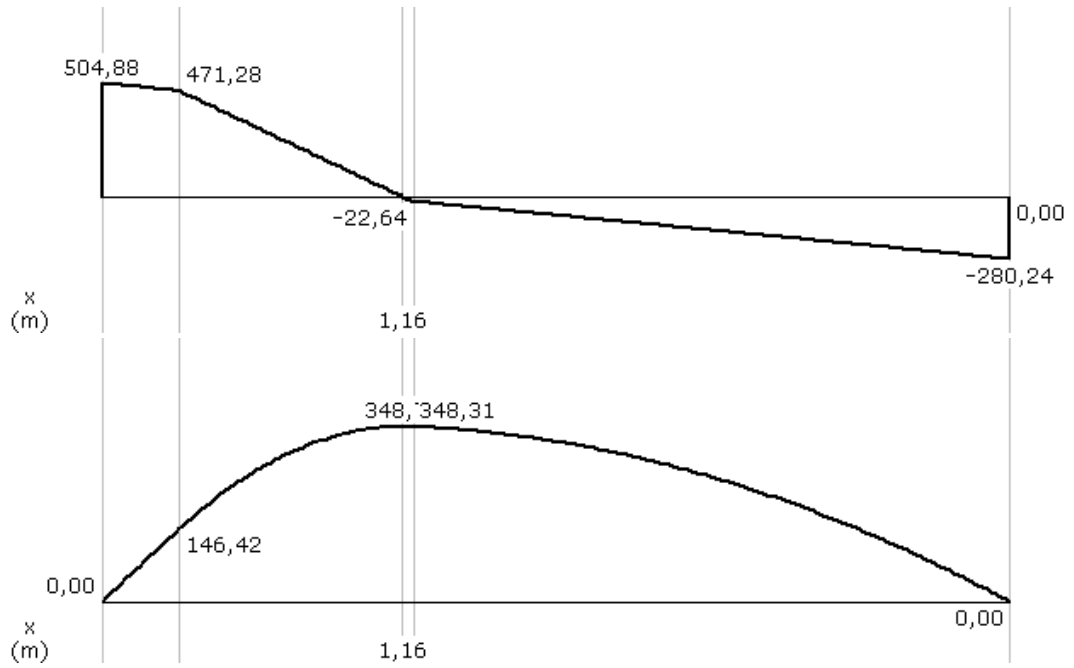
Carga de techo: 112 N/m

Carga de colector: 436.8 N/m

A continuación se muestra los diagramas de carga y momentos en la viga.

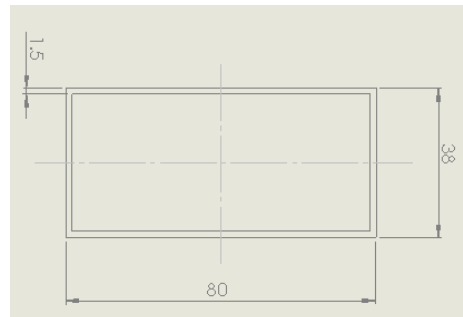
Figura 29. Diagrama de distribución de cargas, cargas, y momentos de la viga.





Fuente: autor

Figura 30. Perfil rectangular de la viga de apoyo.



Fuente: Autor

El esfuerzo máximo se calcula con la siguiente expresión.

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{Mc}{I}$$

Donde M es el momento máximo del diagrama:

$$M = 348,31 \text{ Nm} = 34831 \text{ Ncm}$$

$$c = 1,9 \text{ cm}$$

I se calcula con las dimensiones de la **Figura 30.**

$$I = \frac{bh^3}{12} - \frac{b_2h_2^3}{12} = 6,97cm^4$$

Donde $h = 38 mm$; $b = 80mm$; $b_1 = 77mm$ y $h_1 = 35mm$

Por lo tanto,

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 9494 N cm^2$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} \ll \frac{\sigma_y}{2}$$

Donde, $\frac{\sigma_y}{2}$, se toma como el punto de seguridad máximo de fluencia del material.

En conclusi3n el tubo de perfil rectangular soporta las cargas con las cuales se somete. (el peso del colector y el techo). Por otro lado, el componente más pesado, el tanque acumulador, se mont3 sobre una estructura anclada al piso para soportar el peso del tanque junto con su contenido, e incluso soportar el peso de la persona que vaya a realizar mantenimiento al sistema. Ver montaje en la Figura 31.

Figura 31. Montaje final del calentador solar (vista trasera).



Fuente: Autor

4. EVALUACION DE EFICIENCIAS Y ANALISIS DE RESULTADOS

La forma en que interactúa y se comporta un fenómeno físico es posible observarlo mediante instrumentos de medición especializados para cada fenómeno, por ejemplo, un pirómetro (ver), es utilizado en particular para la detección de potencia de los rayos solares incidentes sobre una superficie, por lo tanto la unidad de medición es potencia sobre área [W/m^2], esta cantidad de potencia al tener contacto con la superficie se convierte en energía en forma de calor que genera un cambio de temperatura en dicha superficie la cual se puede detectar mediante otro instrumento llamado multímetro.

Figura 32. Piranometro



Fuente: <http://www.gisiberica.com/solarimetros/solari1.jpg>

El multímetro digital (ver) es un instrumento electrónico de medición que generalmente calcula voltaje, resistencia y corriente, aunque dependiendo del modelo de multímetro puede medir otras magnitudes como capacitancia y temperatura.

La medición de temperatura la hace por medio de un sensor llamado termocupla que se conecta al multímetro.

Figura 33. Multímetro digital

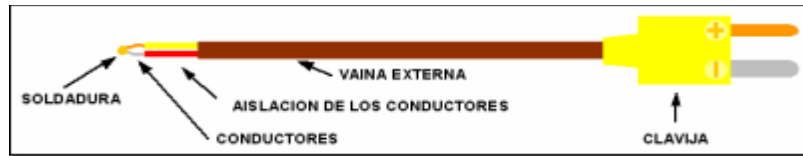


Fuente: [http://www.fluke.com/fluke/es/products/category.htm?category=HMA\(FlukeProducts\)](http://www.fluke.com/fluke/es/products/category.htm?category=HMA(FlukeProducts))

Las termocuplas son el sensor de temperatura más común utilizado industrialmente. Una termocupla se hace con dos alambres de distinto material

unidos en un extremo (soldados generalmente). Al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje muy pequeño (efecto Seebeck²) del orden de los mili voltios el cual aumenta con la temperatura.

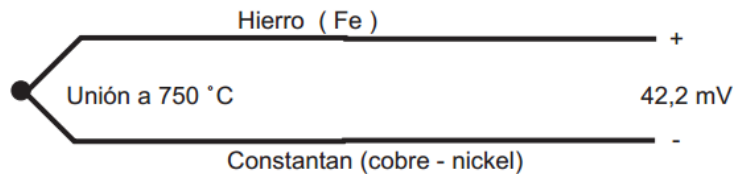
Figura 34. Termocupla



Fuente: <http://www.secoin.com.uy/images/termometers01.png>

Por ejemplo, una termocupla "tipo J" (ver) está hecha con un alambre de hierro y otro de constantan (aleación de cobre y níquel).

Figura 35. Esquema de una termocupla tipo J.



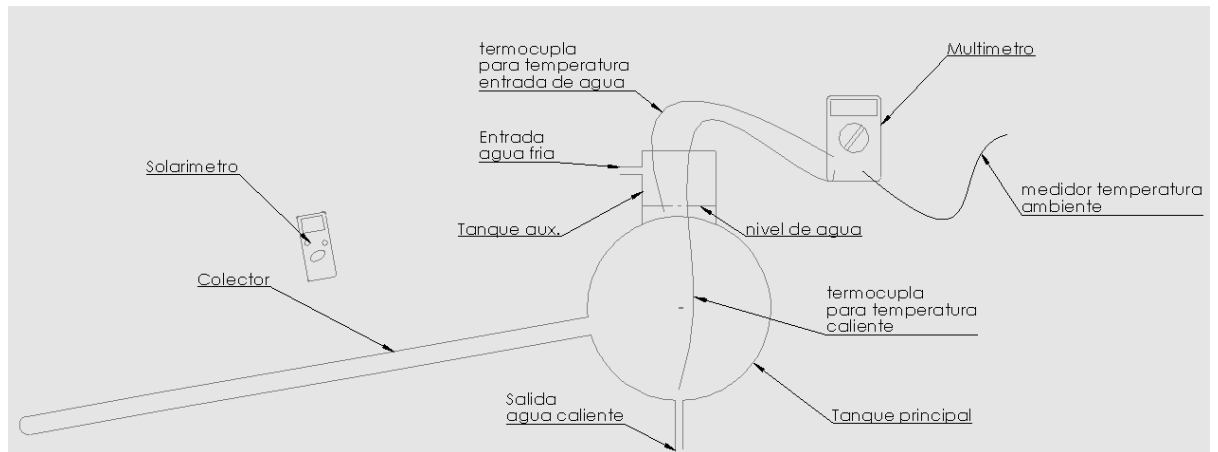
Fuente: <http://www.microbyte.cl/elec/picarti/201011/ari1.gif>

4.1. Descripción del montaje de los instrumentos de medición

En la Figura 36 se detalla la forma en cómo se tomaron las mediciones, antes y después de modificarlo (ver Figura 27 y Figura 31). Los puntos y las superficies tomadas en cuenta para las mediciones fueron: la cantidad de radiación solar percibida en la superficie del colector, la temperatura ambiente del lugar, la temperatura de entrada del agua al colector, y la temperatura de trabajo dentro del tanque del colector.

² El efecto Seebeck es una propiedad termoeléctrica descubierta en 1821 por el físico alemán Thomas Johann Seebeck inversa al efecto Peltier. Este efecto provoca la conversión de una diferencia de temperatura en electricidad. Se crea un voltaje en presencia de una diferencia de temperatura entre dos metales o semiconductores homogéneos. Una diferencia de temperaturas T_1 y T_2 en las juntas entre los metales A y B induce una diferencia de potencial V .

Figura 36. Esquema del montaje de los instrumentos en el calentador solar.



Fuente: Autor

4.2. Variables para la prueba

Se define el calentador solar como un sistema cerrado de energía el cual solo va a obtener intercambio de energía y no de materia. Los parámetros a tener en cuenta para validar el trabajo son los siguientes: temperatura fría, temperatura caliente, radiación solar, cantidad de masa (agua), y otros fijos: calor específico del agua, densidad, área y volumen. A continuación se definen algunos de ellos:

Temperatura fría: es la temperatura con la que se encuentra inicialmente el calentador en el instante que comienza a operar. Es la temperatura de entrada del calentador.

Temperatura caliente: temperatura de trabajo del calentador. Se mide dentro del tanque principal del colector. Ver Tabla 4 y Tabla 5.

Radiación solar: Es la energía en forma de ondas electromagnéticas que será captada por la superficie del colector para luego ser transferida en forma de calor al fluido.

Irradiancia (G): el valor instantáneo de la energía que llega por cada unidad de tiempo y por cada unidad de área. La potencia recibida por un colector solar perpendicular a los rayos del sol es igual al producto del valor de la irradiancia G por el área de la superficie A. $[W/m^2]$ (3)

Irradiación (I): el valor de la energía que llega durante un período de tiempo por cada unidad de área. $[MJ/m^2]$ ó $[kWh/m^2]$ (3)

Masa de agua: Es la cantidad de agua alojada en el calentador (tubos y tanque principal).

Calor específico (C_p): Cantidad de energía calorífica necesaria para incrementar la temperatura de una sustancia en un grado. (5)

La cantidad de agua total almacenada en el sistema, se puede ver en la siguiente tabla; corresponde a un colector de 130 litros.

Tabla 3. Referencia del calentador solar

CALENTADOR SOLAR DE AGUA				
Capacidad (l)	No. Tubos	Área Superficie (m ²)	Capacidad Tanque + Tubos (l)	Código
80	10	1.38	104	T0008050
130	15	2.06	147.75	T0013050
180	21	2.90	205.25	T0018050

Fuente: <http://www.ajover.co/es/construccion/calentadores-solares-agua/calentador-solar-agua>

Volumen (V) = 147,75 l = 0,14775 m³

Densidad (ρ) = 1000 kg/m³

Calor específico (C_p) = 4,18 kJ/kg-k⁰

Por lo tanto,

$$m = \rho V; \quad m = 147,75 \text{ kg} \quad [3]$$

La eficiencia instantánea se evalúa con el calor útil o el calor absorbido por el fluido térmico Q_n la irradiación solar térmica H_n presente este valor se toma en base al promedio de la radiación que se encuentra en esta zona el cual es de 5,1 kwh/m²; según el atlas colombiano de radiación solar [6]. (Ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**); y el área del colector $A_C = 2,06m$, como se define en la siguiente ecuación.

$$\eta_{inst(n)} = \frac{Q_n}{H_n * A_C} \quad [4]$$

$\eta_{inst(n)}$: es la eficiencia instantánea del sistema

Donde, Q_n es el calor entregado al fluido en el colector y se determina con la siguiente ecuación:

$$Q_n = m \cdot C_p \cdot T_{tanque} - T_{ent} \quad [5]$$

Un ángulo tan elevado no permite que los rayos del sol penetren paralelamente a la normal de la superficie del colector, ocasionando pérdida de la eficiencia del colector.

4.3. Análisis de Datos

Toda la información fue recogida dentro de un rango de tiempo en el que la radiación sigue siendo alta en esa ubicación. Se escogió el tiempo entre las 3 pm y 4 pm, en ese instante, el colector sale de percibir la mayor cantidad de radiación de las 11 am a 1 pm en el que también alcanzaría la máxima temperatura en el tanque, de ahí se conservaría el calor casi que constante hasta finalizar la tarde.

I. Análisis de la Tabla 4

Tabla 4. Medición de radiación solar y temperaturas del colector a 53° de inclinación (Montaje inicial).

		w/m ²	T amb °C	T ent °C	T tanque °C	Calor Q (wh)	Eficiencia (η) (%)
27-oct-13	1	334	21	21	63	7205	68
	2	357	21.2	20.8	63.4	7308	69
	3	401	20.7	19.3	63	7497	71
	4	580	21	20.4	63.4	7377	70
	5	801	20.8	21.3	64.1	7343	69
	6	544	21	20.6	63.1	7291	69
	7	782	19.6	19.6	63.1	7463	70
	8	752	20	20.1	63.1	7377	70
	9	680	20.9	20.4	63.2	7343	69
	10	393	20.8	20.2	63	7343	69
	11	790	21	19.7	63.2	7463	70
	12	719	21.1	20.1	63	7360	69
	prom	594	20.8	20.3	63.2	7364	69
	1	401	20.9	26.7	74	8115	76
	2	550	22.3	26.8	74.5	8183	77
	3	601	22.6	26.7	73.9	8097	76
	4	801	21.9	26.5	74.1	8166	77
	5	407	21.3	26.6	74.2	8166	77

6	752	21.8	26.7	74.1	8132	77
7	604	22.1	26.6	74.3	8183	77
8	449	22.9	26.9	73.8	8046	76
9	401	22.3	26.8	73.9	8080	76
10	654	21.3	26.6	73.7	8080	76
11	711	21.6	26.6	73.9	8115	76
12	511	21.3	26.7	73.7	8063	76
prom	570	21.9	26.7	74.0	8119	77
1	350	21.3	23	70.1	8080	76
2	292	21.4	22.2	68.4	7926	75
3	288	21.5	22.9	68.6	7840	74
4	320	21.4	23.1	68.4	7771	73
5	299	21.2	22.8	68.7	7874	74
6	302	21.7	22.8	69.4	7994	75
7	327	21.5	22.9	69.3	7960	75
8	689	21.6	22.9	69.5	7994	75
9	602	21.5	22.7	69.6	8046	76
10	581	20.9	22.9	69.4	7977	75
11	462	21.8	22.8	70.1	8115	76
12	390	21.7	22.6	70.3	8183	77
prom	409	21.5	22.8	69.3	7980	75

T: temperatura

Amb: ambiente

Ent: Entrada

Prom: promedio

Fuente: Autor

El colector presenta constantes fluctuaciones de temperatura, se considera que lo ocasiona el flujo de aire en el lugar y las variaciones de radiación solar, otro factor primordial son los instrumentos de medición, debido a que no se encontraban fijos, sino que al momento de monitorear eran cambiados constantemente de sitio, se hizo un comparativo de los valores recogidos en el campo con otros tomados en instituciones certificadas y reconocidas (IDEAM), demostrándose varias coincidencias, por lo tanto validan los datos de la medición de la radiación solar que se recopiló en este trabajo. Para calcular la eficiencia la radiación solar térmica se tomó en base al rango máximo de radiación solar medio para la región andina según (6).

I. Análisis Tabla 5

La modificación del colector solar arrojaron los siguientes datos:

Tabla 5. Datos del colector inclinado 10° (Montaje modificado, sobre techo)

	w/m ²	T amb °C	T ent °C	T tanque °C	Calor Q (Wh)	Eficiencia (%)	
05-dic-13	1	607	21.0	21.0	78.9	9933	94
	2	529	22.0	20.8	77.6	9744	92
	3	708	22.5	20.7	76.9	9641	91
	4	600	21.0	20.4	77.0	9710	92
	5	491	20.9	20.4	78.1	9899	93
	6	390	21.0	20.6	79.9	10173	96
	7	566	21.9	20.4	79.7	10173	96
	8	650	20.0	20.1	79.0	10105	95
	9	752	20.5	20.4	78.3	9933	94
	10	543	20.3	20.4	78.4	9950	94
	11	508	21.0	20.3	77.9	9882	93
	12	716	20.7	20.6	78.4	9916	93
	prom	588	21.1	20.5	78.3	9922	94
	1	387	21.0	21.0	78.9	9933	94
	2	405	22.0	20.8	78.9	9967	94
	3	663	17.4	19.3	78.8	10207	96
	4	600	21.0	20.4	79.0	10053	95
	5	532	18.0	21.3	79.0	9899	93
	6	390	21.0	20.6	79.1	10036	95
	7	566	19.6	19.6	78.9	10173	96
	8	481	20.0	20.1	79.0	10105	95
	9	475	18.0	20.4	78.9	10036	95
	10	521	18.0	20.2	78.8	10053	95
	11	673	18.0	19.7	78.8	10139	96
	12	750	18.0	20.1	78.9	10087	95
prom	537	19.3	20.3	78.9	10057	95	
09-dic-13	1	598	20.8	21.0	78.5	9864	93
	2	703	20.6	20.8	77.8	9779	92
	3	528	20.7	21.3	79.0	9899	93
	4	650	20.5	21.1	78.6	9864	93
	5	690	21.0	21.3	78.3	9779	92
	6	509	20.5	20.8	78.7	9933	94
	7	552	20.5	21.1	78.6	9864	93
	8	574	20.0	20.9	79.2	10002	94
	9	423	20.9	20.4	78.5	9967	94
	10	425	20.5	20.9	78.0	9796	92
	11	489	20.8	20.8	78.3	9864	93
	12	576	21.1	21.1	78.8	9899	93
	prom	560	20.7	21.0	78.5	9876	93

Fuente: Autor

Al momento de disminuir el ángulo del colector, se observó un aumento significativo de temperatura, un promedio de 10°C más caliente que el montaje original, entregando un mayor calor útil, También hay que tener en cuenta que las mediciones se hicieron en el momento en que el colector podría brindar un mayor rendimiento, o sea en los momentos en los cuales había más brillo solar, otro factor que se considera esencial para obtener una eficiencia tan alta se debe al ΔT de temperatura, ya que el agua llega a muy baja temperatura, y el colector debido al mayor aprovechamiento del brillo solar, va a calentar la masa de agua mucho más rápido, y permanece almacenada por un periodo relativamente largo de tiempo.

Los instrumentos de medición como se explicaba con anterioridad, influyeron de manera importante en los datos.

5. COSTOS

Para calcular el costo total de proyecto se tiene en cuenta: la mano de obra en fabricación y diseño, tiempo de pruebas, el costo de materiales, costos insumos, costos adicionales.

Mano de obra:

El proyecto fue realizado por el autor, acorde a su nivel académico (bachiller sin educación media), se procede a calcular el costo de la mano de obra, costo de diseño y el tiempo de pruebas, teniendo en cuenta el SMMLV el cual equivale a \$589.500 pesos. Para el ejercicio se omitirá el valor prestacional, por ser una actividad netamente académica. Ahora para calcular el valor hora de un trabajador se realiza de la siguiente forma:

$$\text{Hora hombre}(\$) = \frac{\text{salario base}}{\text{Horas de trabajo al mes}} \quad [6]$$

En la siguiente tabla se describe las operaciones que se realizaron en todo el proyecto.

Tabla 6. Costos mano de obra

MANO DE OBRA				
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO (\$)	COSTO (\$)
Desarme de estructura	hora	2	2456,25	4912,5
Diseño de la base	hora	12	2456,25	29475
Fabricación de la base	hora	20	2456,25	49125
Pruebas y mediciones	hora	6	2456,25	14738
TOTAL				98250

Fuente: El autor

Consumibles:

Es el conjunto de bienes que por su naturaleza se extinguen por causa de su empleo en la producción del proyecto.

Tabla 7. Costos de insumos.

CONSUMIBLES				
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO (\$)	COSTO (\$)
Broca hss 7/16"	Unidad	1	2200	2200
Broca hss 5/16"	Unidad	1	1700	1700
Broca hss 1/4"	Unidad	1	1600	1600
segueta 12"	Unidad	1	1600	1600
Tinner	gal	1/4	6800	1700
pintura anticorrosiva	gal	3/16	23600	4425
Soldadura para PVC	gal	1/32	294000	9187,5
segueta 12"	Unidad	1	1600	1600
			TOTAL	24013

Fuente: el autor

Costo de materiales:

Hace alusión a las compras hechas para poner en funcionamiento el calentador solar. Los valores son del mes de octubre y noviembre del año 2013. Se catalogan como material de fabricación.

Tabla 8. Costo de materiales

MATERIALES				
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO (\$)	COSTO (\$)
Perfil L 2" acero 1020	m	12	5333	64000
Tornillo 1" cabeza hexagonal 3/8"	Unidad	14	200	2800
Tuerca 3/8"	Unidad	14	100	1400
Arandela 3/8"	Unidad	14	40	560
Alambre calibre 18 galvanizado	m	3	300	900
Cemento	kg	6	700	4200
Arena	kg	10	60	600
Gravilla	kg	12	60	720
Codo PVC 1/2"	Unidad	1	700	700
Tee PVC 1/2"	Unidad	1	800	800
Semicodo PVC 1/2"	Unidad	2	700	1400
Unión roscada PVC 1/2"	Unidad	2	1200	2400
Reductor PVC 1" a 1/2"	Unidad	1	800	800
Acople PVC 1"	Unidad	4	900	3600

Tee PVC 1"	Unidad	1	1500	1500
Codo PVC 1"	Unidad	5	900	4500
Semicodo PVC 1"	Unidad	1	800	800
Tubo PVC 1"	m	3	2000	6000
Tubo PVC 1/2"	m	0,5	1300	650
			TOTAL	98330

Fuente: el autor

Costos adicionales:

Son aquellos en que se tuvo que incurrir de manera imprevista, accidental e indirectamente para concluir la elaboración del proyecto, durante el proyecto.

Tabla 9. Costos adicionales

COSTOS ADICIONALES				
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO (\$)	COSTO (\$)
Transporte	pasaje	20	1700	34000
tubo a vacío (repuesto)	Unidad	1	29900	29900
Termocupla	Unidad	1	17000	17000
Costo de envío Tubo a vacío	Unidad	1	22000	22000
Papelería y otros	Unidad	1	30000	30000
			TOTAL	132900

Fuente: el autor

Costos totales:

Es el valor total del costo que incluye el valor final de las tablas anteriores.

Tabla 10. Costo total

COSTO TOTAL	
Mano de obra	98250
Materiales	98330
Consumibles	24013
Costos adicionales	132900
TOTAL	353492

Fuente: el autor

6. CONCLUSIONES

- La eficiencia mejoró considerablemente. Actualmente se alcanzan temperaturas de agua a la salida del colector de 90°C, superiores a la configuración anterior que solo alcanzaba los 60°C.
- La posición del calentador solar con respecto al sol es importante para mejorar el rendimiento del mismo, una buena inclinación es aquella que se encuentre cercana la latitud del punto donde se vaya a instalar el colector solar. Por lo tanto se concluye que el ángulo de colocación es relativamente insensible, permitiendo la libertad estética arquitectónica, siempre y cuando la inclinación de las superficies no sea inferior o superior a 4° y 14° respectivamente.
- Es necesaria que la eficiencia del calentador solar se mantenga en un 80% a 90% porque si se supera, se corre el riesgo de que el agua cambie de estado, pasará a producir vapor de agua y el sistema no está diseñado para trabajar con vapor de agua. Si es así, se crearían fugas de agua por causa de la expansión y contracción de la tubería plástica; también se acelera la oxidación de los componentes metálicos.
- Aun estando el cielo nublado el colector puede seguir operando con radiación difusa que puede ser 80% menos que con el cielo totalmente despejado durante el día. El colector es capaz de asegurar rendimiento en días de invierno, nubosos e incluso con lluvia, puesto que absorben radiación difusa.
- Baja inercia térmica, se calienta rápidamente. Se comprobó que si el calentador solar se encuentra vacío totalmente y se empieza a llenar a las 9 de la mañana, con un cielo despejado y una temperatura ambiental de 23°C, el calentador puede llegar a la temperatura máxima en menos de 4 horas.
- La limpieza periódica del colector mantiene la eficiencia del calentador. Cada tubo es una unidad sellada, requiere poca mantención, y si es necesario se reemplaza a bajo costo.
- Los altos precios con los cuales son comercializados, aleja la posibilidad de que su uso sea generalizado. Porque su largo periodo de amortización desanima al comprador, y crea un pequeño nicho de mercado con un poder adquisitivo mayor, este es el que termina beneficiándose de este dispositivo.

7. RECOMENDACIONES

Es visto que el sistema calentador, colector, junto con su estructura original, fue diseñado para operar en condiciones muy distintas al contexto regional colombiano (latitud baja), así que era imposible que el colector proporcionara un buen rendimiento.

En caso de adquirir un colector, se debe tener en cuenta principalmente que su inclinación se encuentre alrededor de 10°.

El tanque de control del calentador quedó inclinado, hecho que genera dificultades en el mecanismo de cierre de la válvula flotador. Idealmente y por razones mecánicas debe estar a 90°, así se garantiza el funcionamiento correcto del mecanismo. Se deja una tarea posterior la adecuación del tanque de control.

Para su cuidado, mantenimiento y limpieza se deja la siguiente tabla como instructivo para alargar la vida y mantener en óptimo funcionamiento el colector.

Tabla 11. Instructivo general para el mantenimiento del calentador solar.

EQUIPO	FRECUENCIA (MESES)	DESCRIPCIÓN
Tubos captadores	3	Inspección visual buscando diferencias entre captadores. Limpieza con agua y productos adecuados.
Tanque acumulador	6	Revisión de fugas de los empaques de los tubos captadores y en la entrada y salida del agua. Inspección visual del estado general de tanque.
Carcasa	6	Inspección visual. Evitar corrosión de la lámina.
Estructura	3	Comprobar la rigidez de la estructura con una leve sacudida. Inspección visual para detectar la presencia de corrosión, en caso tal usar pintura anticorrosiva
Sistema de llenado	6	Revisar el tanque auxiliar, comprobar

		el buen cierre de la valvula flotador. Inspección visual para detectar la presencia de corrosión.
Tuberia de aislamiento	6	Inspección visual del estado de la espuma aislante, detectar tramos de tubería con ausencia de aislante y reparar.
Valvulas	6	Revisar el estado de las válvulas, y comprobar el buen funcionamiento de las mismas.
conexiones	3	Revisar fugas, goteras y grietas en las uniones.

Fuente: autor

8. BIBLIOGRAFIA

1. www.uclm.es. [En línea] [Citado el: 15 de marzo de 2014.] <http://oretano.iele-ab.uclm.es/~carrion/Bibliografia/M%C3%B3dulos%20Fotovoltaicos.pdf>.
2. *Guía practica de energia solar termica*. **energia, AVEN (Agencia valenciana de la**. Valencia (España) : La imprenta CG, 2008. V-1051-2008.
3. *Energia solar*. **Roldan, Cesar A. Isaza**. 2009. conferencia.
4. **Sanchéz, Miguel Angel**. 1.2.1 Sistemas de aprovechamiento de baja temperatura. *Energia solar termica*. Mexico D.F : Editorial Limusa, 2008.
5. **Pereira, Universidad Tecnologica de**. Temas de fisica. [En línea] [Citado el: 23 de diciembre de 13.] http://www.utp.edu.co/~publio17/temas_pdf/prop_fisicas.pdf.
6. **UPME**. *Atlas de radiación solar en Colombia*. Bogotá : s.n., 2005.
7. **Unidad de planeación minero energetica (UPME)-Intituto de hidrolologia, metereologia y estudios ambientales (IDEAM)**. *Atlas de radiación solar de Colombia*. Bogotá (Colombia) : s.n., 2005.
8. **Philpot, Timothy A**. Mecanica de materiales. *MD solids*. s.l. : MD solids, 1997-2014. 3.5.
9. Cengel, Yunus. 2009. fundamentos de transferencia de calor. 2009.