



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica

**PROPUESTA PARA EL EMPLEO DE ENERGÍA SOLAR COMO PARTE DEL PRECALENTAMIENTO  
DE AGUA EN LAS CALDERAS DEL HOSPITAL GENERAL SAN JUAN DE DIOS**

**Marco Antonio Quezada González**

Asesorado por el Ing. Elwin Idelfonso Elías Gramajo

Guatemala, octubre de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA PARA EL EMPLEO DE ENERGÍA SOLAR COMO PARTE DEL PRECALENTAMIENTO  
DE AGUA EN LAS CALDERAS DEL HOSPITAL GENERAL SAN JUAN DE DIOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**MARCO ANTONIO QUEZADA GONZÁLEZ**  
ASESORADO POR EL ING. ELWIN IDELFONSO ELÍAS GRAMAJO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO**

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Álvaro Antonio Ávila Pinzón
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Ruiz Hernández
EXAMINADOR	Ing. Sergio Torres Hernández
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**PROPUESTA PARA EL EMPLEO DE ENERGÍA SOLAR COMO PARTE DEL PRECALENTAMIENTO  
DE AGUA EN LAS CALDERAS DEL HOSPITAL GENERAL SAN JUAN DE DIOS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 18 de mayo de 2011.



**Marco Antonio Quezada González**

Guatemala, 26 de abril de 2013

Ingeniero  
Julio Cesar Campos Faiz  
Director de Escuela de Ingeniería Mecánica  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
Presente.

Por este medio me permito informar, que se procedió a la asesoría y revisión del trabajo de graduación titulado **"PROPUESTA PARA EL EMPLEO DE ENERGIA SOLAR COMO PARTE DEL PRECALENTAMIENTO DE AGUA EN LAS CALDERAS DEL HOSPITAL GENERAL SAN JUAN DE DIOS"** elaborado por el estudiante Marco Antonio Quezada González, y después de haberle realizados las correcciones pertinentes considero que cumple los objetivos trazados.

Por lo tanto hago de su conocimiento que, a mi criterio, el trabajo presentado reúne los requisitos necesarios para continuar el proceso correspondiente.

Atentamente,



*Ing. Elwin Elias Gramajo  
Colegiado No. 4784  
Ingeniero Mecanico*

Ingeniero Elwin Idelfonso Elias Gramajo  
Colegiado 4784



**USAC**

TRICENTENARIA

Universidad de San Carlos de Guatemala

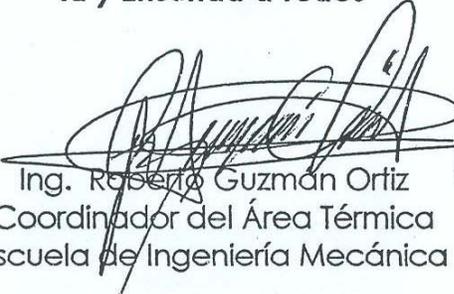
Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.Mecanica.278.2014

El Coordinador del Área Térmica, de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado **PROPUESTA PARA EL EMPLEO DE ENERGÍA SOLAR COMO PARTE DEL PRECALENTAMIENTO DE AGUA EN LAS CALDERAS DEL HOSPITAL GENERAL SAN JUAN DE DIOS**. Del estudiante **Marco Antonio Quezada González**, recomienda su aprobación.

*"Id y Enseñad a Todos"*

  
Ing. Roberto Guzmán Ortiz  
Coordinador del Área Térmica  
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, Octubre de 2014.



**USAC**

TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.317.2015

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y con la aprobación del Coordinador del Área Térmica del trabajo de graduación titulado: **PROPUESTA PARA EL EMPLEO DE ENERGÍA SOLAR COMO PARTE DEL PRECALENTAMIENTO DE AGUA EN LAS CALDERAS DEL HOSPITAL GENERAL SAN JUAN DE DIOS** del Estudiante **Marco Antonio Quezada González**, Carné No. **9712635** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

**"Id y Enseñad a Todos"**

  
Ing. Roberto Guzmán Ortiz  
Director  
Escuela de Ingeniería Mecánica



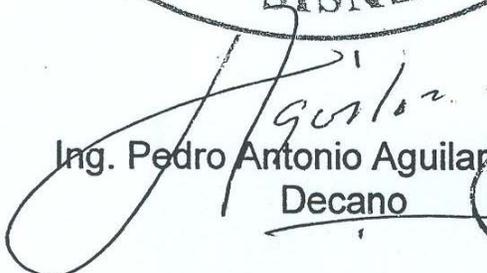
Guatemala, octubre de 2015

/aej



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al trabajo de graduación titulado: **PROPUESTA PARA EL EMPLEO DE ENERGIA SOLAR COMO PARTE DEL PRECALENTAMIENTO DE AGUA EN LAS CALDERAS DEL HOSPITAL GENERAL SAN JUAN DE DIOS**, presentado por el estudiante universitario: **Marco Antonio Quezada González**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Blanco  
Decano



Guatemala, octubre de 2015

/cc

## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por ser mi guía en este largo camino que me ha traído hoy aquí y darme la fuerza para seguir adelante.
- Mis abuelos** María Olimpia Díaz Desalvi y Mariano Quezada Lara, en especial a mi abuela, por ser ella quien con su amor y dedicación me llevó a alcanzar este logro, siempre estarás en mi corazón, gracias mamá.
- Mi padre** Fernando Quezada Díaz, por brindarme su cariño y apoyo a lo largo de estos años.
- Mis hermanos** Mariano y Fernando Quezada, por su incondicional apoyo a lo largo de mi vida.
- Mi tío** Dr. Marco Antonio Quezada Díaz, por ser un ejemplo de excelencia académica y como persona de bien.
- Mis amigos** De la infancia y compañeros de universidad, gracias por compartir gratos momentos.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por permitir mi formación como profesional.
<b>Hospital General San Juan de Dios</b>	Por permitirme hacer las prácticas finales y trabajo de graduación en esta institución.
<b>Asesor</b>	Ing. Elwin Idelfonso Elías Gramajo, por su tiempo y apoyo en la realización de mi trabajo de graduación.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SIMBOLOS .....	IX
GLOSARIO .....	XIII
RESUMEN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
INTRODUCCIÓN .....	XXI
1. ENERGÍA SOLAR .....	1
1.1. Introducción a la termodinámica.....	1
1.2. Transferencia de calor.....	5
1.2.1. Conducción.....	6
1.2.2. Convección.....	7
1.2.3. Radiación.....	9
1.3. Fluidos.....	12
1.4. Uso racional y eficiente de la energía.....	13
1.5. Tecnologías de energías renovables.....	14
1.6. Naturaleza de la energía solar.....	16
1.7. Estructura solar .....	18
1.8. Constante solar .....	19
1.9. Radiación solar sobre la superficie de la tierra .....	22
1.10. Tipos de radiación terrestre .....	24
1.11. Ángulos solares .....	30
1.12. Radiación directa sobre el plano inclinado .....	37
1.13. Guatemala y la radiación solar .....	40

2.	COLECTORES SOLARES .....	41
2.2.	Tipos de colectores solares.....	41
2.2.1.	Colectores de placa.....	41
2.2.2.	Colectores de tubo evacuado.....	44
2.2.3.	Colectores concentrados.....	46
2.3.	Cubierta del colector plano.....	49
2.3.1.	Cubiertas transparentes .....	49
2.3.2.	Captadores.....	54
2.3.2.1.	Capas de absorción.....	54
2.3.3.	Aislantes.....	62
2.3.4.	La caja del colector .....	64
2.4.	Comparación del rendimiento térmico.....	68
2.4.1.	Eficiencia del colector.....	69
3.	CÁLCULO Y DIMENSIONAMIENTO DE COLECTORES SOLARES.....	79
3.1.	Capacidad del sistema .....	79
3.2.	Cálculo del colector solar .....	79
3.3.	Dimensionamiento del colector .....	84
3.4.	Cálculo del termotanque .....	86
3.4.1.	Cálculo del aislante .....	87
4.	INVESTIGACIÓN.....	89
4.1.	Antecedentes de operación del Hospital General San Juan de San Juan de Dios.....	89
4.2.	Sistema de distribución de vapor .....	90
4.2.1.	Vapor centralizado .....	90
4.2.1.1.	Intercambio directo.....	90
4.2.1.2.	Vapor generado por resistencia eléctrica.....	91

5.	SISTEMA PROPUESTO .....	93
5.1.	Descripción del sistema propuesto .....	93
5.2.	Desarrollo del sistema propuesto .....	96
5.3.	Ecuaciones y utilidad en la estimación de la temperatura que alcanza el colector solar .....	99
6.	ANÁLISIS ECONÓMICO.....	115
6.1.	Costos del equipo.....	115
6.1.1.	Recuperación de la inversión .....	115
6.2.	Beneficios económicos .....	117
6.3.	Resumen de resultados.....	117
6.4.	Comentarios .....	118
	CONCLUSIONES .....	119
	RECOMENDACIONES.....	121
	BIBLIOGRAFÍA.....	123
	APÉNDICES .....	125



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Procesos de absorción y dispersión en la atmósfera .....	20
2.	Espectros solares fuera de la atmósfera y sobre la superficie terrestre.....	21
3.	Distribución espectral de la irradiación solar directa a una incidencia normal en días despejados .....	26
4.	Latitud, ángulo horario y declinación del Sol .....	31
5.	Altura solar $\beta$ y ángulo acimutal $\Phi$ .....	35
6.	Acimut solar de pared $\gamma$ , acimut de pared $\psi$ y ángulo de inclinación $\alpha$ para superficies inclinadas .....	36
7.	Radiación directa sobre el plano inclinado .....	37
8.	Colector de placa plana típico .....	41
9.	Colector de tubo evacuado .....	45
10.	Colector concentrador .....	46
11.	Colector de cubeta con lente de Fresnel.....	47
12.	Colector parabólico compuesto .....	48
13.	Sección transversal de un colector plano básico .....	50
14.	Caminos que sigue la radiación en un colector plano .....	52
15.	Características de rendimiento hipotéticas de una superficie selectiva ideal .....	55
16.	Sección de superficie selectiva de uso frecuente.....	56
17.	Seis tipos de placa de absorción de uso frecuente .....	60
18.	Métodos para sellar cubiertas sencillas y dobles .....	66
19.	Rendimiento térmico de un colector solar .....	70

20.	Disminución de la eficiencia del colector por la variación de la energía solar incidente.....	71
21.	Grafica ASHRAE típica de rendimiento térmico de un colector solar....	72
22.	Curvas representativas ASHRAE 93-77del rendimiento de colectores planos del tipo líquido.....	74
23.	Curvas ASHRAE de tres colectores de tipo aire.....	77
24.	Croquis para localizar las variables $W$ , $D_i$ , y $\delta$ ...	82
25.	Dimensiones de una placa colectora de radiación típica .....	84
26.	Configuración típica de una placa colectora y termotanque .....	85
27.	Dimensiones de un termotanque de 300 litros.....	85
28.	Croquis del aislante en un termotanque y variables $R_c$ y $r_i$ para calcular su espesor.....	87
29.	Diagrama de flujo del equipo generador de vapor con los colectores solares .....	95
30.	Vista en planta de los colectores necesarios para el sistema de precalentamiento de las calderas .....	96

## TABLAS

I.	Intervalos de longitudes de onda y frecuencias aproximadas de los diferentes tipos de radiación .....	24
II.	Datos solares para los días 21 de cada mes .....	28
III.	Materiales que se emplean para componentes de un colector solar ....	44
IV.	Comparación de diversos materiales que usan para cubiertas y rendimiento relativo de los cuatro colectores solares .....	53
V.	Recomendaciones sobre imprimadores y preparación de superficies cuando se usan selladores de silicón .....	67
VI.	Rendimiento relativo de cuatro colectores solares .....	75

VII.	Temperaturas de entrada de un colector tomando niveles de radiación (I) y temperaturas ambientales diferentes... ..	76
VIII.	Ángulo horario o de incidencia (h) para los días 21 de cada mes, unidades en grados.....	105
IX.	Altura solar ( $\beta$ ) para los días 21 de cada mes, unidades en grados ...	106
X.	Acimut solar ( $\Phi$ ) para los días 21 de cada mes, unidades en grados .	106
XI.	Irradiación directa perpendicular $G_{ND}$ (Btu/h·p <sup>2</sup> ) .....	109
XII.	Radiación directa $G_D$ (Btu/h·p <sup>2</sup> ) .....	109
XIII.	Radiación difusa $G_d$ (Btu/h·p <sup>2</sup> ) .....	110
XIV.	Radiación total $G_t$ (Btu/h·p <sup>2</sup> ) .....	110
XV.	Radiación total promedio que llega al colector solar el 21 de cada mes .....	111
XVI.	Temperatura de salida del colector durante las horas de sol utilizando las radiaciones solares promedio.....	113



## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
$\Phi$	Acimut solar
$\gamma$	Acimut solar de pared
$\beta$	Altura solar, ángulo de inclinación
$\theta$	Ángulo de incidencia
$\psi$	Ángulo del cenit solar, acimut de pared
$h$	Ángulo horario
$S$	Ángulo para un plano inclinado, radiación global
$A_c$	Área del colector
<b>BHP</b>	Boiler horsepower (caballo de fuerza de caldera)
$Q$	Calor
$Q_d$	Calor demandado
$C_p$	Calor específico
$Q_u$	Calor útil
<b>cal</b>	Caloría
<b>cm<sup>2</sup></b>	Centímetro cuadrado
$U_L$	Coefficiente total de pérdidas de calor
$C_b$	Conductancia de la soldadura
$k$	Conductividad térmica
$k_b$	Conductividad térmica en una soldadura
$\sigma$	Constante de Boltzmann
$G_0$	Constante solar
<b>DST</b>	Day saving time (hora de verano)
$d$	Declinación

$\rho$	Densidad
<b>D</b>	Diámetro interno
<b><math>\Delta T</math></b>	Diferencial de temperatura
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono
<b>EOT</b>	Ecuación del tiempo
<b>F</b>	Eficacia de la aleta
$\epsilon_p$	Emitancia de la placa
$\epsilon_g$	Emitancia del vidrio
<b>E</b>	Energía
<b>U</b>	Energía interna
<b>T<math>\alpha</math></b>	Energía transmitida y absorbida por una placa
<b>L</b>	Espesor del aislante
<b>R</b>	Factor de aislamiento
<b>F'</b>	Factor de eficiencia del colector
<b>h<sub>w</sub></b>	Factor de relación entre el coeficiente de Transferencia de calor al ambiente con la velocidad del viento
<b><math>\dot{m}</math></b>	Flujo másico
<b><math>\dot{V}</math></b>	Flujo volumétrico
<b>H<sub>2</sub>O</b>	Fórmula química del agua
<b>gal</b>	Galón
<b>GPH</b>	Galones por hora
<b>N<sub>2</sub></b>	Gas nitrógeno
<b>°C</b>	Grado Celsius
<b>°F</b>	Grado Fahrenheit
<b>g</b>	Gramo
<b>h</b>	Hora
<b>MST</b>	Hora estándar de la montaña
<b>CST</b>	Hora estándar del centro

<b>EST</b>	Hora estándar del este
<b>PST</b>	Hora estándar del pacífico
<b>G<sub>s</sub></b>	Irradiación solar
<b>J</b>	Joule
<b>K</b>	Kelvin
<b>km</b>	Kilometro
<b>kW</b>	Kilo Watt
<b><i>l</i></b>	Latitud
<b>PSI</b>	Libra por pulgada cuadrada
<b>L</b>	Litro
<b><i>L</i></b>	Longitud
<b><math>\lambda</math></b>	Longitud de onda
<b>m</b>	Masa
<b>m<sup>2</sup></b>	Metro cuadrado
<b><math>\mu\text{m}</math></b>	Micro metro
<b>N</b>	Número de cubiertas de vidrio
<b>O<sub>3</sub></b>	Ozono
<b>U<sub>l</sub></b>	Pérdidas de calor
<b>U<sub>b</sub></b>	Pérdidas hacia abajo
<b>U<sub>t</sub></b>	Pérdidas hacia arriba
<b>ft<sup>2</sup></b>	Pie cuadrado
<b>p<sup>2</sup></b>	Pie cuadrado
<b>%</b>	Porcentaje
<b>G</b>	Proporción de flujo de agua por unidad de área
<b>G<sub>d</sub></b>	Radiación difusa
<b>G<sub>ND</sub></b>	Radiación directa
<b>G<sub>R</sub></b>	Radiación reflejada
<b>G<sub>t</sub></b>	Radiación total
<b>RTD</b>	Radiación total diaria

<b>R<sub>c</sub></b>	Radio crítico
<b>r<sub>i</sub></b>	Radio interno
<b>Fr.</b>	Razón de extracción de calor
<b>C</b>	Relación entre irradiación difusa y la directa
<b>s</b>	segundo
<b>T<sub>a</sub></b>	Temperatura ambiente
<b>T<sub>e</sub></b>	Temperatura de entrada
<b>T<sub>p</sub></b>	Temperatura de la placa
<b>T<sub>0</sub></b>	Temperatura inicial
<b>t</b>	Transmisibilidad de cubierta
<b>Btu</b>	Unidad térmica británica
<b>w</b>	Vapor de agua
<b>C</b>	Velocidad de la luz
<b>v</b>	Velocidad del viento
<b>V</b>	Volumen
<b>W</b>	Watt

## GLOSARIO

<b>Absortancia</b>	Es la fracción de la radiación incidente sobre un cuerpo que es absorbida por el mismo.
<b>Aglutinante</b>	Material capaz de unir fragmentos de uno o más materiales para formar un conjunto compacto.
<b>Aislante</b>	Es un material que impide la transmisión de la energía en cualquiera de sus formas.
<b>ASHRAE</b>	American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers (Asociación Americana de Calefacción, Refrigeración y Acondicionamiento de Aire)
<b>Calor específico</b>	Cantidad de energía necesaria para elevar un grado Celsius un kilogramo de agua.
<b>Calor</b>	El calor está definido como la forma de energía que se transfiere entre diferentes cuerpos o diferentes zonas de un mismo cuerpo que se encuentran a distintas temperaturas.
<b>Caloría</b>	Unidad de energía del sistema técnico de unidades basadas en el calor específico del agua.

<b>Celda de combustible</b>	Dispositivo electroquímico de conversión de energía diseñada para permitir el reabastecimiento continuo de los reactivos consumidos; produce electricidad de una fuente externa de combustible y de oxígeno.
<b>Colector solar</b>	Es cualquier dispositivo diseñado para recoger la energía radiada por el sol y convertirla en energía térmica.
<b>Cuerpo negro</b>	Es un objeto teórico o ideal que absorbe toda la luz y toda la energía radiante que incide sobre él.
<b>Emitancia</b>	Proporción de radiación térmica emitida por una superficie en relación a la de un cuerpo negro.
<b>Energía cinética</b>	Energía que adquiere una masa en función de su velocidad.
<b>Energía interna</b>	Suma de las energías cinéticas de todas sus partículas constituyentes, más la suma de todas las energías potenciales de interacción entre ellas.
<b>Energía potencial</b>	Es la energía que adquiere una masa en función de su posición.
<b>Energías renovables</b>	Energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables.

<b>Flujo másico</b>	Cantidad de masa por unidad de tiempo que fluye por un conducto.
<b>Flujo volumétrico</b>	Cantidad de volumen por unidad de tiempo que fluye un conducto.
<b>Gradiente de temperatura</b>	Es el cambio de temperatura en función de una o más variables o el cambio de la temperatura a lo largo de una o más direcciones.
<b>Longitud de onda</b>	Se define como la distancia entre dos puntos sucesivos situados en la misma fase de un movimiento ondulatorio.
<b>Piro heliómetro</b>	Instrumento que mide la radiación solar directa.
<b>Planta geotérmica</b>	Planta de generación eléctrica que aprovecha el calor proveniente del magma en la corteza terrestre para generar vapor y usar la energía cinética de este para mover turbinas conectadas a generadores eléctricos.
<b>Quemador</b>	Dispositivo que inyecta el combustible en una caldera para combinarlo con oxígeno y calor y producir una flama de alto poder calorífico.
<b>Reflectancia</b>	Cantidad de energía que es reflejada por un objeto luego de que esta incide sobre él.

<b>Superficie selectiva</b>	Superficie cuyas propiedades ópticas de reflectancia, observancia, transmitancia y emitancia dependen de la longitud de onda.
<b>Termoplástico</b>	Los termoplásticos son polímeros de alto peso molecular que se vuelven líquidos cuando se los calienta y sólidos vidriosos cuando se los enfría.
<b>Termodinámica</b>	Ciencia que trata acerca de la transformación de energía térmica en energía mecánica y el proceso inverso y la conversión de trabajo en calor.
<b>Termotanque</b>	Tanque para almacenar un fluido cubierto con una capa exterior de aislante térmico que permite la conservación de la temperatura interna.
<b>Transmitancia</b>	La transmitancia o transmitencia es una magnitud que expresa la cantidad de energía que atraviesa un cuerpo por unidad de tiempo (potencia).

## RESUMEN

En el primer capítulo, se tratan los conceptos generales de termodinámica y transferencia de calor, después se desarrolla el tema de las tecnologías de energías renovables, luego se aborda la energía solar y sus efectos en la tierra, los tipos de radiación, el cálculo de ángulos solares y la radiación en un plano inclinado, y por último la radiación solar en Guatemala.

En el segundo capítulo, el tema principal son los colectores solares, los diferentes tipos de colectores que existen y por último se habla del colector plano, sus componentes y eficiencia.

En el tercer capítulo, se exponen los procedimientos para el cálculo y dimensionamiento de un colector solar.

En el cuarto capítulo, se investiga cómo opera el Hospital General San Juan de Dios y como funciona su sistema de distribución de vapor.

En el quinto capítulo, se describe cómo será el sistema propuesto y su operación, después se calcula la temperatura, calor y radiación captada en el colector con las radiaciones promedio se procede al cálculo de temperaturas que se obtienen a lo largo del día, para determinar si el colector es el adecuado para el sistema propuesto.

En el sexto y último capítulo, se hace mención de los costos del equipo, así como el cálculo y análisis de los beneficios de la implementación de un sistema de captación de radiación solar.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Realizar un estudio para determinar la factibilidad de precalentar el agua de las calderas del Hospital General San Juan de Dios, con un sistema de colectores solares para el ahorro de combustible.

### **Específicos**

1. Cuantificar los requerimientos energéticos del sistema propuesto.
2. Proponer la ubicación y diseño de la instalación de los colectores solares.
3. Determinar la cantidad de colectores solares que se requieren para precalentar las calderas del hospital.
4. Comparar el precalentamiento del agua de las calderas de combustible fósil contra el precalentamiento utilizando energía solar, para cuantificar los beneficios económicos de la implementación de un equipo que utilice energía renovable.
5. Determinar la recuperación de la inversión y cuantificar los beneficios económicos por la implementación del sistema propuesto.



## INTRODUCCIÓN

En las instituciones de servicio público como los hospitales nacionales se hacen uso de calderas para generar vapor, estos equipos utilizan combustibles fósiles para transferir el calor de la combustión al agua que se encuentra en la caldera.

Las calderas del Hospital General San Juan de Dios tienen varios años de operación y como sucede con cualquier equipo que es sometido a ciclos continuos de trabajo, ya presentan desgaste y por consiguiente su eficiencia se ha visto afectada.

El consumo de combustible se ha elevado con el paso de los años por el deterioro de la red de vapor, por esta razón se busca una manera de reducir los costos de la compra de combustible, se propone hacer uso de colectores solares para el precalentamiento de las calderas, para determinar si se puede hacer uso de energías renovables para bajar los costos en compra de combustible.

Se hizo una investigación de las características de la caldera para determinar los requerimientos del sistema, para luego determinar el tamaño del sistema de captación solar y cuantificar el costo del sistema.

El uso de energía solar puede ayudar al ahorro de energía pero se requiere de estudios profesionales para determinar la factibilidad de su uso.



# 1. ENERGÍA SOLAR

## 1.1. Introducción a la termodinámica

La palabra termodinámica se deriva de las voces griegas *thermos*, que significa “calor”, y *dynamis*, que significa “fuerza” o “poder”, particularmente en su relación con el movimiento. Por ello, “termodinámica” significa literalmente “fuerza del calor”, lo cual podría denotar cosas tales como la transformación que se produce al quemar madera, carbón o petróleo.

En realidad, se utiliza en vez de la palabra calor la palabra energía, se establecerá con mayor precisión el significado y el campo de esta disciplina. Se trata de una ciencia que se ocupa en general de las transformaciones de la energía; la termodinámica proporciona los medios para su análisis.

La energía interna es uno de los más importantes conceptos en termodinámica. Cuando se habla de los cambios de energía de un cuerpo que se desliza con fricción, se dijo que calentar un cuerpo aumentaba su energía interna y que enfriarlo la disminuía. La energía interna se puede ver de varios modos; comenzando con uno basado en las ideas de la mecánica, se dice que la materia consiste en átomos y moléculas, y estas se componen de partículas que tienen energía cinética y potencial. Se define tentativamente la energía interna de un sistema como la suma de las energías cinéticas de todas sus partículas constituyentes, más la suma de todas las energías potenciales de interacción entre ellas.

La energía interna no incluye la energía potencial debido a la interacción entre el sistema y su entorno. Si el sistema es un vaso de agua, el colocarlo en una repisa alta aumenta su energía potencial gravitatoria, debido a la interacción entre el vaso y la Tierra, pero esto no afecta a la interacción entre las moléculas del agua, por lo que la energía interna del agua no cambia.

Se usa el símbolo "U" para la energía interna, (se usa el mismo símbolo para la energía potencial en mecánica. Se debe tener presente que "U" tiene un significado distinto en termodinámica). Durante un cambio de estado del sistema, la energía interna puede cambiar de un valor inicial  $U_1$  a un final  $U_2$ . Denotamos el cambio con:

$$\Delta U = U_1 - U_2 \quad (1-1)$$

Se sabe que la transferencia de calor es transferencia de energía. Se agrega cierta cantidad de calor  $Q$  a un sistema y este no realiza trabajo, la energía interna aumenta en una cantidad igual a es decir,  $\Delta U = Q$ .

Si el sistema efectúa un trabajo  $W$  expandiéndose contra su entorno y no se agrega calor, sale energía del sistema y "U" disminuye, es decir si "W" es positivo,  $\Delta U$  es negativo, y viceversa:  $\Delta U = -W$ , si ocurren tanto transferencia de calor como trabajo, el cambio total de energía interna es

$$U_2 - U_1 = \Delta U = Q - W \text{ (Primera ley de la termodinámica)} \quad (2-1)$$

$$Q = \Delta U + W \quad (3-1)$$

En general, cuando se agrega calor  $Q$  a un sistema, parte de esta energía agregada permanece en el sistema, cambiando su energía interna en una cantidad  $\Delta U$ ; el resto sale del sistema cuando este efectúa un trabajo.

$W$  contra su entorno. Puesto que  $W$  y  $Q$  pueden ser positivos negativos o,  $\Delta U$  puede ser positiva negativa o para diferentes procesos.

La ecuación anterior es la primera ley de la termodinámica, una generalización del principio de la energía para incluir la transferencia de energía como calor y como trabajo mecánico. Este principio puede extenderse a clases de fenómenos aun más amplias identificando formas adicionales de energía y transferencia de energía. En todas las situaciones en que parece que energía total en todas las formas conocidas no se conserva, ha sido posible identificar una nueva forma de energía tal que la energía total, incluida la nueva forma, si se conserva. Hay energía asociada a campos eléctricos, campos magnéticos.

Se define el cambio de energía interna  $\Delta U$  durante cualquier cambio de un sistema como la cantidad dada por la ecuación anterior.

$$\Delta U = Q - W \quad (4-1)$$

La base de la segunda ley de la termodinámica es la diferencia entre la naturaleza de la energía interna y la de la energía mecánica macroscópica. En un cuerpo se mueven todas las moléculas y tienen movimiento aleatorio, al que se superpone un movimiento coordinado de todas las moléculas en la dirección de la velocidad del cuerpo.

La energía cinética asociada a este movimiento macroscópico coordinado es lo que se llama energía cinética del cuerpo en movimiento.

Las energías cinética y potencial asociadas al movimiento aleatorio constituyen la energía interna.

Si un cuerpo que se desliza sobre una superficie se detiene a causa de la fricción, el movimiento organizado del cuerpo se convierte en movimiento aleatorio de las moléculas en el cuerpo y en la superficie.

No se puede controlar los movimientos de las moléculas individuales, no se puede convertir todo este movimiento organizado. Se convierte una parte y esto es lo que hace una máquina de calor.

Si la segunda ley no se cumpliera, podría impulsar un auto u operar una planta de electricidad enfriando el aire circundante, pues ninguna de estas imposibilidades viola la primera ley de la termodinámica. La segunda, por tanto, no se deduce de la primera sino que es una ley independiente de la naturaleza.

La primera ley niega la posibilidad de crear o destruir energía; la segunda limita la disponibilidad de la energía y las formas en que puede usarse y convenirse.

El calor fluye espontáneamente de los cuerpos más fríos a los más calientes, nunca al revés. Un refrigerador toma calor de un cuerpo más frío a uno más caliente, pero requiere un aporte de energía mecánica o trabajo.

Es imposible que un proceso tenga como único resultado la transferencia de calor de un cuerpo más frío a uno más caliente. La conversión de trabajo en calor, como en la fricción o el flujo de fluidos viscosos, y el flujo de calor de caliente a frío por un gradiente de temperatura finito, son procesos irreversibles.

Los gases se filtran espontáneamente por una abertura de una región de alta presión a una de baja presión; los gases y líquidos miscibles sin ser sometidos a ninguna perturbación siempre tienden a mezclarse, no a separarse.

La segunda ley de la termodinámica es una expresión del aspecto inherente unidireccional de estos y muchos otros procesos irreversibles.

La conversión de energía es un aspecto esencial de la vida y de la tecnología humana, así que la segunda ley tiene una importancia fundamental para el mundo en que se vive.

## **1.2. Transferencia de calor**

Si un cuerpo caliente se pone en contacto otro frío dice que el primero se enfría y el segundo se calienta hasta que ambos igualan sus temperaturas, esto es debido a una transferencia de energía del cuerpo caliente al frío. Esta energía, transferida a través de los límites de un sistema, en virtud de una diferencia de temperaturas, constituye el calor.

Es decir, el calor es un fenómeno transitorio. Se considera el cuerpo caliente como un sistema y el frío como otro, se llega a la conclusión de que originalmente ni uno ni otro contienen calor (pero sí energía). Al poner ambos sistemas en comunicación térmica el calor se transfiere del primero al segundo, hasta que se establece el equilibrio de temperatura. Ninguno de los sistemas contiene calor al final del proceso.

Existen tres formas distintas según las cuales el calor puede pasar de un cuerpo a otro y estas son conducción, convección y radiación.

Ocurre conducción dentro de un cuerpo o entre dos cuerpos en contacto. La convección depende del movimiento de una masa de una región del espacio a otra. La radiación es transferencia de calor por radiación electromagnética, como la luz del sol, sin que tenga que haber materia en el espacio entre los cuerpos.

### **1.2.1. Conducción**

En los sólidos, la única forma de transferencia de calor es la conducción. Si se calienta un extremo de una varilla metálica de forma que aumente su temperatura, el calor se trasmite hasta el extremo más frío por conducción.

No se comprende en su totalidad el mecanismo exacto de la conducción de calor en los sólidos, pero se cree que se debe, en parte, al movimiento de los electrones libres que transporten energía cuando existe una diferencia de temperatura.

Esta teoría explica porque los buenos conductores eléctricos también tienden a ser buenos conductores del calor. En 1882, el matemático francés Joseph Fourier dio una expresión matemática precisa que hoy se conoce como ley de Fourier de la conducción del calor. Esta ley afirma que la velocidad de conducción de calor a través de un cuerpo por unidad de sección transversal, es proporcional al gradiente de temperatura que existe en el cuerpo (con el signo cambiado).

El factor de proporcionalidad se denomina conductividad térmica del material. Los materiales como el oro o el cobre tienen conductividades térmicas elevadas y conducen bien el calor, mientras que materiales como el vidrio o el amianto tienen conductividades cientos e incluso miles de veces menor; conducen muy mal el calor, y se conocen como aislante.

En ingeniería resulta necesario conocer la velocidad de conducción del calor a través de un sólido, en el que existe una diferencia de temperatura conocida.

Para averiguarlo se requieren técnicas matemáticas muy complejas, sobre todo si el proceso varía con el tiempo; en este caso, se habla de conducción térmica transitoria.

La radiación es transferencia de calor por radiación electromagnética, como la luz del sol, sin que tenga que haber materia en el espacio entre los cuerpos.

Con la ayuda de computadoras analógicas y digitales, estos problemas pueden resolverse en la actualidad incluso para cuerpos de geometría complicada.

### **1.2.2. Convección**

Si existe una diferencia de temperatura en el interior de un líquido o un gas, es casi seguro que se producirá un movimiento del fluido. Si el movimiento transfiere calor de una parte del fluido a otra por un proceso llamado convección, el movimiento del fluido puede ser natural o forzado.

Si se calienta un líquido o un gas su densidad (masa por unidad de volumen) suele disminuir. Si el líquido o gas se encuentra en el campo gravitatorio, el fluido más caliente y menos denso asciende, mientras que el fluido más frío y más denso desciende. Este tipo de movimiento, debido exclusivamente a la no uniformidad de la temperatura del fluido, se denomina convección natural. La convección forzada se logra sometiendo el fluido a un gran gradiente de presiones, con lo que se fuerza su movimiento de acuerdo a las leyes de la mecánica de fluidos.

Suponiendo, por ejemplo, que se calienta desde abajo una cacerola llena de agua. El líquido más próximo al fondo se calienta por el calor que se ha transmitido por conducción a través de la cacerola. Al expandirse, su densidad disminuye y como resultado de ello el agua caliente asciende y parte del fluido más frío baja hacia al fondo, iniciando un movimiento de circulación. El líquido más frío vuelve a calentarse por conducción, mientras que el líquido más caliente situado arriba pierde parte de su calor por radiación y lo cede al aire situado por encima.

De forma similar, en una cámara vertical llena de gas, como la cámara de aire situada entre los dos paneles de una ventana con doble vidrio, el aire situado junto al panel exterior que está más frío desciende, mientras que al aire cercano al panel interior más caliente asciende, lo que produce un movimiento de circulación.

El calentamiento de una habitación mediante un radiador no depende tanto de la radiación como de las corrientes naturales de convección, que hacen que el aire caliente suba hacia el techo y el aire frío del resto de la habitación se dirija hacia el radiador.

Debido a que el aire caliente tiende a subir y el aire frío a bajar, los radiadores deben colocarse cerca del suelo (y los aparatos de aire acondicionado cerca del techo) para que la eficiencia sea máxima. De la misma forma, la convección natural es responsable de la ascensión del agua caliente y el vapor en las calderas de convección natural, y del tiro de las chimeneas.

La convección también determina el movimiento de las grandes masas de aire sobre la superficie terrestre, la acción de los vientos, la formación de nubes, las corrientes oceánicas y la transferencia de calor desde el interior del Sol hasta su superficie.

### **1.2.3. Radiación**

La radiación presenta una diferencia fundamental respecto a la conducción y la convección: las sustancias que intercambian calor no tienen que estar en contacto, sino que pueden estar separadas por un vacío.

La radiación es un término que se aplica genéricamente a todas las clases de fenómenos relacionados con ondas electromagnéticas. Algunos fenómenos de la radiación pueden describirse mediante la teoría de ondas, pero la única explicación general satisfactoria de la radiación electromagnética es la teoría cuántica.

En 1905, Albert Einstein sugirió que la radiación se comporta como minúsculos proyectiles llamados fotones y no como ondas. La naturaleza cuántica de la energía radiante se había postulado antes de la aparición del artículo de Einstein, y en 1900, el físico alemán Max Planck empleó la teoría cuántica y el formalismo matemático de la mecánica estadística, para derivar una ley fundamental de la radiación.

La expresión matemática de esta ley, llamada distribución de Planck, relaciona la intensidad de la energía radiante que emite un cuerpo en una longitud de onda determinada con la temperatura del cuerpo. Para cada temperatura y cada longitud de onda existe un máximo de energía radiante.

Solo un cuerpo ideal (cuerpo negro) emite radiación ajustándose exactamente a la ley de Planck. Los cuerpos reales emiten con una intensidad algo menor.

La contribución de todas las longitudes de onda a la energía radiante emitida se denomina poder emisor del cuerpo, y corresponde a la cantidad de energía emitida por unidad de superficie del cuerpo y por unidad de tiempo.

Como puede demostrarse a partir de la ley de Planck, el poder emisor de una superficie es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. El factor de proporcionalidad se denomina constante de Stefan-Boltzmann en honor a dos físicos austriacos, Joseph Stefan y Ludwing Boltzmann que, en 1879 y 1884 respectivamente, descubrieron esta proporcionalidad entre el poder emisor y la temperatura superior al cero absoluto. Cuanto mayor es la temperatura, mayor es la cantidad de energía emitida.

Además de emitir radiación, todas las sustancias son capaces de absorberla. Por eso, aunque un cubo de hielo emite energía radiante de forma continua, se funde si se ilumina con una lámpara incandescente porque absorbe una cantidad de calor mayor de la que emite.

Las superficies opacas pueden absorber o reflejar la radiación incidente. Generalmente, las superficies mates y rugosas absorben más calor que las superficies brillantes y pulidas.

Las superficies brillantes reflejan más energía radiante que las superficies mates. Además, las sustancias que absorben mucha radiación también son buenos emisores; las que reflejan mucha radiación y absorben poco son malos emisores. Por eso, los utensilios de cocina suelen tener fondos mates para una buena absorción y paredes pulidas para una emisión mínima con lo que maximizan la transferencia total de calor al contenido de la cazuela.

Algunas sustancias, entre ellas muchos gases y el vidrio, son capaces de transferir grandes cantidades de radiación.

Se observa experimentalmente que las propiedades de absorción, reflexión y transmisión de una sustancia dependen de la longitud de onda de la radiación incidente. El vidrio, por ejemplo, transmite grandes cantidades de radiación ultravioleta de baja longitud de onda, pero es un mal transmisor de los rayos infrarrojos de alta longitud de onda.

Una consecuencia de la distribución de Planck es que la longitud de onda a la que un cuerpo emite la cantidad máxima de energía radiante, disminuye con la temperatura.

La ley de desplazamiento de Wien, llamada así en honor al físico alemán Wilhelm Wien, es una expresión matemática de esta observación y afirma que la longitud de onda que corresponde a la máxima energía, multiplicada por la temperatura absoluta del cuerpo, es una expresión matemática de esta observación, y afirma que la longitud de onda que corresponde a la máxima energía, multiplicada por la temperatura absoluta del cuerpo, es igual a una constante de 2878 micrómetros-Kelvin. Este hecho, junto con las propiedades de transmisión del vidrio antes mencionadas, explica el calentamiento de los invernaderos.

La energía radiante del sol, máxima en las longitudes de onda visibles, se transmite a través del vidrio y entra en el invernadero. En cambio, la energía emitida por los cuerpos del interior del invernadero, predominantemente de longitudes de ondas mayores correspondientes al infrarrojo, no se transmiten al exterior a través del vidrio. Así, aunque la temperatura del aire exterior del invernadero se baja, la temperatura que hay dentro es mucho más alta porque se produce una considerable transferencia de calor neta hacia su interior.

Además de los procesos de transmisión de calor que aumentan o disminuyen las temperaturas de los cuerpos afectados, la transmisión de calor también puede producir cambios de fase, como la fusión del hielo o la ebullición del agua.

En ingeniería, los procesos de transferencia de calor suelen diseñarse de forma que aprovechen estos fenómenos. Por ejemplo, las cápsulas espaciales que regresan a la atmósfera de la Tierra a velocidades muy altas, están dotadas de un escudo térmico que se funde de forma controlada en un proceso llamado ablación, para impedir un sobrecalentamiento del interior de la cápsula. La mayoría del calor producido por el rozamiento con la atmósfera se emplea en fundir el escudo térmico y no en aumentar la temperatura de la cápsula.

### **1.3. Fluidos**

Fluido es aquella sustancia que debido a su poca cohesión intermolecular, carece de forma propia y adopta la forma del recipiente que lo contiene, los fluidos se clasifican en líquidos y gases.

Los líquidos a una presión y temperatura determinadas ocupan un volumen determinado. Introducido el líquido en un recipiente adopta la forma del mismo pero llenado solo el volumen que le corresponde. Si sobre el líquido reina una presión uniforme, por ejemplo, la atmosférica, el líquido adopta, como verá, una superficie libre plana, como la superficie de un lago o la de un cubo de agua.

Los gases a una presión y temperatura determinada tienen también un volumen determinado, pero puestos en libertad se expansionan hasta ocupar el volumen completo del recipiente que lo contiene, y no presentan superficie libre. En resumen, los sólidos ofrecen gran resistencia al cambio de forma y volumen; los líquidos ofrecen gran resistencia al cambio de volumen, pero no de forma; y los gases ofrecen poca resistencia al cambio de forma y de volumen.

Por tanto, el comportamiento de líquidos y gases es análogo en conductos cerrados (tuberías); pero no en conductos abiertos (canales), porque solo los líquidos son capaces de crear una superficie libre. En general los sólidos y los líquidos son poco compresibles y los gases muy compresibles; pero ningún cuerpo (sólido, líquido o gaseoso) es estrictamente incompresible.

#### **1.4. Uso racional y eficiente de la energía**

Independientemente del uso de las energías renovables, la energía en general debe usarse eficientemente. En este sentido y debido a las magnitudes involucradas de energía, el uso eficiente y racional de la energía se puede considerar como una fuente adicional de energía, la cual no requiere ninguna materia prima.

## **1.5. Tecnologías de energías renovables**

Se entiende por energía renovable aquella fuente de energía primaria que se renueva al finalizar el proceso en el que tomó parte, o es tan grande su disponibilidad en el tiempo que para tiempos humanos esta es como si fuera renovable.

Es importante hacer diferencias entre los distintos tipos de energías renovables en función de las tecnologías que las aprovechan. Una podría ser en términos de los tamaños de los sistemas, de micro, meso o macro escala, pero parece más adecuado hacer esta diferenciación en términos del lugar donde se usa la energía secundaria que produce. Así se tiene por un lado, las tecnologías de energías renovables cuyo producto en energía secundaria es usado en el mismo lugar donde están instalados los sistemas, y por otro lado, aquellas donde el uso de la energía secundaria está alejado o fuera de lugar donde se produjo la energía secundaria.

A las primeras se les puede llamar energías renovables de uso local y las segundas energías renovables de uso remoto. Las primeras incluyen a:

- La energía solar pasiva en edificaciones
- La producción de calor por captadores de radiación solar
- Los arreglos fotovoltaicos para generación de electricidad
- La producción de energía eléctrica con celdas de combustibles
- El uso del calor ambiental en bombas de calor
- La conversión del viento en energía eléctrica
- La conversión de biomasa en energía eléctrica

Todas las tecnologías tienen en común que son capaces de producir energía secundaria, derivada de la energía solar, en casi todos los climas de la Tierra. Sin embargo, el tipo y la cantidad de energía renovable dependen del lugar.

Las aplicaciones de las energías renovables de uso remoto tienen la característica de coleccionar y convertir la energía renovable en un lugar, y tener el consumo de la energía secundaria en otro lugar, alejado del primero. Estas aplicaciones incluyen a

- Plantas de potencia termo solares y fotovoltaicas
- Plantas de potencia hidroeléctrica
- Plantas de potencia de viento
- Sistemas de conversión de energía térmica oceánica
- Plantas de potencia geotérmicas

Las cuatro primeras aplicaciones corresponden al aprovechamiento de la energía solar en su forma directa como energía radiante, o en su forma indirecta como viento, el agua almacenada en presas y gradientes térmicos en los océanos. Todas esas energías por venir del sol se consideran renovables. En rigor, el Sol tiene una vida finita pero para los tiempos de la especie humana se considera infinita y por eso el atributo de energía renovable. La quinta aplicación corresponde al uso de la energía geotérmica que también es finita.

Sin embargo, por la dinámica del subsuelo, existen en el mundo muchos yacimientos geotérmicos cuyo tiempo de vida rebasan el tiempo de la escala humana. Por ello también a esta forma energética se le considera renovable.

Nótese que asociada a la diferencia entre las energías renovables de uso local y las de uso remoto, se encuentra también el tamaño de los sistemas.

En las primeras, en general, se tienen sistemas pequeños, en tanto en las segundas, se consideran sistemas grandes.

## **1.6. Naturaleza de la energía solar**

El Sol es una de las innumerables estrellas que hay en esta galaxia, la más cercana y sin duda también la más importante ya que sin ella no existiría ni existiría ninguna forma de vida sobre la Tierra.

El Sol es una estrella de tipo medio, su radio es de unos 700 000 km y, su masa equivale a la que se obtendría juntando unos 334 000 planetas iguales a la tierra, su densidad media es de  $1,41 \text{ g/cm}^3$ , su centro es de gran densidad, brilla en el espacio desde hace más de cinco mil millones de años y se calcula que el tiempo que le resta de vida es todavía mayor, y está situado a 30 000 años luz del centro de la galaxia, alrededor del cual se mueve con todo el sistema planetario, a una velocidad de 320 km/s y completa una revolución cada 200 millones de años.

El Sol gira sobre su eje como una gran bola de gas, no como un sólido, el período de rotación en el ecuador es de 24,7 días; cerca de los polos 30 días aproximadamente.

El origen de la energía que el sol produce e irradia, está en las reacciones nucleares que interrumpidamente se realizan en su interior.

En ellas, los átomos de hidrógeno que es el elemento más abundante del Sol, se combinan entre sí para formar átomos de helio y al mismo tiempo, una pequeña parte de la masa de dichos átomos, se convierte en energía de acuerdo con la famosa fórmula de Einstein  $E = mc^2$  la cual fluye desde el interior hasta la superficie (fotosfera) y desde allí es irradiada al espacio en todas direcciones.

Aunque el Sol también emite partículas materiales, la mayor parte de la energía irradiada es transportada en formas de ondas electromagnéticas (fotones), en una amplia gama de longitudes de onda diferentes, las cuales se desplazan en el espacio vacío a una velocidad de 300 000 km/s tardando solamente ocho minutos en recorrer los 150 millones de kilómetros que hay entre el sol y la tierra.

Cada segundo el Sol irradia en todas las direcciones del espacio una energía de  $4 \times 10^{20}$  kilowatts, para hacerse una idea de la enorme magnitud que representan estas cifras, basta considerar la potencia generada por todas las plantas industriales del mundo trabajando juntas, sería unos trescientos billones de veces más pequeñas. En el breve tiempo de un solo segundo, el Sol irradia mucha más energía que la consumida por todo el género humano desde sus albores hasta hoy en día.

Por otra parte esta esfera de materia gaseosa inmensamente caliente, tiene un diámetro de 1,39 millones de km. La distancia mínima (en el perihelio) entre el Sol y la Terra, se alcanza alrededor del 15 de enero mientras que la máxima (en el afelio) se tiene a fines de junio.

La discrepancia entre la distancia mínima y máxima es de 1/60 del valor medio. Esto quiere decir que la órbita elíptica que describe la Tierra alrededor del sol es prácticamente circular.

A continuación se presenta un esquema de la órbita terrestre respecto al sol y sus posiciones, en distancias.

### **1.7. Estructura solar**

La estructura solar es enormemente compleja se estima que la temperatura existente en el núcleo central varía entre 8 y 40 millones de grados Kelvin. Tiene una densidad entre 80 y 100 veces mayor a la del agua y se genera ahí cerca del 90 por ciento de la energía total. En esta región central comprendida entre  $(0 \text{ y } 23) \cdot R$  ( $R = \text{radio solar}$ ), esta contenido el 40 por ciento de la masa total del Sol.

A una distancia radial, a partir del centro igual a  $0,7R$  la temperatura disminuye considerablemente hasta unos 130 000 K en donde la densidad es del orden  $0,07 \text{ g/cm}^2$ . Por encima de la región comprendida da entre  $0,7 (R)$  y  $1,0 (R)$  conocida como zona convectiva, la temperatura desciende hasta 5000 K y la densidad hasta  $10^{-8} \text{ g/cm}^2$  esta capa bien definida de aproximadamente 300 km de espesor y que envuelve a la zona convectiva se le conoce como la fotosfera y es en esta región donde se origina la mayor parte de la radiación solar que se recibe.

Después de la fotosfera, se localiza una atmósfera solar transparente y que se puede observar cuando hay un eclipse de Sol, en esta región hay una zona de gases fríos y constituyen la capa inversora o de inversión.

De ahí en adelante está la cromósfera de aproximadamente 10 000 km de espesor, en cuya zona los gases se encuentran a una temperatura mayor y tienen una densidad menor que los de la fotosfera envolviendo a todos, esta la corona de bajísima densidad y alta temperatura y su espesor es de alrededor de un millón de kilómetros.

Por último, la temperatura efectiva de la superficie del Sol es de unos 5900 K, esto significa que la emisión de radiación de un cuerpo negro que se encontrará a 5900 K sería muy parecida a la del Sol.

## **1.8. Constante solar**

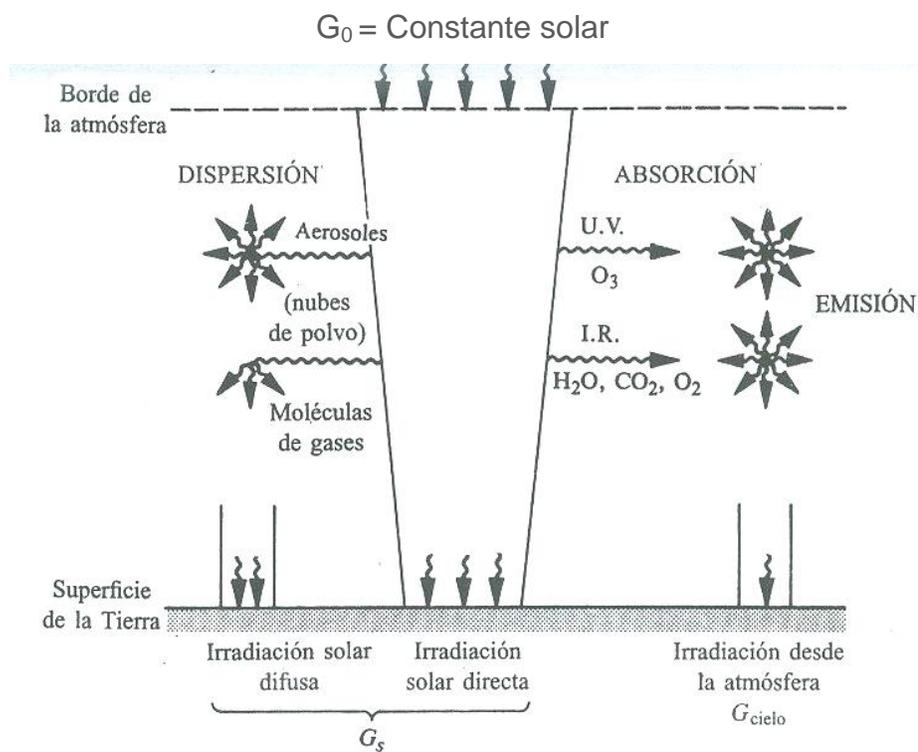
La constante solar  $G_0$  es el flujo medio de energía solar por unidad de área que incide sobre las capas superiores de la atmósfera terrestre, cuando el planeta se encuentra a su distancia media del Sol, de  $1,49 \times 10^{11}$  m (1 unidad astronómica); el valor que se usa comúnmente es de  $1,353 \text{ kW/m}^2$ .

Debido a la naturaleza elíptica de la órbita de la Tierra, el flujo real varía entre  $1,31 \text{ kW/m}^2$  en junio a  $1,40 \text{ kW/m}^2$  en enero. La incertidumbre de estos datos es de alrededor del 1 por ciento a 2 por ciento, y se revisan constantemente para ajustarlos a los nuevos datos que aportan los vehículos espaciales. La potencia emisiva total del Sol equivale a la de un cuerpo negro 5762 K, pero su distribución espectral difiere ligeramente de la que corresponde a un cuerpo negro.

A medida que la radiación solar pasa a través de la atmósfera de la Tierra, una parte de la energía de la radiación solar es dispersada por moléculas de gas y aerosoles, mientras que otra parte es absorbida por moléculas de gas, en particular de  $\text{CO}_2$  y de  $\text{H}_2\text{O}$ .

Por lo tanto, la radiación solar que incide sobre la superficie de la Tierra, consiste tanto en una componente directa como en una componente difusa de radiación dispersada. La suma de estas dos componentes es la irradiación solar,  $G_s$ , y su valor para una superficie horizontal se llama insolación.

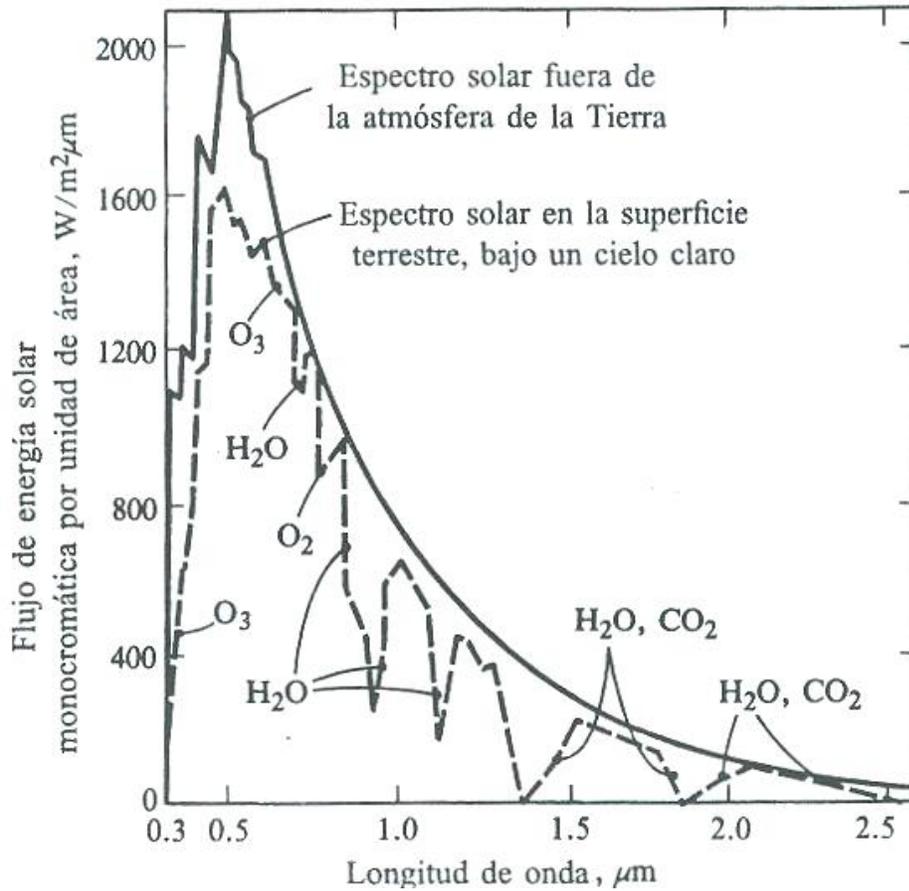
Figura 1. **Procesos de absorción y dispersión en la atmósfera**



Fuente: MILLS, Anthony. F. *Transferencia de calor*. p. 547.

El cálculo de la irradiación solar sobre superficies orientadas en un ángulo arbitrario respecto a los rayos del Sol, por ejemplo sobre las paredes de un edificio, es un problema geométrico complejo.

Figura 2. **Espectros solares fuera de la atmósfera y sobre la superficie terrestre**



Fuente: MILLS, Anthony. F. *Transferencia de calor*. p. 548.

La figura 1 muestra el esquema de absorción y dispersión de la radiación solar en un cielo claro, y de las componentes de la irradiación que incide sobre la superficie de la Tierra, y la figura 2 muestra el consecuente efecto sobre la distribución espectral de la energía radiante.

En el diseño minucioso de elementos tales como los colectores solares es necesario, además, separar la irradiación solar en sus componentes directa y difusa, lo cual constituye una tarea complicada.

### **1.9. Radiación solar sobre la superficie de la tierra**

No toda la radiación solar extraterrestre que intercepta la Tierra llega a la superficie de la misma, aun en condiciones de cielo despejado. La atmósfera está constituida por una masa gaseosa, su altura es indeterminada y es algo menor de la millonésima parte de la masa del planeta, cuyo diámetro es de 12700 km, la variación vertical de la temperatura, permite ver distintas regiones.

La tropósfera: hasta una altura de 10 a 15 km, la temperatura disminuye con la altura hasta alcanzar de  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

La estratósfera: se localiza encima de la tropósfera, tiene una capa de ozono entre los 20 y los 40 km de altura, su temperatura permanece estable.

La ionósfera: de altura superior a los 100 km tiene capas de temperatura indeterminadas y por último.

La exósfera: esta última capa atmosférica, hasta los 80 km, de altura aproximadamente, la composición es constante: 70% ( $\text{N}_2$ ), 21% ( $\text{O}_2$ ), 0,9% (Ar), 0,3% ( $\text{CO}_2$ ) y algunos otros gases, así como ozono y vapor de agua en la vecindad del suelo.

Como aclaración, se apuntará que todo el vapor de agua se encuentra concentrado en la proximidad de la superficie.

El vapor de agua absorbe fuertemente la radiación solar en las bandas infrarrojas. Más allá de  $2,3 \mu\text{m}$ , la transmisión en la atmósfera es baja debido a la absorción de la energía por el vapor de agua y el bióxido de carbono, dado que la radiación solar más allá de  $2,3 \mu\text{m}$  es menos del 5 por ciento del total en el espectro, la energía recibida sobre la superficie de la Tierra es todavía más pequeña.

Entonces se puede decir que solamente la radiación solar extraterrestre comprendida entre  $0,29 \mu\text{m}$  y  $2,8 \mu\text{m}$  es transmitida con atenuaciones a la superficie de la Tierra, esta atenuación se debe a los fenómenos de absorción por ( $\text{O}_2$ ), ( $\text{H}_2\text{O}$ ) y ( $\text{CO}_2$ ) así también, de otros componentes en la atmósfera: Moléculas de aire, polvo, entre otros.

La energía radiante es descrita como una línea de partículas llamadas fotones y que viajan en ondas transversales a la velocidad de la luz, cada fotón posee una longitud de onda ( $\lambda$ ) y un monto de energía ( $E$ ).

Existe radiación para diferentes longitudes de onda, con bandas de longitud de onda, con nombres especiales dados, el más común de ellos es luz o radiación visible, la radiación que tiene longitud de onda de  $0,25$  a  $100 \mu\text{m}$  aproximadamente es la infrarroja, y las ondas mayores de  $100 \mu\text{m}$  son llamadas ondas de radio, las radiaciones con longitud de onda más corta que la luz visible son: ultrasonido, rayos X, y rayos gamma.

Tabla I. **Intervalos de longitudes de onda y frecuencias aproximadas de los diferentes tipos de radiación**

TIPOS DE RADIACIÓN	INTERVALO DE LONGITUD DE ONDA (m)	BANDA DE FRECUENCIA APROXIMADA (ciclos/s)
Rayos Gama	$10^{-4}$	$3 \times 10^8$
Rayos X	$5 \times 10^{-8}$ a $5 \times 10^{-6}$	$6 \times 10^{14}$ a $1 \times 10^{15}$
Rayos ultravioleta	0.006 a 0.30	$9 \times 10^{14}$ a $10^{10}$
Luz Visible	0.35 a 0.75	$4 \times 10^{10}$ a $9 \times 10^{10}$
Infrarroja	0.15 a 300	$10^{12}$ a $4 \times 10^{10}$
Corta	$1 \times 10^2$ a $1 \times 10^8$	$3 \times 10^6$ a $3 \times 10^{10}$
Ondas de radio	$1 \times 10^8$	$3 \times 10^6$

Fuente: REYES BARRAGAN, Sergio. *Energía solar*. p. 20.

### 1.10. Tipos de radiación terrestre

La energía del Sol se puede captar por medio de tres formas de radiación solar que son: radiación directa, difusa o reflejada.

Una parte de la radiación solar que entra a la atmósfera de la Tierra es dispersada por las moléculas de gas y vapor de agua y por las nubes y partículas de polvo.

El color azul del cielo es el resultado de la dispersión de algunas de las ondas más cortas e la porción visible del espectro.

El color rojo tan familiar de los crepúsculos es el resultado de la dispersión de las ondas más largas, por el polvo y las nubes situadas cerca de la superficie de la Tierra.

Algunas radiaciones (particularmente la ultravioleta) pueden ser absorbidas por el vapor de agua que flota cerca de la superficie.

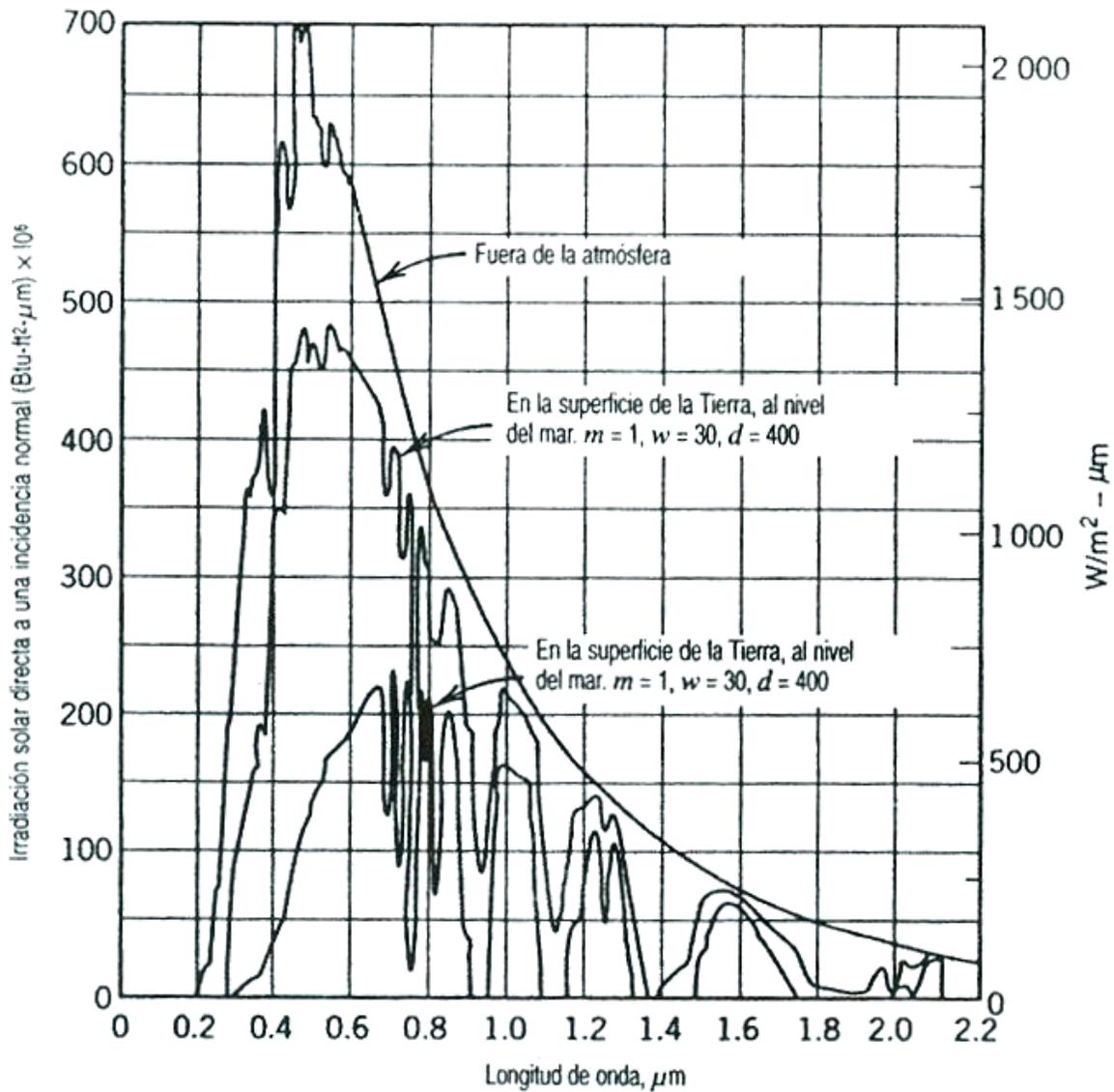
A la parte de la radiación que llega hasta la superficie de la Tierra sin haber sido absorbida o dispersada se le denomina “radiación directa”. Esta radiación viene acompañada por la radiación que fue dispersada o reemitida, a la cual se le denomina “radiación difusa”. La radiación también puede ser reflejada hacia una superficie desde otras superficies cercanas. Por lo tanto, la radiación total  $G_t$  que cae sobre una superficie perpendicular a los rayos solares está constituida por la radiación directa  $G_{ND}$ , la radiación difusa  $G_d$  y la “radiación reflejada”  $G_R$ .

$$G_t = G_{ND} + G_d + G_R \quad (5-1)$$

La disminución del poder energético que sufren los rayos solares cuando atraviesan la atmósfera terrestre depende de las condiciones de esta: presencia o ausencia de nubosidades, polvo y contaminantes, presión atmosférica y grado de humedad. Otro factor importante en el debilitamiento energético de los rayos solares es la longitud de su trayectoria a través de la atmósfera.

Esta longitud de la trayectoria se describe en términos de la masa de aire  $m$ , que es la relación entre la masa atmosférica que se interpone en la trayectoria real Sol-Tierra y la masa que existiría si la radiación solar cayera perpendicularmente y al nivel del mar, para propósitos prácticos, la masa de aire es igual a la cosecante de la altura sola  $\beta$  multiplicada por la relación entre la presión atmosférica real y la presión atmosférica estándar.

Figura 3. **Distribución espectral de la irradiación solar directa a una incidencia normal en días despejados**



Fuente: MILLS, A. F. *Transferencia de calor*. p. 169.

En la figura 3 se muestra la distribución espectral de la radiación solar directa, que incide perpendicularmente sobre una superficie ubicada al nivel del mar, con una masa de aire igual a 1 ( $\beta = 90$  grados) y a 5 ( $\beta = 11,5$  grados), para concentraciones especificadas de vapor de agua y polvo en el aire, denotadas por  $w$  y  $d$ . El área bajo cada una de las curvas es proporcional a la irradiación total que incidiría sobre una superficie bajo esta particular condición. Se puede ver fácilmente que la atmósfera provoca una disminución significativa de la radiación total y altera la distribución espectral.

El valor de la constante solar está dado para una superficie fuera de la atmósfera de la Tierra y no toma en cuenta la absorción y la difusión de dicha atmósfera, las cuales pueden ser significativas incluso para días despejados. Los valores para la irradiación solar en la superficie de la Tierra en un día despejado están dados en el modelo de cielo despejado de la ASHRAE.

$$G_{ND} = \frac{A}{e^{\frac{B}{\sin\beta}}} \quad (6-1)$$

Donde

$G_{ND}$  = irradiación directa perpendicular, Btu/ (h-p<sup>2</sup>) o W/m<sup>2</sup>

$A$  = irradiación solar aparente a través de una masa de aire igual a cero Btu/(h-p<sup>2</sup>) o W/m<sup>2</sup>.

$B$  = coeficiente de extinción atmosférica

$\beta$  = altura solar

Tabla II. **Datos solares para los días 21 de cada mes**

	<b>Ecuación del Tiempo, min</b>	<b>Declinación, grados</b>	<b>A, Btu/h·p<sup>2</sup></b>	<b>B, adimensional</b>	<b>C, adimensional</b>
Enero	-11,20	-20,20	381,20	0,141	0,103
Febrero	-13,90	-10,80	376,40	0,142	0,104
Marzo	-7,50	0,00	369,10	0,149	0,109
Abril	1,10	11,60	358,30	0,164	0,120
Mayo	3,30	20,00	350,70	0,177	0,130
Junio	-1,40	23,45	346,30	0,185	0,137
Julio	-6,20	20,60	346,60	0,186	0,138
Agosto	-2,40	12,30	351,00	0,182	0,134
Septiembre	7,50	0,00	360,20	0,165	0,121
Octubre	15,40	-10,50	369,70	0,152	0,111
Noviembre	13,80	-19,80	377,30	0,142	0,106
Diciembre	1,60	-23,45	381,80	0,141	0,103

Fuente: MACQUINSTON, Faye C. *Calefacción, ventilación y aire acondicionado*. p. 165.

En la tabla 2 se proporcionan los valores de  $A$  y  $B$  para los días 21 de cada mes y para un número de claridad atmosférica  $C_N$  igual a la unidad. Los datos de la tabla 2 cuando se utilizan en la ecuación (2-1), no dan el valor máximo de  $G_{ND}$  que puede ocurrir en un mes determinado; aunque son representativos de condiciones promedio para días sin nubes.

La radiación difusa que incide sobre una superficie horizontal se obtiene utilizando el factor  $C$  de la tabla 2 de la siguiente manera

$$G_D = (C)(G_{ND}) \quad (7-1)$$

Donde  $C$  es, la relación entre la irradiación difusa sobre una superficie horizontal y la irradiación perpendicular directa. Se parte del supuesto de que el parámetro  $C$  es una constante para un día despejado promedio durante un mes en particular.

En realidad la radiación difusa varía direccionalmente y cambia durante el día de una manera razonablemente predecible.

Gary L. Powel en su publicación *The ASHRAE clear sky model an evaluation*, hizo una evaluación del modelo de cielo despejado de la ASHRAE y elaboró algunas correcciones para los efectos de la refracción en los ángulos de cenit solar mayores de 70 grados y para el decrecimiento de la longitud de la trayectoria atmosférica cuando aumenta la elevación.

N. Galanis y R. Chatignyen su publicación *A critical review of de ASHRAE solar radiation model*, realizaron una revisión crítica del modelo de radiación solar de la ASHRAE, en la que destacaron la incongruencia de utilizar el concepto de un número de la claridad como factor multiplicativo, tanto para la irradiación directa perpendicular como para la radiación difusa. Estos investigadores plantearon la alternativa de dividir entre el cuadrado del número de la claridad para obtener el comportamiento correcto del componente difuso, de la siguiente manera:

$$G_d = \frac{(C)(G_{ND})}{(C_N)^2} \quad (8-1)$$

En su modelo se combina el componente difuso de radiación (ecuación 7-1) con la siguiente expresión para la radiación directa  $G_D$ , sobre una superficie de orientación arbitraria, corregida para la claridad:

$$G_D = C_N G_{ND} \cos\theta \quad (9-1)$$

Donde  $\theta$  es el ángulo de incidencia formado por los rayos solares y la perpendicular a la superficie. El resultado es para una superficie horizontal donde  $\cos\theta = \text{sen}\beta$ ,

$$G_t = G_D + G_d = \left[ \cos\theta + \frac{C}{(C_N)^3} \right] C_N G_{ND} \quad (10-1)$$

### 1.11. Ángulos solares

Podrá describirse la dirección de los rayos solares que inciden sobre un lugar si se conocen estos tres datos fundamentales:

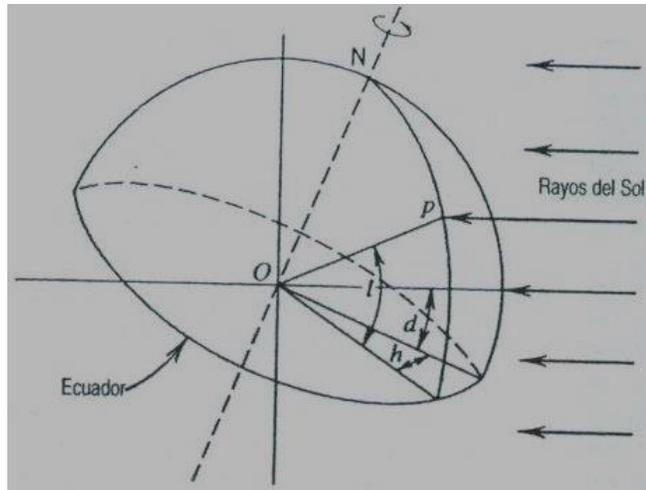
- Ubicación del lugar sobre la superficie terrestre
- Hora del día
- Día del año

Para obtener estos datos es necesario conocer la latitud  $l$ , el ángulo horario  $h$  y la declinación del Sol  $d$ , respectivamente.

En la figura 4 se muestra un punto  $P$ , ubicado en algún lugar del Hemisferio Norte. La latitud  $l$  es el ángulo entre la línea  $OP$  y la proyección de  $OP$  sobre el plano ecuatorial.

Esta es la misma latitud que se utiliza comúnmente en los globos terráqueos a escala y en los mapas, para describir la ubicación de un punto con respecto al ecuador.

Figura 4. **Latitud, ángulo horario y declinación del Sol**



Fuente: MCQUINSTON, Faye C. *Calefacción ventilación y aire acondicionado*. p. 166.

Debido a la rotación de la Tierra sobre su propio eje, cualquier lugar fijo sobre su superficie efectúa una revolución completa cada 24 horas, y su posición con respecto al Sol cambia continuamente. La Tierra está dividida en 360 grados de arco por líneas longitudinales imaginarias que pasan a través de los polos.

Así 15 grados al oeste verá el Sol exactamente en la misma posición cuando haya pasado una hora. El Tiempo Universal o Greenwich Civil Time (la hora civil de Greenwich, o simplemente hora de Greenwich) es el tiempo (la hora) del meridiano cero, la línea imaginaria que pasa a través de Greenwich, Inglaterra. El Local Civil Time (hora civil local) está determinado por la longitud en la que se encuentra el observador, y se calcula agregando o restando cuatro minutos de tiempo por cada grado de longitud. La hora aumenta a medida que se avanza hacia los meridianos del este. Por lo tanto, cuando son las 12:00 del día en el meridiano de Greenwich, son las 7:00 A.M. en el meridiano ubicado a 75 grados longitud oeste.

Se acostumbra ajustar los relojes a la misma hora a lo largo de una zona que cubre aproximadamente 15 grados de longitud (un huso horario), aun cuando los límites de esta zona podrían ajustarse a las condiciones geográficas locales. A la hora local para un meridiano seleccionado cerca del centro del huso horario se le denomina hora estándar. Existen cuatro horas estándar; Guatemala solo usa una hora estándar por lo pequeño de su territorio, pero en un país como Estados Unidos se hace uso de las cuatro horas estándar y estas son:

- La hora estándar del este (Eastern standard time, EST), 75 grados.
- La hora estándar del centro (Central standard time, CST), 90 grados.
- La hora estándar de la montaña (Mountain standard time, MST), 105 grados.
- La hora estándar del pacífico (Pacific standard time, PST), 120 grados.

En la mayor parte de Estados Unidos los relojes se adelantan una hora durante parte de la primavera, el verano completo y el inicio del otoño, lo que lleva al horario de verano (Day-light saving time, DST)

Guatemala se encuentra a 90 grados del meridiano de Greenwich y no se adelanta el reloj en ninguna época del año.

Mientras que la hora civil está basada en días que tienen exactamente 24 horas de duración, la hora solar tiene días ligeramente variables, debido a la falta de simetría de la órbita terrestre, las irregularidades en la velocidad de rotación de la Tierra y otros factores, al tiempo medido por medio de la posición del Sol le denomina tiempo solar.

La hora local solar (local solar time, LST) puede calcularse a partir de la hora local civil (local civil time, LCT) con la ayuda de una cantidad llamada ecuación del tiempo:  $LST = LCT +$  (ecuación del tiempo). Se puede utilizar la siguiente relación, desarrollada a partir del trabajo de J. W. Spencer, en su publicación *Fourier series representation of the position of the Sun*, para determinar la ecuación del tiempo EOT:

$$EOT = 299,2(0,000075 + 0,001868\cos N - 0,032077\text{Sen}N - 0,014615 \cos 2N - 0,04089\text{sen}2N) \quad (11-1)$$

Donde  $N = (n-1) (360/365)$ , y  $n$  es el día del año,  $1 \leq n \leq 365$ . En esta formulación  $N$  está en grados. En la tabla 2 aparecen los valores de la ecuación del tiempo para los días 21 de cada mes.

El ángulo horario  $h$  es el ángulo entre la proyección de  $P$  sobre el plano ecuatorial y la proyección sobre ese plano de una línea que va del centro del Sol al centro de la Tierra (figura 4).

Quince grados de ángulo horario corresponden a una hora de tiempo. El ángulo horario varía desde cero en el mediodía solar local hasta su máximo, que ocurre en el crepúsculo o el amanecer.

El mediodía solar ocurre cuando el Sol está en el punto más alto del cielo y los ángulos horarios son simétricos con respecto al mediodía solar; por lo tanto, los ángulos horarios del amanecer y del crepúsculo en un día determinado son idénticos.

La declinación del Sol es el ángulo entre la una línea que conecta los centros del Sol y de la Tierra y la proyección de esta línea sobre el plano ecuatorial.

La figura 4 muestra cómo varía la declinación del Sol a lo largo de un año típico.

En un día determinado del año la declinación varía ligeramente de un año para otro, pero para los cálculos en proyectos que donde estimen el movimiento del Sol, los valores de cualquier año son suficientemente precisos. Puede utilizarse la siguiente ecuación, desarrollada a partir de un trabajo de J. W. Spencer, *Fourier series representation of the position of the Sun*, para determinar la declinación en grados:

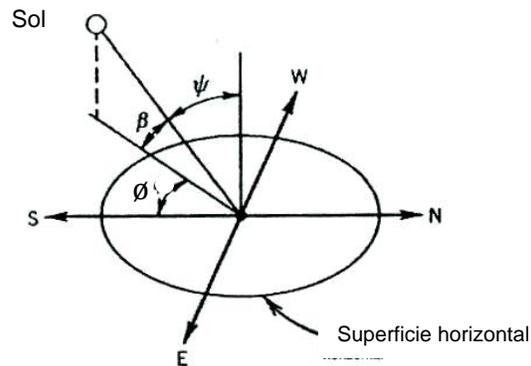
$$\delta = 0,3963723 - 22,9132745\cos N + 4,0254304\sen N - 0,3872050\cos 2N + 0,05196728\sen 2\theta - 0,1545267\cos 3\theta + 0,08479777\sen 3B \quad (12-1)$$

Donde  $N = (n-1) (360/365)$ , y  $n$  es el día del año,  $1 \leq n \leq 365$ . En esta formulación  $N$  está en grados.

En la tabla 2 aparecen los valores de la declinación del Sol para los días 21 de cada mes.

Cuando se realizan los cálculos para proyectos solares es conveniente definir la posición del Sol en el cielo en términos de la altura solar  $\beta$  y del acimut solar  $\Phi$ , los cuales dependen de los valores de  $l, h y d$ .

Figura 5. **Altura solar  $\beta$  y ángulo acimutal  $\phi$**



Fuente: MCQUINSTON, Faye C. *Calefacción, ventilación y aire acondicionado*. p. 167.

La altura solar  $\beta$  (la altura angular del Sol) es el ángulo entre el rayo solar y la proyección de ese rayo sobre una superficie horizontal (figura 5). Es el ángulo del Sol sobre el horizonte. Se puede demostrar por medio de la geometría analítica que la siguiente relación es verdadera:

$$\text{sen}\beta = \text{cos}l \text{cos}h \text{cos}d + \text{sen}l \text{sen}d \quad (13-1)$$

El ángulo del cenit del Sol  $\psi$  es el ángulo entre los rayos solares y una perpendicular al plano horizontal en el punto  $P$  (figura 5). Por lo tanto:

$$\beta + \psi = 90 \text{ grados} \quad (14-1)$$

Se puede demostrar que la altura máxima diaria (mediodía solar) del Sol en un punto geográfico determinado es:

$$\beta_{\text{mediodía}} = 90 - |l - d| \quad \text{Grados} \quad (15-1)$$

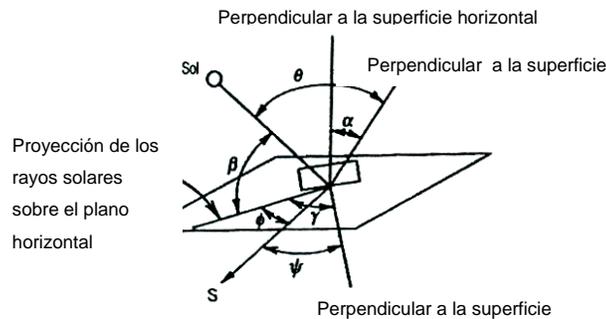
Donde  $|l - d|$  es el valor absoluto de  $l - d$ .

El ángulo del acimut solar  $\Phi$  es el ángulo en el plano horizontal medido entre el sur y la proyección de los rayos solares sobre este plano (figura 5). Nuevamente, por medio de la geometría analítica, se puede demostrar que:

$$\cos\phi = \frac{\text{sen } \beta \text{ sen } l - \text{sen } d}{\cos \beta \cos l} \quad (16-1)$$

Para una superficie vertical, el ángulo medido en el plano horizontal entre la proyección de los rayos sobre ese plano y una perpendicular a la superficie vertical, se le denomina acimut solar de pared y en la figura 6 se ilustra esta cantidad.

Figura 6. **Acimut solar de pared  $\gamma$ , acimut de pared  $\psi$  y ángulo de inclinación  $\alpha$  para una superficie de inclinación arbitraria**



Fuente: McQuinston, Faye C. *Calefacción, ventilación y aire acondicionado*. p. 167.

Si  $\psi$  es el acimut de pared medido al este o al oeste desde el sur, entonces es obvio que:

$$\gamma = \phi \pm \psi \quad (17-1)$$

El ángulo de incidencia  $\theta$  es el ángulo entre los rayos solares y la perpendicular a la superficie horizontal, como se muestra en la figura 6.

El ángulo de inclinación  $\alpha$  es el ángulo entre la perpendicular a la superficie inclinada y la perpendicular a la superficie horizontal.

Se puede demostrar que:

$$\cos\theta = \cos\beta \cos\gamma \operatorname{sen}\alpha + \operatorname{sen}\beta \operatorname{cosen}\alpha \quad (18-1)$$

Por lo tanto para una superficie vertical:

$$\cos\theta = \cos\beta \cos\gamma \quad (19-1)$$

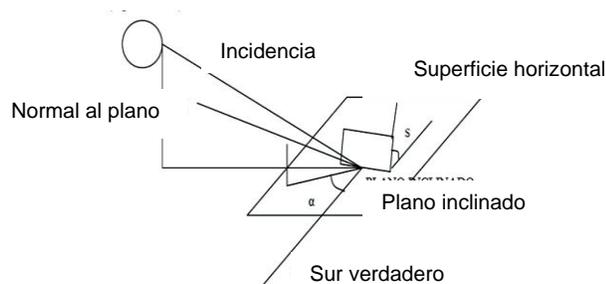
Y para una superficie horizontal:

$$\cos\theta = \operatorname{sen}\beta \quad (20-1)$$

### 1.12. Radiación directa sobre el plano inclinado

Se considera un plano inclinado, un ángulo  $S$  con respecto a un plano horizontal y que la proyección horizontal de su normal forma un ángulo acimutal  $\alpha$  con respecto al sur verdadero (figura 7).

Figura 7. Radiación directa sobre el plano inclinado



Fuente: Reyes Barragan, Sergio. *Energía solar*. p. 24.

En estas circunstancias el ángulo de incidencia de la radiación directa  $\theta$  queda definido como el ángulo entre la normal de la superficie y el haz de radiación:

La relación entre  $\theta$ ,  $\phi$ ,  $h$ ,  $\delta$ , y  $\beta$  está dada por la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \cos\theta = \operatorname{sen}\delta \operatorname{sen}l \cos S - \operatorname{sen}\delta \cos\delta \operatorname{sen}S \cos\beta + \cos\delta \cos l \cos S \cosh + \\ \cos\delta \operatorname{sen}l \operatorname{sen} S \cos\beta \cosh + \cos\delta \operatorname{sen}S \operatorname{sen}\beta \operatorname{sen}h \end{aligned} \quad (21-1)$$

Donde

$\beta$  = altura solar

$\phi$  = acimut solar

$l$  = latitud del lugar

$\delta$  = declinación

$h$  = ángulo horario

$S$  = ángulo de inclinación del plano con respecto a la horizontal y

$\theta$  = ángulo de incidencia de radiación

Se consideran tres casos particulares de interés:

Superficie horizontal. En este caso  $S = 0$  en la ecuación

$$\cos\theta = \operatorname{sen}\delta \operatorname{sen}(\phi - S) + \cos\delta \cos(\phi - S) \cosh \quad (22-1)$$

Superficie inclinada hacia el sur. Se observa que el ángulo  $\theta$  es idéntico al ángulo acimutal, para una superficie horizontal en que la latitud es igual a  $(\phi - s)$ , en consecuencia en la ecuación (20-1).

$$\cos\theta = \operatorname{sen}\delta \operatorname{sen}(l - S) + \cos\delta \cos(l - S) \cosh \quad (23-1)$$

Superficie vertical orientada hacia el sur, en este caso  $S = 90^\circ$  y  $h = 0^\circ$  entonces en la ecuación (20-1).

$$\cos l = -\operatorname{sen} \delta \cos l + \cos \delta \cos h \quad (24-1)$$

Se concluye que para obtener el mayor aprovechamiento de radiación solar en un plano fijo o con un grado de libertad, este deberá estar inclinado hacia el sur, un cierto ángulo que dependerá de la latitud del lugar y del día, del año en cuestión.

Por lo tanto, el caso particular que interesa de los tres antes mencionados es el de la superficie inclinada hacia el sur y para encontrar el ángulo óptimo de inclinación del plano se hará la siguiente consideración:

Que al medio día coincidan el haz de iluminación y la normal al plano.

Entonces:  $\theta = 0$  y  $h = 0$  la ecuación (22-1).

$$1 = \operatorname{sen} \delta \operatorname{sen}(l - S) + \cos \delta \cos(l - S) \quad (25-1)$$

Y por medio de identidades trigonométricas, la inclinación óptima de un plano fijo para obtener radiación directa, (máximo aprovechamiento de la radiación solar) estará dada por:

$$S = (l - \delta) \quad (26-1)$$

Si se considera que el plano para el que se ha calculado el ángulo de inclinación para aprovechar la radiación solar en forma directa, en un panel o colector solar, es importante considerar que si se va a instalar más de uno en una superficie plana que separación debe guardar para evitar sombras.

La separación de paneles o colectores solares para evitar sombras si se colocaran en una superficie horizontal, dependerá de la latitud y del ángulo de inclinación en un plano para obtener radiación directa y durante todo el año.

### **1.13. Guatemala y la radiación solar**

La intensidad de la radiación solar varía con la localización geográfica, la hora del día, cubrimiento de las nubes y el polvo suspendido en la atmósfera. Usualmente se llevan registros de la radiación solar recibida sobre una superficie horizontal en los observatorios meteorológicos y para ello se emplean equipos especiales llamados “piro heliómetros”. En el Observatorio Meteorológico de Guatemala se pueden obtener estadísticas de los promedios por mes, de radiación máxima y mínima instantánea únicamente, por lo que se dificulta hacer estimaciones hora por hora.

Aunque se ha juzgado muchas veces el aprovechamiento de la energía solar como un absurdo, debido a sus fluctuaciones e irregularidades, la gente empieza a mostrarse menos escéptica especialmente al aprovecharla para el calentamiento del agua. Guatemala y el resto de Centro América se encuentran geográficamente comprendidas dentro de la banda (latitud 15° norte a 15° sur) alrededor del ecuador, que es la zona más favorable del mundo para la captación de radiación solar porque tiene aproximadamente 2880 horas de radiación solar al año, las variaciones climatológicas son relativamente pequeñas y la intensidad de la radiación solar es mayor que en otras zonas del mundo.

## **2. COLECTORES SOLARES**

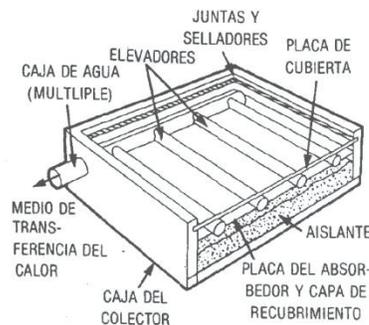
## 2.2. Tipos de colectores solares

La selección del tipo de colector depende de la temperatura que se quiera alcanzar, los tipos más comunes de colectores solares, pueden ser los colectores de placa plana, tubo evacuado, concentrados de cubeta con lente Fresnel y parabólico compuesto entre otros.

### 2.2.1. Colectores de placa

Convierte la radiación solar en calor en una superficie plana colocada dentro de una simple caja. Se puede instalar rígidamente en la azotea o en el patio. No requiere tecnología especial, superficies reflectoras ni lentes y tampoco mecanismos para variar su ángulo en relación con la posición del Sol.

Figura 8. Colector de placa plana típico



Fuente: Impresos Industriales. *Aplicaciones de la energía solar*. p. 10-2.

La cubierta es una lámina de vidrio o plástico transparente colocada sobre la placa de absorción. Los rayos del Sol pueden atravesar el vidrio y son transformados en energía calórica en la placa de absorción. La cubierta disminuye la cantidad de energía que escapa por el frente del colector. En

algunos diseños se pone un vidrio doble o triple, como protección adicional contra las pérdidas de calor.

Esos conductos incluyen cabezales y elevadores. Los cabezales de circulación son conductos principales o múltiples a través de los cuales el medio de transferencia entra al colector y sale de él. Se colocan en las partes superiores e inferiores del colector o a los lados de este. Los elevadores son ductos o tubos que distribuyen el medio de transferencia por la superficie del colector. Están conectados a los múltiples y guardan distancias iguales entre uno y otro extremo.

Los materiales aisladores se introducen detrás de la placa de absorción y alrededor del perímetro de la misma. Impiden la pérdida de calor por detrás y por los lados del colector.

Todos los componentes del colector plano están colocados en una caja hermética. Esta caja del colector impide que la humedad, la suciedad, el polvo y el aire penetren por el colector y disminuyan su rendimiento. Se emplean selladores o juntas de caucho para fijar la cubierta de vidrio a la caja.

Los colectores planos se clasifican según el tipo de fluido de transferencia que usa con ellos. Los colectores del tipo líquido utilizan precisamente un líquido como medio de transferencia de calor. El líquido puede ser agua, fluido de silicón o algún otro fluido. Los colectores del tipo de aire emplean aire como medio de transferencia.

El funcionamiento de un colector plano del tipo de líquido es muy sencillo. La radiación solar atraviesa la cubierta de vidrio y cae sobre la capa que cubre la placa de absorción. La capa permite que la placa absorba la radiación y la convierta en calor utilizable.

A su vez, este calor es absorbido por el medio de transferencia en los conductos de fluido de la placa. El fluido es transportado ya caliente, sube por la tubería hacia un tanque de almacenamiento, que está bien aislado para no permitir transferencia de calor.

El fluido se mantiene en circulación por el efecto conocido como termosifón, que se vale de las diferencias en densidad del agua que se encuentra en el tanque de almacenamiento, ya que el agua caliente es menos densa y por ende menos pesada y se queda en la parte superior del tanque, y el agua fría se queda en la parte inferior por ser más pesada, el diferencial en la temperatura crea un flujo constante hasta que todo el tanque queda lleno de agua caliente, cuanto más grande sea el diferencial de temperatura, mayor será el caudal en el sistema.

Debidamente construido e instalado, el colector plano es confiable, seguro y duradero con parámetros conocidos de rendimiento. Sin embargo, los diseños varían de uno a otro fabricante.

En la tabla III hay una lista de algunos de los materiales que se están usando para los componentes del colector. Tanto el diseño como los materiales de fabricación pueden influir en el rendimiento.

Tabla III. **Materiales que se emplean para componentes de un colector solar**

<b>COMPONENTES DEL COLECTOR</b>	<b>MATERIALES EMPLEADOS</b>
Placa de cubierta	Vidrio laminado de fibra de vidrio, hojas y

	películas
Capa de palca absorbente	Óxidos metálicos selectivos, pinturas negras no selectivas.
Placa absorbente	Cobre, aluminio o cobre, acero inoxidable o al carbón.
Conductos del fluido	Tubo de aluminio o cobre, espacios integrales en la placa absorbente.
Aislante	Fibra de vidrio, espuma de vidrio, termoplásticos espumosos.
Caja	Metal, concreto en panel, laminado de fibra de vidrio, termoplásticos extruidos.
Juntas	Silicón, EPDM, butilo, elastómeros PVC
Medio de transferencia de calor	Aire, agua, fluido de silicón, aceites hidrocarburos, mezcla de agua y glicol.

Fuente: Impresos Industriales. *Aplicaciones de la energía solar*. p.10-4.

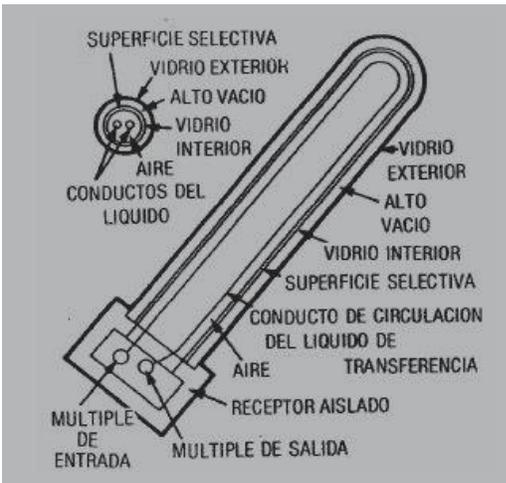
### 2.2.2. Colectores de tubo evacuado

Este tipo de colector emplea el vacío como aislador contra la pérdida de calor y para impedir que la capa de absorción se deteriore. El colector es como un termo invertido colocado sobre un tubo doblado en forma de horquilla y lleno de líquido.

El recipiente de vidrio de doble pared lleva una capa absorbente en sus superficies interiores. La radiación solar atraviesa el vidrio exterior y cae sobre la capa, calentando el aire que contiene el recipiente.

A su vez, el aire caliente eleva la temperatura del líquido que está en el tubo. El extremo del recipiente al vacío desemboca en un receptor aislado que contiene el múltiple del colector.

Figura 9. **Colector de tubo evacuado**



Fuente: Impresos Industriales. *Aplicaciones de la energía solar*. p.10-5.

El colector de tubo evacuado recoge la radiación solar directa con mucha eficiencia. Algunos diseños son muy efectivos tanto para la radiación directa como para la difusa. Es de los más eficientes para aplicaciones de alta temperatura, en que se requiere agua muy caliente para procesos industriales o para operar enfriadores de absorción en los sistemas de refrigeración residencial y comercial. Su eficiencia a bajas temperaturas, por ejemplo, para calentar el agua o para calefacción, no es tan buena como la del colector plano.

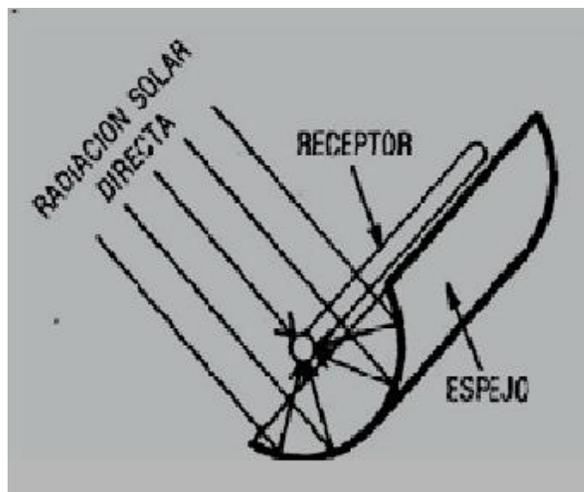
### 2.2.3. Colectores concentrados

A los colectores concentrados se les llama a veces colectores de enfoque o seguidores. Todos ellos funcionan según el mismo principio general. Uno o más espejos reflejan la radiación solar y la concentran en un área muy reducida. Hay muchos tipos de colector concentrador. La mayoría requieren de

dispositivos mecánicos para variar la posición y seguir al Sol en su recorrido a través del cielo: algunos requieren lentes ópticas especiales para concentrar la energía solar.

La figura 10 muestra un colector concentrador lineal. Capta la radiación solar reflejándola, mediante un gran espejo curvo, sobre un receptor que contiene el líquido de transferencia. Este tipo de colector concentrador tiene que seguir al Sol y solo puede recoger la radiación directa con cielo despejado.

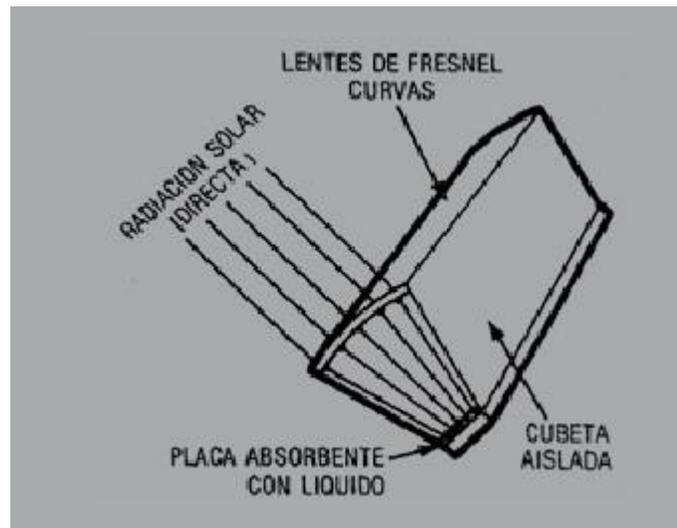
Figura 10. **Colector concentrador**



Fuente: Impresos Industriales. *Aplicaciones de la energía solar*. p.10-6.

La figura 11 muestra un colector lineal de cubierta con lente de Fresnel. La radiación solar que atraviesa a la lente se desvía de manera que incida sobre una pequeña placa de absorción colocada en el fondo de una cubeta y que tiene un líquido de transferencia. También en este caso se requiere un mecanismo de seguimiento y solo se puede captar la radiación directa con cielo despejado.

Figura 11. **Colector de cubeta con lente de Fresnel**

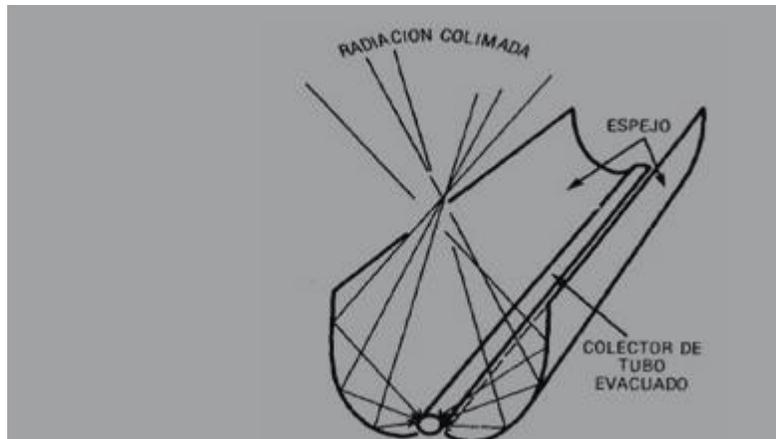


Fuente: Impresos Industriales. *Aplicaciones de la energía solar*. p.10-6.

La figura 12 muestra un colector compuesto, de espejos parabólicos. Esta forma especial de espejo la diseñó el Dr. Roland Winston, físico del Argonne National Laboratory. Este tipo de espejo tiene la propiedad de que capta la radiación solar tanto directa como difusa sin necesidad de seguir al Sol. Puede ser necesario hacer algunos cambios periódicos en el ángulo de inclinación.

El colector de la figura 12 combinados espejos parabólicos compuestos con un tubo al vacío, a fin de constituir un colector concentrador “fijo”. No todo el espejo está enfocado en un momento dado y la radiación se puede captar desde muchas direcciones.

Figura 12. **Colector parabólico compuesto**



Fuente: Impresos Industriales. *Aplicaciones de la energía solar*. p.10-6.

Se han desarrollado muchos tipos de colector concentrador. Al igual que los tres presentados, en su mayoría resultan muy prometedores para los sistemas de energía solar del tipo industrial. Todos son capaces de producir temperaturas sumamente elevadas con buena eficiencia. Su costo y su complejidad excluyen su empleo en aplicaciones de calefacción residencial. Por otra parte, en su mayoría solo pueden captar la radiación con cielo despejado, situación poco frecuente en las áreas en que más se necesita la calefacción. Permiten captar energía a temperaturas elevadas para refrigeración para calentar el agua destinada a procesos industriales.

### 2.3. Cubierta del colector plano

La cubierta de un colector plano es la parte más importante de este, porque su función es la de captar la mayor cantidad de energía calórica proveniente del Sol con la mayor eficiencia posible.

#### 2.3.1. Cubiertas transparentes

El colector plano está diseñado para suministrar energía a temperaturas hasta de 65,5 °C aproximadamente sobre la temperatura exterior (ambiental). Sus temperaturas máximas de operación en condiciones de flujo son del orden de (65,5 a 115,5) °C. Capta la radiación directa, la difusa y la reflejada, no tiene que estar orientado directamente hacia el Sol a todas horas y requiere un mantenimiento mínimo a lo largo de su vida útil. El costo de la energía suministrada por un colector plano depende de su rendimiento térmico, su costo instalado y su vida útil efectiva es de 20 años aproximadamente.

La eficiencia del colector se mide como la razón entre la energía útil y la energía que incide sobre el colector (energía disponible). Expresada como una fórmula:

$$\text{Eficiencia del colector} = \frac{\text{Energía captada}}{\text{Energía disponible}} \times 100 \quad (1-2)$$

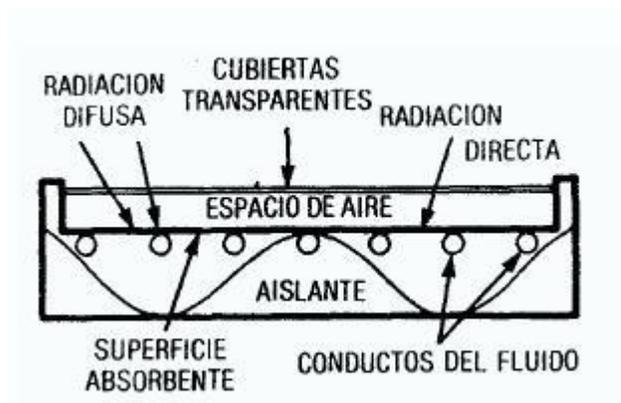
Tres factores principales influyen en la eficiencia del colector plano son:

- La razón a la cual se extrae el calor del colector. Se representa con “ $F_R$ ”.
- Las pérdidas de calor en el colector. Se indica con “ $U_L$ ”.
- La cantidad de energía transmitida a través de la cubierta y absorbida por la placa. Se representa con “ $\tau\alpha$ ”.

Si se conocen estos tres factores es posible pronosticar con precisión el rendimiento del colector. Por lo general se establecen y se controlan al diseñar cuatro partes principales del colector:

- Las cubiertas transparentes
- La capa que cubre a la placa de absorción (superficie de absorción)
- La placa de absorción
- El aislamiento del colector

Figura 13. **Sección transversal de un colector plano básico**



Fuente: Impresos Industriales. *Aplicaciones de la energía solar*. p.10-7.

La superficie debe captar la energía que incide sobre una superficie transparente, reflejada desde la superficie o transmitida a través de la superficie.

Que la energía sea absorbida, reflejada o transmitida dependerá de:

- La longitud de onda de la energía, o sea la longitud de cada pulso.
- El ángulo de incidencia o sea el ángulo con el cual la radiación solar cae sobre la superficie.
- El índice de refracción del material, medida relativa que indica que tanto se desviarán los rayos de energía al atravesar el material.
- El índice de absorción del material, medida relativa que indica cuanta energía absorberá la superficie.

Una buena cubierta de vidrio del colector debe transmitir la cantidad máxima de energía solar, transmitirla cualquiera que sea el ángulo de incidencia y no desviarla de manera que no pueda llegar a la placa de absorción, pero al mismo tiempo debe reflejar la cantidad máxima de energía calórica que pudiera emitir la placa de absorción. Como esta energía calórica tiene una longitud de onda diferente al de la radiación solar, esto se puede lograr con el mismo material, sin perturbar la transmisión de la energía solar.

Al mismo tiempo, un buen vidrio sobre el colector no debe presentar una superficie reflectora o que pueda absorber gran cantidad de energía. Para fines de captación, la energía reflejada por la cara exterior del vidrio se habrá perdido, y lo mismo se puede decir de la energía absorbida por el vidrio, lo cual ayudará un tanto a conservar las temperaturas dentro del colector.

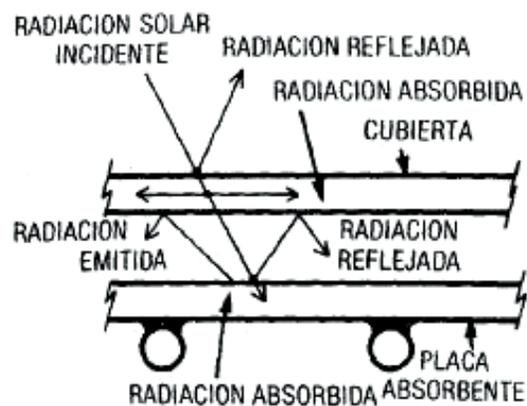
El Sol emite radiación de onda corta, con longitudes de onda de 0,21 a 3 micras.

La energía calórica que emite la placa de absorción en el interior del colector es radiación de onda larga, con longitudes de onda mayores de 3,0 micras.

Las mejores cubiertas de colector deberán tener las características siguientes:

- Elevada transmisibilidad de ondas cortas (baja reflectancia)
- Baja transmisibilidad de ondas largas (elevada reflectancia)
- Baja absorción a cualquier longitud de onda
- Excelente resistencia al clima y larga duración

Figura 14. Caminos que sigue la radiación en un colector plano



Fuente: Impresos Industriales. *Aplicaciones de la energía solar*. p.10-8.

En la tabla IV se comparan diversos materiales empleados para la cubierta del colector. El vidrio templado con bajo contenido de hierro combina bien la economía con el rendimiento.

Tabla IV. **Comparación de diversos materiales que usan para cubiertas y rendimiento relativo de cuatro colectores solares**

<b>TIPO DE CUBIERTA</b>	<b>PORCENTAJE DE TRANSMITANCIA DE RADIACIÓN SOLAR (ONDA CORTA)</b>	<b>PORCENTAJE DE TRANSMITANCIA INFRARROJA (ONDA LARGA)</b>	<b>ÍNDICE DE REFRACCIÓN</b>	<b>DURABILIDAD Y RESISTENCIA AL CLIMA</b>
Vidrio	91,50	2,0	1,50	Excelente
Vidrio templado con bajo contenido de hierro	87,50	2,0	1,51	Excelente
Láminas de vidrio con bajo contenido de hierro	87,50	2,0	1,51	Excelente
Vidrio flotado y templado	84,30	2,0	1,52	Excelente
Fibra de vidrio	77 a 87	0,1 a 0,3	1,54	Aceptable a bueno
Láminas acrílicas	80 a 90	2,0	1,49	Regular a bueno
Láminas de policarbonatos	73 a 84	2,0	1,59	Deficiente a bueno
Teflón FEP	90 a 92	25 a 56	1,34	Aceptable a bueno
Película de Poliéster	80 a 87	20 a 21	1,64 a 1.67	Aceptable a bueno

Fuente: Impresos Industriales. *Aplicaciones de la energía solar*. p.10-9.

De los nueve materiales que figuran en la lista, seis resultan muy satisfactorios. Tres parecen tener inconvenientes que habrá que examinar con detenimiento. Las películas de poliéster empleadas anteriormente parecían resistir mal el clima, pero descubrimientos recientes han demostrado su resistencia. El poliéster tiene elevada transmitancia al infrarrojo (baja reflectancia). Las láminas de policarbonatos parecen transmitir mal la energía solar. El Teflón FEP parece tener elevada transmitancia al infrarrojo.

Para hacer la elección final hay que tener en cuenta las propiedades físicas y mecánicas, lo mismo que el costo. La resistencia a la tensión, a la rotura, a la flexión y al impacto debe ser adecuada. El costo por metro cuadrado influye significativamente en el costo inicial instalado.

### **2.3.2. Captadores**

La placa de absorción del colector es la parte que recoge la energía transmitida a través de la cubierta de vidrio. Debe ser capaz de recoger y retener esa energía y estar construida en forma tal, que el medio de transferencia al calor pueda tomarla en modo eficiente. La configuración del flujo en la placa es importante para la efectividad del colector.

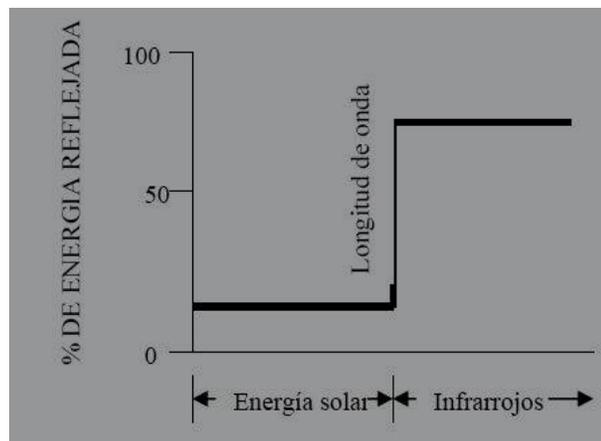
#### **2.3.2.1. Capas de absorción**

La superficie de la placa de absorción se cubre con una capa para mejorar su capacidad de captación y retención de la energía. Se emplean dos tipos generales de recubrimientos: superficies selectivas y superficies no selectivas. Las superficies selectivas absorben la mayor parte de la luz solar que incide sobre ellas y emiten muy poca radiación térmica. También las no selectivas absorben la mayor parte de la luz solar, pero emiten una gran cantidad de radiación térmica.

Las superficies selectivas se definen normalmente en términos de energía por longitudes de onda. La superficie absorberá una gran cantidad de energía solar de onda corta y emitirá muy poca energía calórica (infrarroja) de onda larga.

La figura 15 muestra el comportamiento de una superficie selectiva ideal. Reflejaría menos del cinco por ciento de la radiación solar, o sea que absorbería el 95 por ciento; pero, en la banda del infrarrojo, la mayor parte de la energía sería reflejada.

Figura 15. **Características de rendimiento hipotéticas de una superficie selectiva ideal**



Fuente: Impresos Industriales. *Aplicaciones de la energía solar*. p.10-9.

No existen las superficies ideales. Las realmente selectivas no tienen una longitud de onda crítica bien definida, ni tienen propiedades uniformes en las bandas de onda larga y onda corta. De manera que los valores de emisión responden más bien por lo general, a las temperaturas de la placa de absorción que a las longitudes de onda de energía.

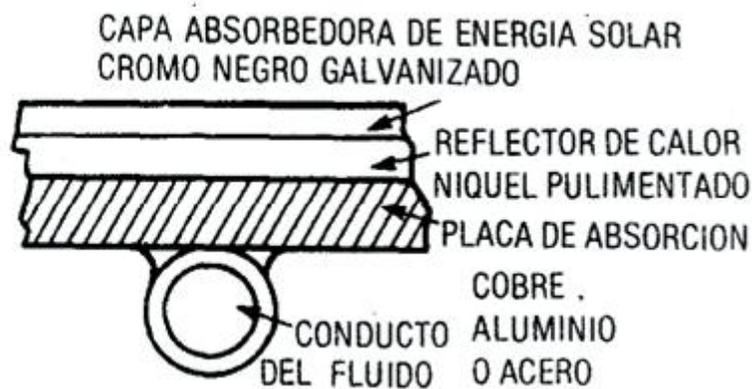
Si se aplican recubrimientos con elevada absortancia para la energía solar y elevada transmitancia de radiación infrarroja, a placas de absorción cuya emisión sea baja, el resultado será una captación eficiente con poca radiación.

La baja emisión de ondas largas se obtiene normalmente renunciando a alguna absorción de energía solar. Se busca un equilibrio eficiente entre las dos propiedades. También se deben considerar cuidadosamente el costo y la vida útil de los recubrimientos.

Muchos colectores se diseñan con superficies no selectivas, por ejemplo, con una capa de pintura negra, son bastante eficientes. La superficie selectiva no es requisito esencial para fabricar un buen colector, pero mejora la eficiencia con respecto a la de las superficies no selectivas.

La figura 16 muestra un tipo muy usado de superficie selectiva. Su duración es excelente en los sistemas de energía solar.

Figura 16. **Sección de Superficie selectiva de uso frecuente**



Fuente: Impresos Industriales. *Aplicaciones de la energía solar*. p.10-10.

La placa de absorción se baña primero con un metal; níquel, por ejemplo. Esto protege contra la corrosión y disminuye la emisividad. El níquel se recubre luego por galvanoplastia con negro de cromo.

Esto produce una capa de absorción de alto índice para las longitudes de onda de la radiación solar, pero que es transparente a infrarrojo. Este recubrimiento, depositado con un espesor correcto, dará de 95 a 96 por ciento de absorción y de 9 a 12 por ciento de emisión. Su temperatura de descomposición excede los 800 °F y parece que la humedad no le afecta.

En cambio, la superficie no selectiva cubierta con pintura negra tendrá una absorción del orden del 97 por ciento. Se están produciendo pinturas selectivas, una de las cuales, según se informa, ofrece 90 por ciento de absorción y solo 30 por ciento de emisividad.

No hay que preocuparse demasiado por los valores y relaciones de emisividad/absorción. La curva de rendimiento térmico del colector indicará su eficiencia térmica general, incluyendo la capa de recubrimiento. En cambio, habrá que preocuparse bastante por la duración esta última.

Placas de absorción. La placa de absorción puede ser de cualquier material plástico, de caucho o metal capaz de absorber la radiación solar. Debe tener conductos para que circule el líquido o el aire que extraerá el calor captado.

Se ha encontrado que las placas de metal son las más prácticas para calentar los edificios y el agua por medio de la energía solar. Se usan casi universalmente en los colectores planos cuando se trata de temperaturas medias.

En los colectores de buena calidad se emplea cobre, aluminio, acero al carbón, acero inoxidable o una combinación de ellos.

Cada uno de estos metales tiene ventajas y desventajas. Ninguno supera a los demás cuando se consideran todos los factores relativos a rendimiento, su vida útil, economía y peso.

La placa de absorción desempeña diversas funciones dentro del colector:

- Capta y remite la radiación solar.
- Transmite a un líquido o al aire el calor generado por la radiación solar.
- Cuenta con pasajes o conductos a través de los cuales circula el líquido o el aire por el colector, para recoger el calor.

En el caso de los colectores planos del tipo de líquido, la placa de absorción puede tener varias configuraciones confiables. En la figura 17 se muestran algunos de los tipos más populares. Entre ellos figuran los siguientes:

- Tubo en cinta
- Tubo en panel
- Tubo sobre cinta
- Tubo sobre panel
- Panel tipo oblea
- Aleta en el tubo
- Tubos con aletas

Tubo en cinta: con este método de producción, se estira una larga cinta metálica que lleva un tubo integrado. Un colector típico puede contener aproximadamente 30,48 m de tubo y cinta doblados en forma de serpentín, con los bordes de las aletas adyacentes atornillados mecánicamente o soldados entre sí, esta técnica no se usa mucho. Tiene la desventaja de que los tubos están muy separados y de que solo hay un conducto que recorre todo el panel.

Si llega a atascarse, el líquido dejará de circular. La eficiencia de las aletas tiende a ser baja. El tubo en cinta se puede usar también con elevadores paralelos soldados a los múltiples superior e inferior.

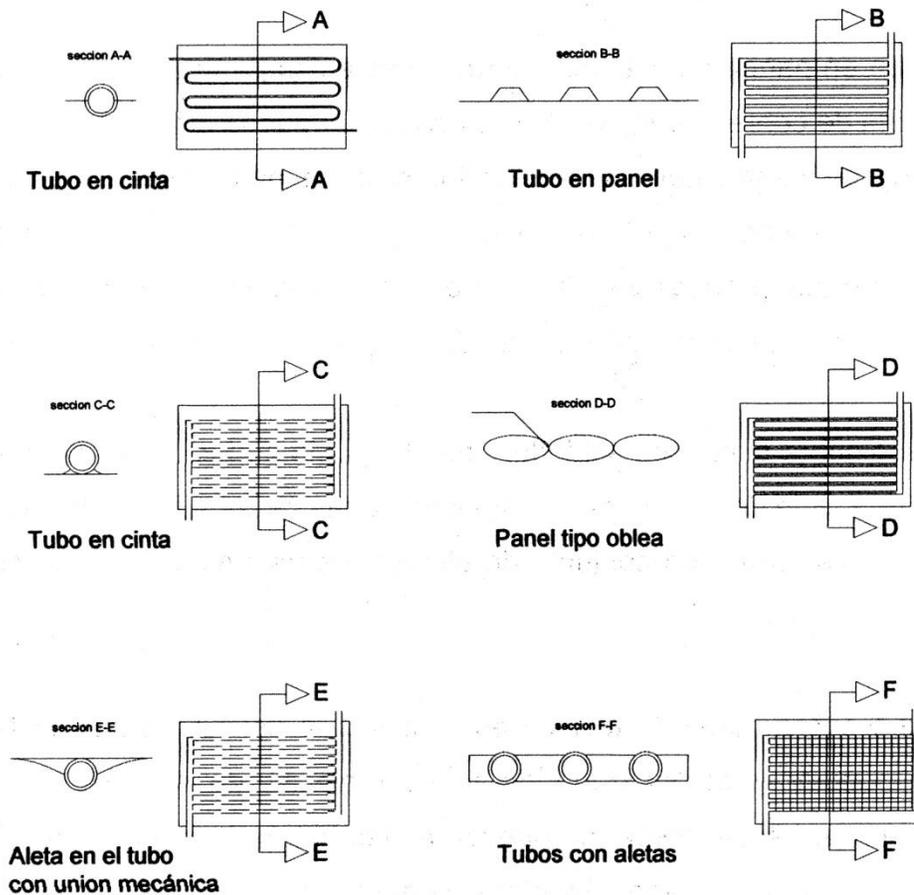
Tubo en panel: en esta configuración se estampa un patrón acanalado en una lámina de cobre o aluminio. Se coloca una segunda lámina sobre la primera y las dos se pasan por un laminador caliente para que se adhieran. Las láminas no se unen donde se puso el estampado. El sándwich recocido se coloca entre dos prensas y se inyecta aire a muy alta presión para inflamar los canales. Este sistema se caracteriza por una gran flexibilidad de circulación.

Tubo sobre cinta: con soldadura de alto punto de fusión se une un tubo de metal a una cinta de absorción. Se sueldan varias cintas a los múltiples superior e inferior para formar un conjunto de elevadores paralelos. El tubo sobre cinta no es muy popular.

Tubo sobre panel: la técnica es similar a la del tubo sobre cinta. Es un método popular y comprobado de fabricar placas de absorción. Tienen la ventaja de que, si se desea, se pueden ensamblar previamente los múltiples y los levadores para probarlos. La placa de absorción puede también ir extendida sobre el múltiple. Este parece ser el segundo método más popular actualmente para producir placas de absorción.

Panel tipo oblea: conocido con muchos nombres y presentando un número infinito de variantes, el panel oblea consiste en dos piezas de metal, generalmente acero, soldadas en varios lugares. La construcción del panel resulta muy fuerte y el área mojada es muy grande (la mayor parte es ocupado por el fluido de transferencia). Sus desventajas son: el peso del acero, su tendencia a oxidarse con facilidad, a menos que se proteja la superficie.

Figura 17. Seis tipos de placa de absorción de uso frecuente



Fuente: Impresos Industriales. *Aplicaciones de la energía solar*. p.10-12.

Tubo sobre panel: la técnica es similar a la del tubo sobre cinta. Es un método popular y comprobado de fabricar placas de absorción. Tienen la ventaja de que, si se desea, se pueden ensamblar previamente los múltiples y los levadores para probarlos.

La placa de absorción puede también ir extendida sobre el múltiple. Este parece ser el segundo método más popular actualmente para producir placas de absorción.

Panel tipo oblea: conocido con muchos nombres y presentando un número infinito de variantes, el panel oblea consiste en dos piezas de metal, generalmente acero, soldadas en varios lugares. La construcción del panel resulta muy fuerte y el área mojada es muy grande (la mayor parte es ocupado por el fluido de transferencia). Es definitivamente una fabricación de alta calidad. Sus desventajas son: el peso del acero, su tendencia a oxidarse con facilidad, a menos que se proteja la superficie.

Aleta en el tubo: en este método de producción se fija mecánicamente una aleta separada a los tubos elevadores. No hay unión metálica entre el tubo y la aleta, de manera que se pueden presentar deficiencias en la transferencia de calor. Si se producen en un determinado colector, el resultado se reflejará en la eficiencia térmica. La aleta y el tubo son por lo general de metales diferentes, por ejemplo, tubo de cobre y aleta de aluminio. Con este diseño, la corrosión galvánica en condiciones de humedad es definitivamente una posibilidad.

Tubos con aletas: en el diseño de tubos con aletas de aluminio en los elevadores de cobre, los que luego se dilatan para establecer una unión mecánica firme. Este diseño representa una aplicación de la tecnología de la calefacción y el acondicionamiento del aire conocido hasta ahora. La radiación solar incide en las aletas, las que actúan como trampas reflectoras que captan y retienen energía. Se afirma que esta configuración sufre una pérdida de eficiencia de dos al cuatro por ciento únicamente, cuando el recubrimiento superficial se omite deliberadamente con fines de prueba. Esto indica un rendimiento térmico excelente durante la vida útil del dispositivo.

Hay muchos paneles captadores de buena calidad para elegir. Es conveniente conocer sus diferencias, así como las ventajas y desventajas relativas de cada uno. La vida útil que se espera, la eficiencia térmica a lo largo de la vida útil y el costo inicial, son factores importantes que se deben tener en cuenta para elegir entre los excelentes diseños disponibles.

### **2.3.3. Aislantes**

Para máxima eficiencia del colector, debe estar aislado por detrás y por los lados. Las pérdidas que se producen por detrás son función de la conductividad térmica y el espesor del aislamiento. La temperatura ambiental es normalmente más baja en la parte posterior que en el frente del colector, puesto que el respaldo no recibe la radiación solar.

En un colector bien diseñado, en el cual el aislamiento de los lados tiene un valor R equivalente al respaldo, las pérdidas son pequeñas. Se pueden calcular aproximadamente que el calor escapa por el área del perímetro.

Entre los requisitos de diseño relativos al aislamiento de un buen colector plano, deben figurar los siguientes:

- No debe haber deterioro, gasificación ni vaporización a temperaturas de 204,4 °C.
- No debe haber deterioros debido a la repetición de los ciclos térmicos entre (-34,4 °C) y (+ 1371,1 °C).
- Conductancia térmica inferior a 0,1 Btu/h°F (R = 10 o mejor).

Hay cuatro tipos básicos de aisladores que se pueden considerar:

- Fibra mineral
- Fibra cerámica
- Espuma de vidrio o termoplástica
- Fibra de vidrio

Los aisladores de fibra mineral de cerámica, con excepción de la lana mineral, son materiales diseñados generalmente para soportar temperaturas más elevadas que las que suelen encontrarse en los colectores planos. Normalmente no se emplean debido a su cola de lana mineral, que es un relleno suelto que pierde las propiedades aisladoras cuando sufre los efectos del ciclo de humedad. Por lo general no se le considera aceptable.

La espuma de uretano y el poliestireno dilatado no tienen buena estabilidad a diferentes temperaturas, tienden a producir gasificación y sus características de inflamabilidad son menos que satisfactorias. Su empleo se debe limitar en los colectores en los cuales quedan completamente encerrados en su propio recipiente, separados de la cubierta y de la placa de absorción. La espuma de vidrio tiene buenas características y por lo general se le considera buen aislante.

En general la fibra de vidrio, de la calidad que suele emplearse en las construcciones, no es satisfactoria. Está elaborada con grandes cantidades de aglutinantes fenólicos, cuyo límite superior de temperatura es inferior a las temperaturas de estancamiento que se pueden encontrar en los colectores.

Las planchas de fibra de vidrio para altas temperaturas están fabricadas con poco o ningún aglutinante y constituyen un aislador muy satisfactorio.

Se fabrican con diferentes densidades, de manera que se debe verificar el factor R del espesor que se va usar.

#### **2.3.4. La caja del colector**

La caja de un colector bien diseñado desempeña tres funciones:

- Constituye un recipiente hermético para la placa de absorción y los aisladores.
- Permite fijar con firmeza el módulo colector a la estructura (el edificio).
- Es un mecanismo de apoyo, hermético y seguro para la cubierta.

Al igual que las placas de absorción, las cajas de colector son de muchos tipos, se pueden construir de metal, de madera, de plástico de concreto y de otros materiales. Los tipos más comunes están fabricados con:

- Aluminio
- Lamina galvanizada
- Fibra de vidrio laminada
- Termoplásticos para alta temperatura
- Madera
- Concreto en forma de panal, de peso ligero

Los puntos de la caja del colector que normalmente causan problemas son el ajuste y ensambles de las piezas. Es necesario asegurar sobre todo el respaldo y la cubierta a los lados. Recordar, particularmente tratándose de metales, que durante el ciclo térmico se producen dilataciones y contracciones.

La parte del colector que casusa más molestias es la unión entre la cubierta y la caja. Por lo general, la caja tiene un índice de dilatación diferente de la cubierta. Si fallan los selladores, la humedad penetrará al colector, el vidrio se empañará y el aislante se despegará. Estos problemas pueden reducir notablemente el rendimiento térmico del colector.

Hay muchas maneras de sellar satisfactoriamente la cubierta, aunque ningún método satisface todos los requisitos en todos los casos, sin embargo, se deben recordar ciertos principios al diseñar o al examinar las juntas y los selladores del colector, los cuales deben tener las características siguientes:

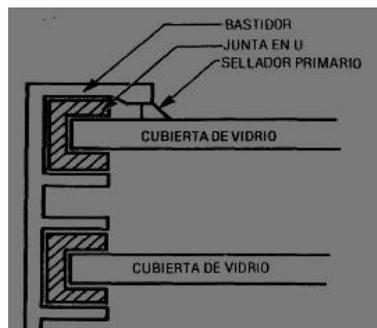
- Resistir la luz ultravioleta durante muchos años.
- Resistir los efectos de la intemperie durante muchos años.
- No endurecerse ni volverse quebradizos.
- Adherirse perfectamente a todas las superficies.
- Soportar ciclos de temperatura entre  $-34,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $204,44\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- Alargarse y contraerse en forma suficiente para soportar las dilataciones y contracciones sin ser destruidos.

La figura 18 muestra un método para sellar cubiertas sencillas o dobles. Se emplean juntas en forma de U para absorber las dilataciones y las contracciones y se aplica un sellador primario de intemperie, para impedir que penetre la humedad, en la figura 18 se usa una sola junta en forma de E, para doble cubierta. Otro método común consiste en construir unidades de doble cubierta en igual forma que las ventanas de “termovidrio”. Los vidrios se sellan juntos y luego se montan en una junta en U, también con este sistema se recomienda aplicar un sellador primario para intemperie.

Hay muchos otros diseños prácticos y posibles; pero siempre hay que asegurarse de que los selladores satisfagan los requisitos anteriores.

La elección de juntas y selladores es primordial. Muchos elastómeros no soportarán los efectos de la intemperie ni las temperaturas propias de la aplicación de que se trate.

Figura 18. **Métodos para sellar cubiertas sencillas y dobles**



Fuente: Impresos Industriales. *Aplicaciones de la energía solar*. p.10-15.

En el caso de las juntas, se ha encontrado que los cauchos EPDM y de silicón son adecuados. El EPDM tiene una resistencia limitada a temperaturas de 148,8 o 176,6 °C, mientras que el silicón tiene un límite mucho más alto. En cuanto a los selladores, la industria ha aceptado casi exclusivamente los silicones.

Cuando se emplean selladores de silicón hay que tomar varias precauciones: se debe evitar la adherencia por tres lados; es mejor que la relación entre la anchura y la profundidad del reborde sea de 2 a 1, y no se debe usar un reborde sellador de menos de 0,3175 cm ni de más de 1,27 cm.

Las bases son necesarias para asegurar la adherencia máxima entre el sellador de silicón y ciertas superficies. En la tabla V se pueden ver las recomendaciones de un sellador marca Dow Corning en cuanto a bases y preparación de superficies.

Tabla V. **Recomendaciones sobre imprimadores y preparación de superficies cuando se usan selladores de silicón**

<b>MATERIAL BASE</b>	<b>PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE</b>	<b>IMPRIMADOR QUE SE RECOMIENDA</b>
Vidrio, superficies vidriadas, teja	Frotar con solvente eliminador de grasas	Ninguno
Aluminio anodizado y pulido	Frotar con solvente eliminador de grasas	DOW CORNING® 1200
Acero al carbón, inoxidable, deteriorado	Frotar con solvente eliminador de grasas	DOW CORNING® 1200
Plástico tales como Acrílico, policarbonato, PVC	Frotar con solvente eliminador de grasas	DOW CORNING® 1200

Fuente: Impresos Industriales. *Aplicaciones de la energía solar*. p.0-17.

Las superficies deberán estar en buen estado, limpias y libres de polvo, suciedad, grasas y otros materiales que puedan impedir la adherencia.

Los selladores de silicón son muy conocidos como materiales de alta calidad y se han estado usando ampliamente por más de 20 años. Su resistencia a los efectos de la intemperie es excepcional.

Esto, unido al hecho de que resisten temperaturas superiores a los 232,2 °C, hace que las juntas y selladores de caucho silicón sean la elección lógica para diseñar colectores confiables y de larga duración.

## 2.4. Comparación del rendimiento térmico

El valor de dos o más colectores solares que compiten se puede determinar considerando lo siguiente:

- El uso que se dará al colector
- El costo de compra de cada uno
- La vida útil estimada
- Lo que costará mantenerlo en buen estado de funcionamiento
- El rendimiento térmico
- La situación geográfica del lugar donde se va a instalar

En esta sección se examina el rendimiento térmico del colector y se hará la comparación de las características de operación que por lo general presentan los diferentes colectores planos.

El rendimiento térmico de un colector solar se puede indicar de dos maneras. Una consiste en probarlo bajo condiciones distintas. La tarea es larga y costosa. La otra consiste en elegir una serie de condiciones estándar y extrapolar matemáticamente los resultados.

La ecuación de Hottel-Whillier determina el rendimiento termodinámico de los colectores. Permite el empleo de métodos de prueba de eficiencia instantáneos para clasificar adecuadamente la de los colectores.

La ASHRAE patrocinó el perfeccionamiento de un método uniforme de prueba de los colectores de energía solar, para fines de clasificación. El método aplica la ecuación de Hottel-Whillier.

El patrocinio de la ASHRAE dio por resultado un método estándar de prueba generalmente aceptado en la industria de la energía solar.

Se le llama ASHRAE STANDARD 93-77: métodos de prueba para determinar el rendimiento térmico de los colectores solares.

Cuando se consideren las eficiencias térmicas de los diferentes colectores, se debe insistir en que los colectores que se comparan sean sometidos a prueba aplicando este método estándar.

#### **2.4.1. Eficiencia del colector**

La eficiencia del colector se define de este modo:

$$\text{Eficiencia del colector} = \frac{\text{Energía captada utilizable}}{\text{Energía solar que llega al colector}} \quad (2-2)$$

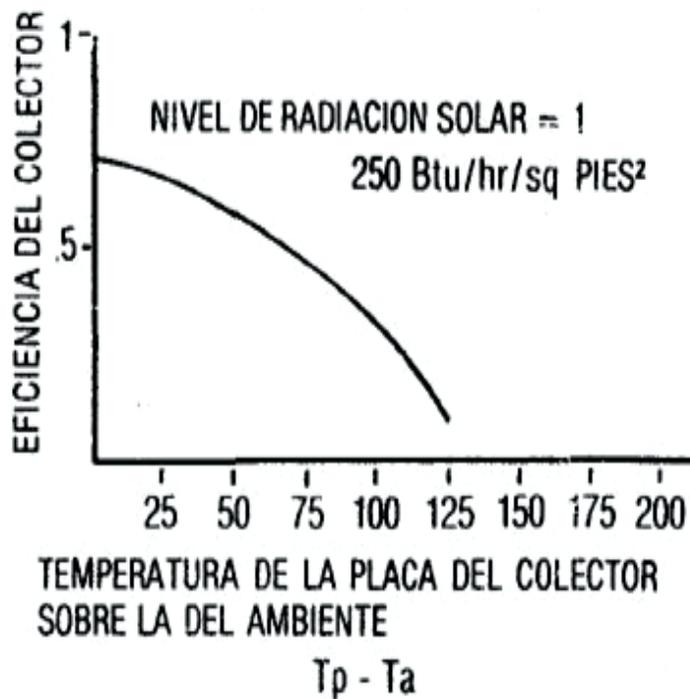
A medida que la temperatura del colector aumenta con respecto a la del aire circundante, las pérdidas de calor en el colector van siendo mayores y disminuye la energía utilizable.

El resultado es una menor eficiencia del colector a temperaturas más altas. La proporción en que disminuye la eficiencia del colector es una medida importante de su comportamiento. Para determinar la tasa de pérdida, se debe medir la eficiencia del colector a diferentes temperaturas.

En la figura 19 se puede ver cómo decae la eficiencia a medida que la temperatura de la placa aumenta con respecto a la del ambiente.

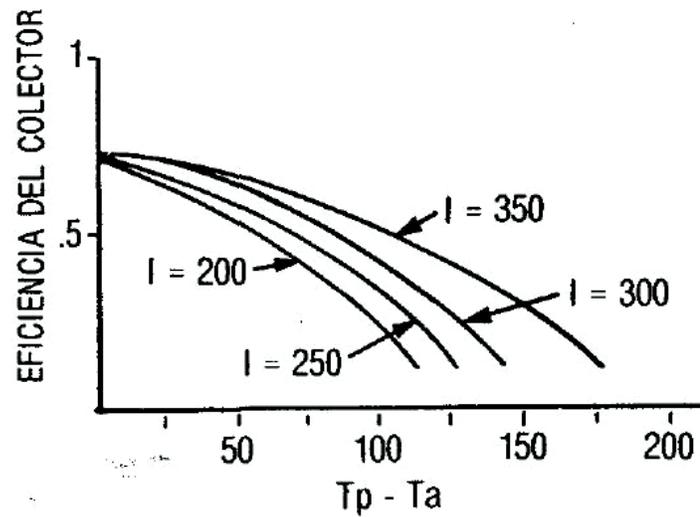
El colector usado en este ejemplo tenía una insolación (1), o sea la energía total recibida en su superficie, de  $788,39 \text{ W/m}^2$  ( $250 \text{ Btu/pie}^2 \text{ h}$ ). Si varía la energía incidente, varía también la tasa de disminución de la eficiencia. Las curvas de la figura 20 ilustran lo anterior.

Figura 19. Rendimiento térmico de un colector solar



Fuente: Impresos Industriales. *Aplicaciones de la energía solar*. p.10-19.

Figura 20. **Disminución de la eficiencia del colector por la variación de la energía solar incidente**



Fuente: Impresos Industriales. *Aplicaciones de la energía solar*. p.10-19.

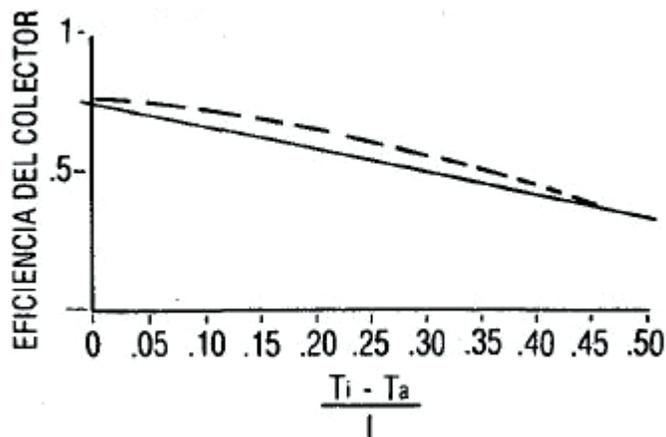
El método de comparación de la ASHRAE permite determinar una curva única que represente todas las condiciones de radiación solar. El eje de la temperatura de colector (eje horizontal) se modifica así:

$$\frac{\text{Temperatura (de entrada)} - \text{Temperatura (ambiental)}}{\text{Radiación solar incidente}} \quad (3-2)$$

Adviértase que se ha usado la temperatura de entrada del colector en vez de la temperatura media a través de la placa. La de entrada se puede medir directamente, por lo cual es más exacta y fácil de obtener. La temperatura media se tiene que calcular observando las de entrada y de salida y obteniendo el promedio.

La figura 21 muestra una gráfica ASHRAE típica de rendimiento térmico. La eficiencia del colector se determinará a una temperatura dada, dividida por la luz solar incidente. El trazo se ha convertido en una recta. Algunos colectores planos, y la mayoría de los concentradores, no siguen esta línea recta. Siguen más bien una curva que indica una variación de la pérdida de calor con la temperatura del receptor. Esta posibilidad se indica en la misma gráfica mediante una línea de trazos.

Figura 21. **Gráfica ASHRAE típica de rendimiento térmico de un colector solar**



Fuente: Impresos Industriales. *Aplicaciones de la energía solar*. p.10-19.

Obviamente, cuando no exista diferencia de temperatura el colector estará funcionando a su rendimiento teórico máximo. Este rendimiento viene a ser el producto de estos factores:

(Factor de remoción del calor) x (Coeficiente de pérdida en la transferencia de calor) y se expresa así:

$$(F_R)(\tau\alpha) \tag{4-2}$$

Según aumenta la diferencia de temperatura, la eficiencia disminuye en una proporción que es el producto de:

(Factor de remoción de calor) x (Coeficiente de pérdida en la transferencia de calor) y se expresa así:

$$(F_R) (U_L) \quad (5-2)$$

Por tanto, los factores principales que gobiernan el rendimiento de un colector, es decir,  $F_R$ ,  $U_L$  y  $\tau\alpha$ , quedan descritos mediante un método preciso de prueba. Es posible comparar en forma confiable el rendimiento de los colectores que se consideran.

El valor del producto " $(F_R)(\tau\alpha)$ " se hallará en la intersección de la curva de eficiencia con el eje vertical de la figura 21 para el presente ejemplo.

$$(F_R)(\tau\alpha) = 0,75 \quad (6-2)$$

El valor de " $(F_R) (U_L)$ " lo da la pendiente de la curva de eficiencia, que se puede calcular matemáticamente. Primero se elige un punto sobre la curva y se conecta con el eje vertical por medio de una línea. Así se formará un triángulo. La pendiente se calcula dividiendo uno de los catetos (el eje vertical) por el otro cateto (el horizontal). En este ejemplo, si se toma el punto en donde termina la curva:

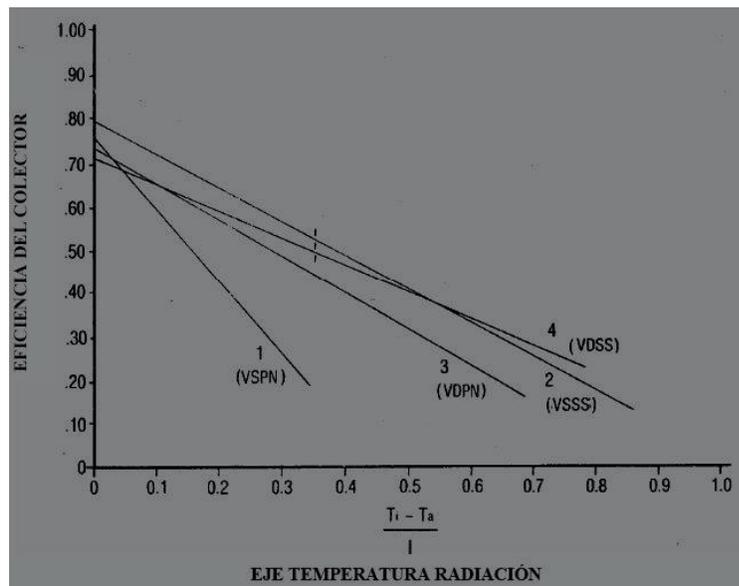
$$F_R U_L = \frac{0,425}{0,50} = 0,85 \quad (7-2)$$

La figura 22 muestra cuatro curvas ASHRAE 93-77 representativas de rendimiento del colector.

Las curvas se han numerado de acuerdo con el colector sometido a prueba. Todos los colectores eran del tipo líquido, con las diferencias siguientes:

- De una sola cubierta, con el captador plano pintado de negro
- De una sola cubierta con captador recubierto por una capa selectiva
- De doble cubierta, con captador plano pintado de negro
- De doble cubierta, con captador recubierto por una capa selectiva

Figura 22. **Curvas representativas ASHRAE 93-77 del rendimiento de cuatro colectores planos del tipo líquido**



Fuente: Impresos Industriales. *Aplicaciones de la energía solar*. p.10-21.

Se pueden hacer algunas observaciones interesantes. Comparando el colector 2 con el colector 4, de una y mas cubiertas respectivamente y con colectores de superficie selectiva, el de una sola cubierta da mejor rendimiento que el de cubierta doble, hasta aproximadamente 0,525 sobre el eje de temperatura-radiación (eje horizontal). A niveles de radiación de 630,71 W/m<sup>2</sup> (200 Btu/pie<sup>2</sup> h) y con 10 °C (50 °F) de temperatura ambiental:

$$\frac{T_1 - 50}{200} = 0,525 \quad (8-2)$$

$$T = (200)(0,525) + 50 = 155 \text{ } ^\circ F \quad (9-2)$$

De manera que con temperaturas de entrada de 68,32 °C (155°F) y con estas condiciones de radiación y temperatura ambiental, los rendimientos son iguales.

Por debajo de esa temperatura, el colector de una sola cubierta da mejor rendimiento. Por encima de esa temperatura, el de doble cubierta rinde más.

Tabla VI. **Rendimiento relativo de cuatro colectores solares**

NÚMERO DE VIDRIOS	CUBIERTA	CAPA ABSORBENTE	$(F_R)(\tau\alpha)$	$(F_R)(U_L)$
1	Sencilla	Pintura negra	0,77	1.73
2	Sencilla	Superficie selectiva	0,80	0,78
3	Doble	Pintura negra	0,74	0,84
4	Doble	Superficie selectiva	0,72	0,63

Fuente: Impresos Industriales. *Aplicaciones de la energía solar*. p.10-21.

Tomando este punto de cruce se pueden comparar los colectores en condiciones de temperaturas ambientales y niveles de radiación variables.

Tabla VII. **Temperaturas de entrada de un colector calculadas tomando niveles de radiación (I) y temperaturas ambientales diferentes**

<b>RADIACIÓN (I) W/m<sup>2</sup></b>	<b>TEMPERATURA AMBIENTE</b>	<b>TEMPERATURA DE ENTRADA, PUNTO DE CRUCE</b>
473,03	-6,6 °C	36,6 °C
788,39	-6,6 °C	66,1 °C
1103,75	-6,6 °C	95,5 °C
788,39	32,2 °C	76,1 °C
1103,73	32,2 °C	105,0 °C
	32,2 °C	134,4 °C

Fuente: Impresos Industriales .*Aplicaciones de la energía solar*. p.10-22.

Cuando los valores de radiación son bajos y se requiere calor en el invierno, el colector de doble cubierta es el mejor, suponiendo que se requiere que el agua de almacenamiento esté a 71,1 °C.

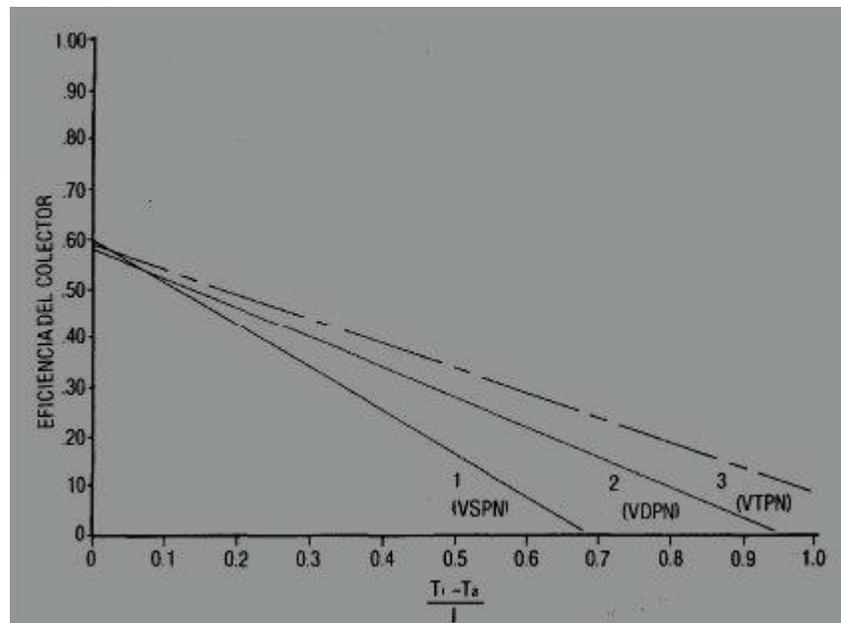
En cambio, cuando los valores de radiación son altos, el colector de una sola cubierta se comportará muy adecuadamente.

Si se desea que el agua para el servicio esté a 48,8 °C durante todo el año, el colector de una sola cubierta estará muy indicado, salvo en las aéreas en donde la radiación es baja. Si la diferencia de costo es apreciable, deberá considerarse definitivamente. Por comparación de curvas similares se pueden hacer muchas suposiciones, respecto a cual colector se debe considerar para análisis térmicos adicionales mediante programas de computadora.

La figura 23 muestra curvas ASHRAE representativas para tales colectores planos del tipo de aire. Los comparados tenían las características siguientes:

- Una sola cubierta, con el captador pintado de negro
- Doble cubierta, con el captador pintado de negro
- Triple cubierta, con el captador pintado de negro

Figura 23. **Curvas ASHRAE de tres colectores de tipo aire**



Fuente: Impresos Industriales. *Aplicaciones de la energía solar*. p.10-23.

Para estos se pueden hacer cálculos y observaciones similares a los que se hicieron en el caso de los cuatro colectores de tipo líquido.

El estándar ASHRAE 93-77 proporciona un medio para comparar el rendimiento térmico de diferentes colectores.

Cuando los datos térmicos se combinan con información relativa a la situación geográfica, el uso, el mantenimiento, la vida útil y el costo, se puede tomar la mejor decisión.

### 3. CÁLCULO Y DIMENSIONAMIENTO DE COLECTORES SOLARES

#### 3.1. Capacidad del sistema

Para diseñar un sistema de calentamiento de agua lo primero que se debe conocer es la capacidad de agua a utilizar, la temperatura a la entrada del colector y la temperatura de almacenamiento, se debe conocer la cantidad de agua total que se utilizará en un día.

$$capacidad = \frac{V}{Dia} \quad (1-3)$$

Donde V es el volumen del agua requerida

#### 3.2. Cálculo del colector solar

Después de que se conoce la capacidad del sistema se procede con la memoria de cálculo, en la cual se utilizó el modelo matemático propuesto por Duffie & Beckmann, el cual dice que el calor útil es igual a:

$$Q_u = StF_{RAc} - StF_{RAc}(T_e - T_a) \quad (2-3)$$

Donde:

$StF_{RAc}$  : calor que se obtiene por radiación

$StF_{RAc}$  : calor total que se pierde

$Q_u$  : calor aprovechado del colector

Reduciendo la ecuación (2-3) se tiene.

$$Q_u = F_R A_c [S_t - U_L (T_e - T_a)] \quad (3-3)$$

$Q_u$ : calor útil

$A_c$ : área del colector

$S$ : radiación global que llega a la superficie del colector

$t$ : es la transmisión de la cubierta

$U_L$ : coeficiente total de pérdidas

$T_e$ : temperatura de entrada del fluido al colector

$T_a$ : temperatura ambiente

$F_R$ : factor de remoción de calor

El cálculo del calor demandado ( $Q_D$ ) dado en Joule es:

$$Q_D = \frac{m C_p \Delta T}{1000} \quad (4-3)$$

$m$  = masa en kg del agua a calentar.

$C_p$  = calor específico del agua a presión constante.

$\Delta T$  = diferencia entre la temperatura a la cual se desea elevar la temperatura y la temperatura mínima promedio en la ciudad de Guatemala dada en grados Kelvin.

La eficiencia del colector  $\eta_c$  dada en Joule está dada por:

$$\eta_c = \frac{Q_{ud}}{RTD} * 100 \quad (5-3)$$

$Q_{ud}$  = calor útil en  $J/m^2$  durante el día, suma del calor medido por las horas del día, en la ciudad de Guatemala.

RTD = radiación solar total diaria,  $J/m^2$ .

El área del colector solar necesaria

$$A_c = \frac{Q_D}{RTD * \eta_c} \quad (6-3)$$

Para obtener el calor útil se tendrá que pasar una serie de cálculos de factores que influyen en el mismo.

Coefficiente total de pérdidas ( $U_L$ )

$$U_L = U_t + U_b \quad (7-3)$$

Donde:

$$U_t = \left[ \frac{N}{\left(\frac{344}{T_p}\right) \left(\frac{T_p - T_a}{N+f}\right)^{0.31}} + \frac{1}{h_w} \right]^{-1} + \left[ \frac{\sigma(T_p + T_a)(T_p^2 + T_a^2)}{[\varepsilon_p + 0.0425N(1 - \varepsilon_p)]^{-1} + \left[\frac{2N+f-1}{\varepsilon_g}\right]^{-N}} \right] \quad (8-3)$$

$U_b = \frac{k}{L}$  : pérdidas hacia abajo.

k: conductividad térmica del aislante.

L: espesor del aislante.

$U_t$ : pérdidas hacia arriba.

N: número de cubiertas de vidrio.

F: factor que relaciona el coeficiente de película con el número de cubiertas.

$\varepsilon_g$ : emitancia del vidrio.

$\varepsilon_p$ : emitancia de la placa.

$T_a$ : temperatura ambiente dada en grados Kelvin.

$T_p$ : temperatura de la placa dada en grados Kelvin.

$\sigma$ : constante de Boltzmann,  $5,6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ .

$h_w$ : factor que relaciona el coeficiente de transferencia de calor al ambiente con la velocidad del viento.

$$h_w = 5,7 + 3.8V \frac{W}{m^2 K} \quad (9-3)$$

$V$ : velocidad del viento en m/s

$$f = h(1,0 - 0,04h_w + 5,0 \times 10^{-4} h_w^2)(1 + 0,058N) \quad (10-3)$$

Eficacia estándar de la aleta  $F$ :

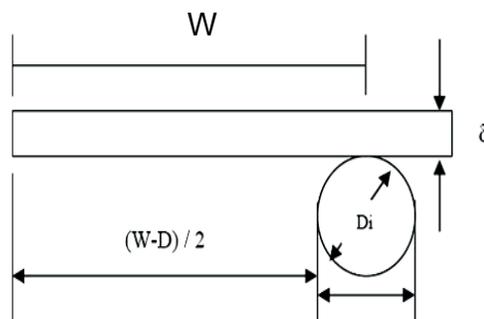
$$F = \left[ \frac{\tanh\left(m \frac{W-D}{2}\right)}{m \frac{W-D}{2}} \right] \quad (11-3)$$

$W$ : separación entre tubos.

$K$ : conductividad térmica del material de la aleta.

$\delta$ : espesor de la aleta.

Figura 24. **Croquis para localizar las variables  $W$ ,  $D_i$  y  $\delta$**



Fuente: elaboración propia, con AutoCAD 2010.

Factor de eficiencia del colector ( $F'$ )

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{W \left[ \frac{1}{U_L[D+(W-D)F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D I h_{fi}} \right]} \quad (12-3)$$

Conductancia de la soldadura  $C_b$

$$C_b = k_b \frac{b}{\gamma} \quad (13-3)$$

$k_b$ : conductividad térmica de la soldadura (W/m·K).

$b$ : longitud de la soldadura (m).

$\gamma$ : espesor promedio de la soldadura (m).

$F_R$ : factor de remoción del calor, parámetro que penaliza la energía solar que llega la placa del área del colector.

$$F_R = \frac{GC_p}{U_L} \left[ 1 - e^{-\frac{U_L F'}{GC_p}} \right] \quad (14-3)$$

$G$ : Proporción del flujo por la unidad de área

$$G = \frac{m}{A_c} \quad (15-3)$$

$m$ : flujo másico en un punto

$A_c$ : área del colector

Calor entregado al fluido por el colector  $Q_u$

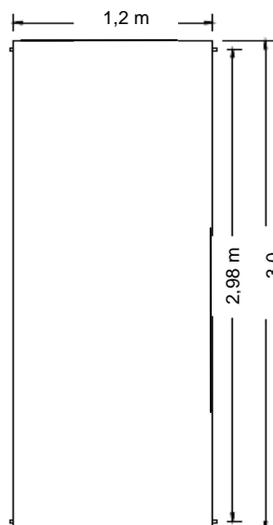
$$Q_u = F_R A_c [st - U_L(T_e - T_a)] \quad (16-3)$$

Debe aclararse que todo lo expuesto anteriormente se utiliza para el diseño de los colectores solares y obtener características deseadas; para el cálculo en proyectos solo es necesario calcular pocas variables, valiéndose de conceptos básicos de termodinámica y de transferencia de calor, pues los fabricantes proporcionan las características energéticas del colector y el proyectista solo evaluará si este se adecua a las necesidades del proyecto.

### 3.3.3. Dimensionamiento del colector

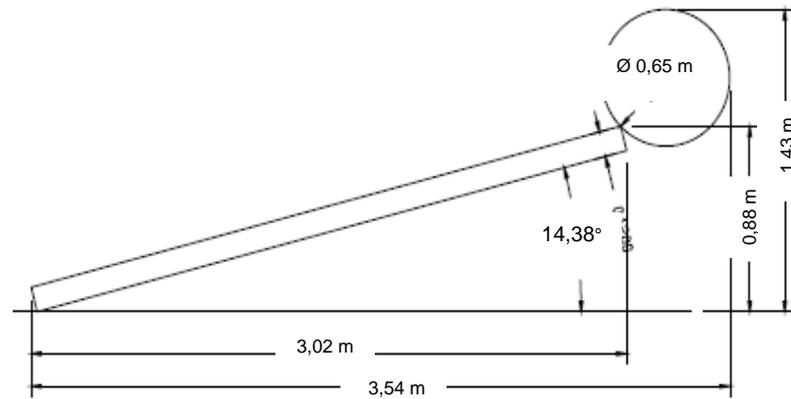
Escoger el colector adecuado, que satisfaga las necesidades de un proyecto que requiera agua caliente, depende de seleccionar el equipo correcto. Seleccionar la cantidad y tamaño de los equipos de captación solar, depende de la cantidad y tasa de consumo de agua caliente.

Figura 25. Dimensiones de una placa colectora de radiación típica



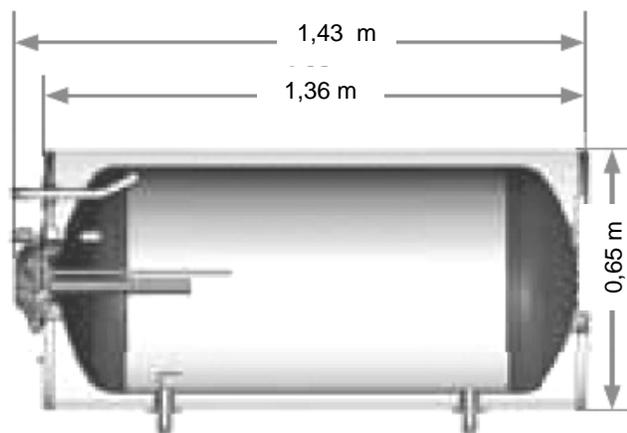
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2010.

Figura 26. **Configuración típica de una placa colectora y termotanque**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2010.

Figura 27. **Dimensiones de un termotanque de 300 litros**



Fuente: *Catalogo técnico*

*chromagen*.[www.chromagen.es/download/catalogo\\_tecnico\\_chromagen\\_ESP.pdf](http://www.chromagen.es/download/catalogo_tecnico_chromagen_ESP.pdf). p. 25.

Consulta: 3 de marzo de 2014.

### 3.4. Cálculo del termotanque

El termotanque es donde se almacena el agua caliente que proporcione el colector solar, tendrá que tener las dimensiones adecuadas para que pueda mantener 300 litros de agua caliente que es la capacidad requerida y 1,43 m de longitud, ya que esto es para que el termotanque no exceda las dimensiones del colector, para darle un poco de estética y porque la hoja de material tienen un ancho aproximado de 1,25 m.

Se tiene el volumen:

$$V = 300 \text{ L} * \frac{1 \text{ m}^3}{1\ 000 \text{ L}}$$

$$V = 0,3 \text{ m}^3$$

Calculando el diámetro interno  $D$ :

$$\text{El diámetro de un cilindro viene dado por } D = \sqrt{\frac{V*4}{L*\pi}} \quad (17-3)$$

$$\text{Substituyendo valores en la ecuación (17-3), } D = \sqrt{\frac{0,3 \text{ m}^3*4}{1,43 \text{ m}*\pi}}$$

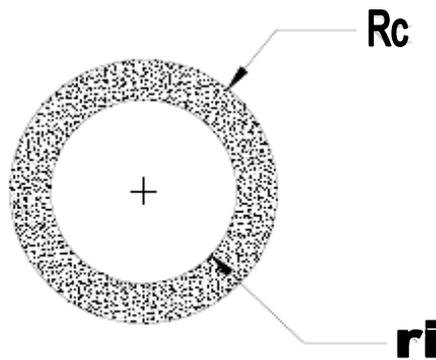
$$D = 0,51 \text{ m}$$

Este es el diámetro interior del termotanque, por lo tanto se procede a calcular el diámetro exterior con su aislante térmico.

### 3.4.1. Cálculo del aislante

Conociendo el radio interior se puede calcular el radio exterior y el espesor del aislante como se muestra, este sirve para disminuir las pérdidas de calor en el termotanque.

Figura 28. Croquis del aislante en un termotanque y las variables  $R_c$  y  $r_i$  para calcular su espesor



Fuente: elaboración propia, con AutoCAD 2010.

Se tiene la conductividad térmica del aislante ( $k$ ) y el coeficiente de convección para un cilindro concéntrico ( $h$ ) es:

$$k = 0,035 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$h = 0,04915 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Por lo tanto se utiliza el modelo matemático del radio crítico:

$$R_c = k/h \tag{18-3}$$

Substituyendo valores en la ecuación (18-3)

$$R_c = \frac{0,035}{0,04915} = 0,712$$

$$R_c - r_i = 0,712 \text{ m} - 0,65 \text{ m} = 0,062 \text{ m}$$

Los fabricantes de colectores usan un espesor de entre dos pulgadas a dos pulgadas y media, entre más aislante se coloque mayor será la capacidad de retención de calor pero esto sube el costo, estos espesores son suficientes para no dejar escapar el calor en un termotanque, porque a lo máximo solo se pierden de 1 a 3°C durante 24 horas, gracias a un sistema de regulación de temperatura el termotanque cuenta con una resistencia eléctrica de bajo consumo, que eleva la temperatura cuando por algún motivo baja demasiado la temperatura en el termotanque.

## **4. INVESTIGACIÓN**

### **4.1. Antecedentes de operación del Hospital General San Juan de Dios**

Es una institución dependiente del Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social, orientada al tratamiento de pacientes con escasos recursos económicos y como apoyo de la Facultad de Medicina de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Está constituido por los departamentos de Medicina Interna, Cardiología, Neurología, Neumología, Hemato-oncología, Pediatría, Anestesia, Maternidad, Neonatología, Gineco-obstetricia, Medicina Nuclear, Medicina Física y Rehabilitación, Oftalmología, Neurocirugía e Ingeniería y Mantenimiento. Los servicios más solicitados son consulta externa y emergencia.

El Departamento de Mantenimiento fue creado con el fin de preservar la vida útil de equipos e instalaciones, tratando de garantizar que el servicio al paciente y usuarios en general sea constante, con rapidez y de la mejor calidad posible. Es de vital importancia, puesto que de él depende el buen funcionamiento de equipos e instalaciones que existen en la institución.

Las instalaciones y equipos del hospital tienen alrededor de 30 años de servicio, uno de los más afectados es el de distribución y generación de vapor, la generación de vapor se hace con una caldera piro-tubular, el hospital cuenta con dos de estas, la generación de vapor se realiza con una caldera a la vez, mientras la otra se encuentra como apoyo ante una falla de la que se encuentre en servicio.

Con el paso del tiempo el equipo de distribución de vapor ha sufrido deterioro y la eficiencia de las calderas se ve afectada y en consecuencia se eleva el costo en la compra y aprovechamiento de combustible diésel es por esta razón que el presente trabajo determinará la viabilidad de proveer agua caliente a aproximadamente 60 °C calentada mediante energía solar, para el suministro parcial de agua caliente, y así disminuir el consumo de combustible en el encendido de la calderas del Hospital General San Juan de Dios.

## **4.2. Sistema de distribución de vapor**

El vapor se genera en dos calderas de combustible diésel y es enviado a las aéreas de lavandería, cocina y esterilización.

### **4.2.1. Vapor centralizado**

Es el que genera una caldera, distribuyéndolo por un sistema de tuberías, a los diferentes equipos que están conectados directamente a ella.

#### **4.2.1.1. Intercambio directo**

En ocasiones se calienta el agua directamente con vapor, pueden ser verticales u horizontales y constan de una carcasa de acero, control para nivel de agua, purgador para agua de condensación, grifos de evacuación, purgadores de vapor o aire y un sistema de bandejas escalonadas. El agua fría entra por la parte superior de la cubierta cayendo por gravedad sobre las bandejas traslapadas, interrumpiendo la corriente. El vapor que ingresa cerca del centro de la cubierta se mezcla con el agua, llegando instantáneamente al punto de condensación y así le transmite su calor.

El agua caliente y la mezcla condensada se recolectan en la parte inferior de la cubierta y luego se envían hacia la caldera por medio de una bomba de alimentación. Tiene un control de flotación, el cual acciona la válvula de entrada de agua, que mantiene un nivel constante en el tanque. Una descarga en la parte superior elimina el exceso de vapor y gases no condensables. Su capacidad puede ser de hasta 500 galones/minuto, calentando el agua a más de 50 °C, consumiendo 8200 kg/h de vapor.

#### **4.2.1.2. Vapor generado por resistencia eléctrica**

El vapor se genera por medio de resistencias eléctricas que se encuentran rodeadas por el agua a la que se le va a elevar la temperatura. Consta de:

- Cuerpo principal

Es un recipiente cerrado que almacena el agua que se va a calentar y el vapor que se produce en el proceso. Soporta presiones desde 15 a 40 psi. Cuenta con entrada para el agua, salida para vapor, drenaje indicador del nivel para el agua y el panel en donde van las resistencias.

- Elementos para calefacción

Son resistencias que trabajan por inmersión con una alta capacidad para producir calor. Están diseñadas con un bulbo de contacto directo, que detecta el exceso de calor que se produce cuando falta el agua e interrumpe el paso de corriente a las resistencias o con un micro interruptor y detector de nivel, que funciona cuando el nivel de agua está por debajo de lo normal, generando una señal que corta el paso de

corriente hacia las resistencias. Su eficiencia decrece con la acumulación de incrustaciones en la superficie, al formar un aislamiento térmico dañino.

- Regulador de presión

Conecta y desconecta la corriente en las resistencias cuando la presión en el equipo disminuye o aumenta respecto a valores prefijados.

- Interruptor protector y conmutador

Sirve para poner a funcionar el generador al iniciar el trabajo, también para mantener la presión, ya que conecta y desconecta las resistencias.

## **5. SISTEMA PROPUESTO**

### **5.1. Descripción del sistema propuesto**

El sistema consiste en un conjunto de colectores solares de placa plana, los colectores utilizarán la radiación del Sol para elevar la temperatura al agua de alimentación de la caldera cuando esta sea puesta en servicio.

Los colectores solares planos alcanzan aproximadamente en promedio una temperatura de 57 °C, se recomienda que la temperatura mínima para el agua de alimentación de las calderas esté por lo menos a 82 °C.

Los colectores solares actuales cuentan con un sistema de control de temperatura, que permite programar la temperatura final del agua almacenada en el tanque del colector y pueden elevarla hasta 75 °C o más y mantenerla constante utilizando una resistencia eléctrica de bajo consumo, esta es una temperatura aceptable para alimentar la caldera.

El tanque de cada colector almacena 300 litros, la caldera se llena con 1125 galones, siete colectores proveen 713,26 galones, nueve colectores producen un poco más de la mitad del agua para llenar la caldera, no se recomienda la compra de mas colectores porque elevaría los costos, y se obtendría un menor beneficio del esperado, se puede optar por la instalación de un tanque auxiliar aislado, para almacenar agua calentada por los colectores y dar espacio para calentar más agua, se estima que los colectores se llenan antes del medio día y pueden seguir calentando más agua por la tarde.

El propósito de este sistema es principalmente el ahorro de combustible durante el arranque de la caldera a tempranas horas de la mañana, porque es en el arranque de la caldera cuando más combustible se utiliza y lleva cierto tiempo alcanzar las condiciones de servicio.

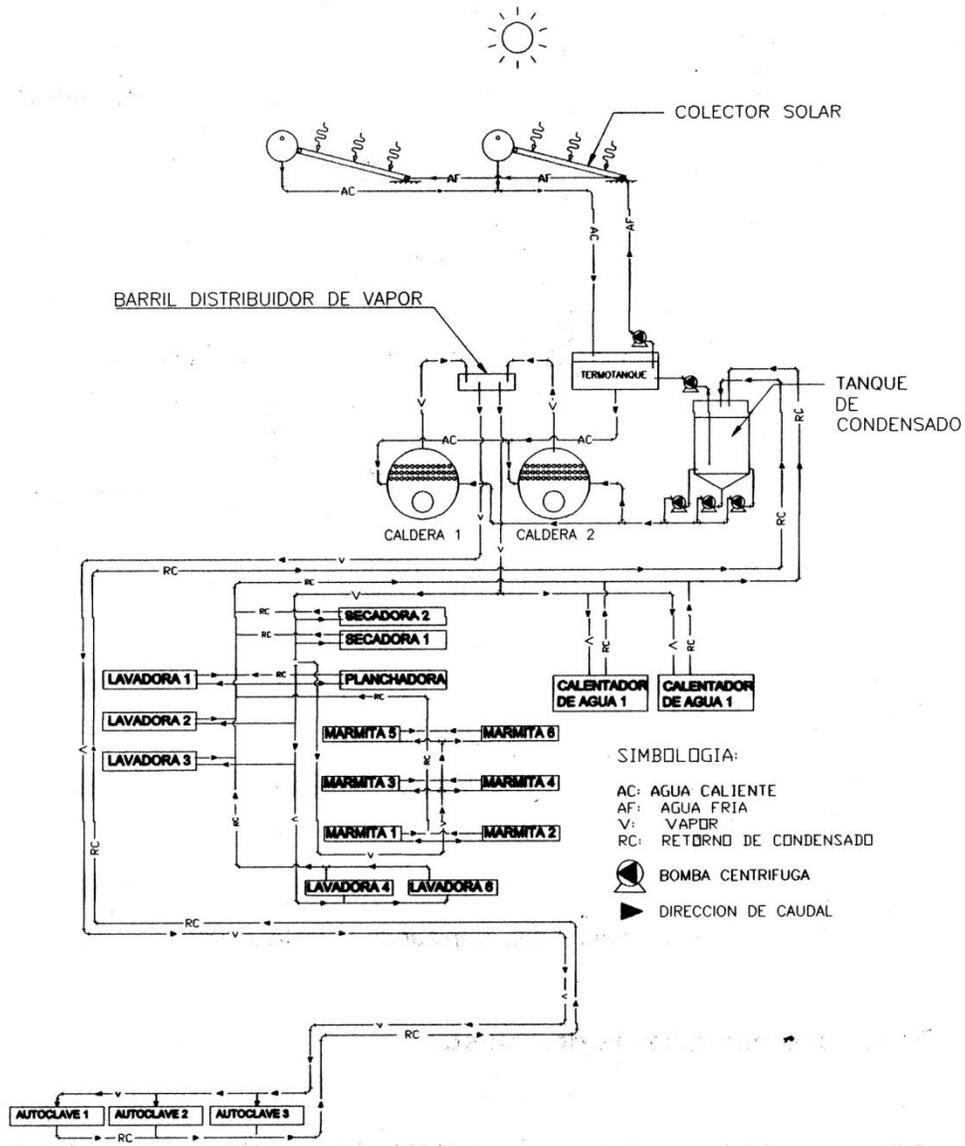
Durante el arranque de la caldera la tasa de inyección de combustible debe ser poca, mientras todo el sistema se calienta lentamente para evitar el choque térmico, esto hace que el tiempo de puesta en servicio de la caldera sea considerable.

Los colectores deben ser llenados con el agua del tanque de retorno de condensado que se encuentra en el cuarto de calderas, la razón de esto es que el agua está tratada con químicos para evitar problemas de mineralización del agua y otras características no deseadas para la operación de la caldera, es una ventaja que ayudará al colector a evitar problemas asociados con el agua no tratada.

El agua tratada debe ser bombeada desde el tanque de condensado hasta cada colector en la azotea del edificio, que es donde se recomienda la instalación de los colectores.

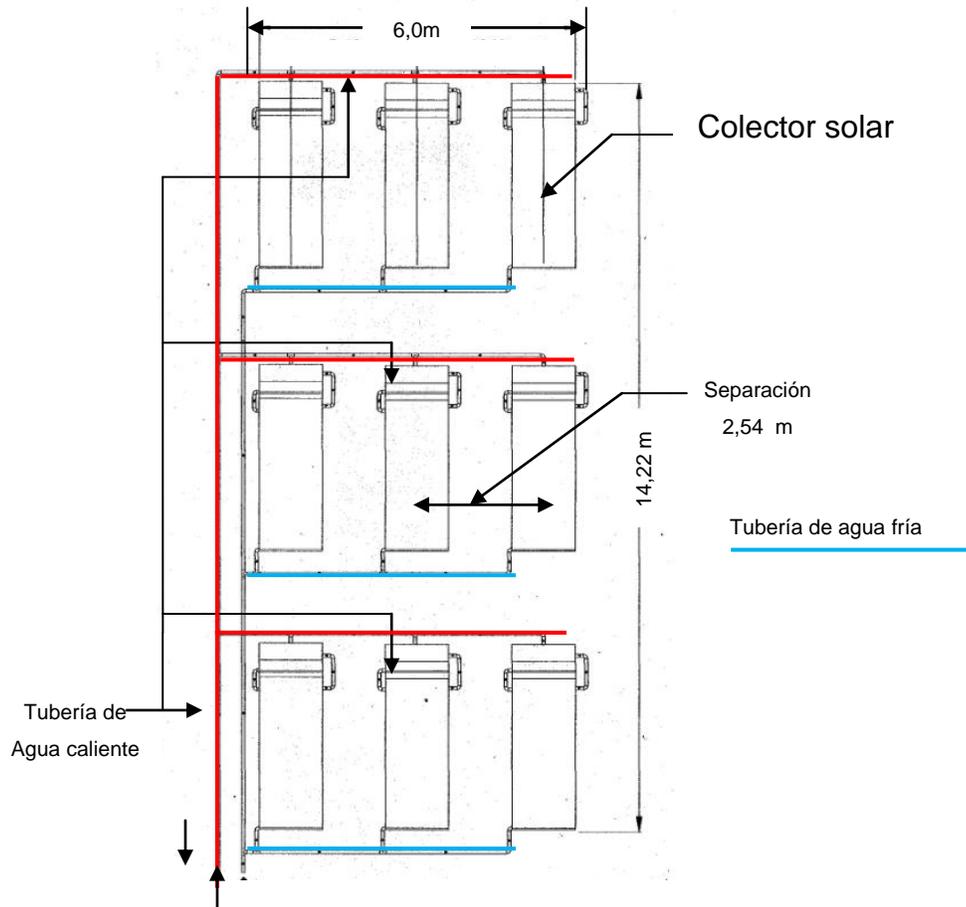
La azotea recibe gran cantidad de radiación solar todo el año y está libre de sombras, estas son condiciones ideales para colocar un sistema de captación solar.

Figura 29. Diagrama de flujo del equipo generador de vapor con los colectores solares



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2010.

Figura 30. **Vista en planta de los colectores necesarios para el sistema de precalentamiento de las calderas**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2010.

## 5.2. Desarrollo del sistema propuesto

Primero se procede a calcular el número de colectores necesarios para calentar 1125 galones de agua, que es la capacidad de la caldera.

Se escogió como ejemplo un colector plano marca Chromagen modelo CR-190 cuya capacidad es de trescientos litros de agua en el termotanque.

Se desea calcular el número de colectores necesarios para satisfacer los requerimientos del sistema propuesto; se debe tener en cuenta el precio de cada colector y mantener bajos los costos para que el sistema sea rentable, por lo que se propone calentar la mitad del agua en los colectores para bajar la necesidad de comprar un gran número de estos, descargar el agua a un tanque aislado y dar espacio a más agua para continuar durante el resto del día calentando la otra mitad, esta quedará almacenada en el termotanque de cada colector.

La capacidad máxima de la caldera son 1 125 galones pero se desea que la mitad sea calentada por los colectores, esto es 562,5 galones.

Cada colector tiene capacidad de 300 litros o 79,25 galones.

$$\text{Número de colectores} = \frac{562,5 \text{ gal}}{79,25 \text{ gal}} = 7,09 \approx 7 \quad (1-5)$$

Cuando todo el sistema termotanque y placa se llena de agua totalmente y la radiación llega al colector se establece un flujo natural, los fabricantes proporcionan este dato, para el caso del colector CR-190 es de 90 549 gramos/hora, conociendo el número de colectores necesarios se desea saber a qué hora estos estarán llenos con agua caliente.

El flujo másico es:

$$\dot{m} = \frac{m}{t} \quad (2-5)$$

$$\dot{m} = 90\,540 \frac{\text{gramos}}{\text{hora}} = 90,54 \text{ kg/h}$$

Luego se procede a calcular el flujo volumétrico  $\dot{V}$

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (3-5)$$

Se sabe que la densidad es:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4-5)$$

$$\rho_{agua} = 1\,000 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{V} = \frac{90,54 \text{ kg/h}}{1\,000 \text{ kg/m}^3} = 0,09 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 23,98 \frac{\text{gal}}{\text{h}}$$

Se calcula el tiempo que se necesita para llenar cada colector con agua caliente.

$$\text{Núm. horas de llenado con agua caliente} = \frac{79,25 \text{ gal}}{23,98 \frac{\text{gal}}{\text{h}}} = 3,3 \text{ h}$$

*3,3 horas  $\approx$  3 horas con 18 minutos*

Los colectores deberán empezar a calentar a las 9:00 am, debido a que la radiación no es tan intensa más temprano, quedarán llenos de agua a una temperatura final de 55 °C a las 12:18 am, después de esto se puede descargar el agua ya calentada a un depósito aislado para seguir calentando agua hasta las 4:00 pm.

### 5.3. Ecuaciones y utilidad en la estimación de la temperatura que alcanza el colector solar

La caldera posee las siguientes características:

Marca: Kewanee

Modelo: H35-250-0, serie 3, pirotubular

Potencia: 250 BHP

Presión de trabajo: 100 PSI

Combustible: diésel

Superficie de calentamiento: 1250 p<sup>2</sup>

Capacidad de agua (llena): 1125 galones de agua

Tasa mínima del quemador: 18,7 GPH

Tasa máxima del quemador: 79,3 GPH

La energía térmica necesaria para elevar la temperatura del agua de 16 hasta 89,68 °C (temperatura de ebullición del agua a 1500 m sobre el nivel del mar) puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$Q = mC_p(T_f - T_0) \quad (5-5)$$

Donde:

Q = calor para elevar la temperatura del agua expresado en calorías

m = masa total del agua contenida en la caldera expresada en gramos

$C_p$  = calor específico del agua expresado en: calorías / (gramos) (°C)

$T_f$  = temperatura final del agua

$T_0$  = temperatura inicial del agua

El volumen  $V$  de agua en la caldera es:

$$V = 1\,125 \text{ galones de agua} = 4,26 \text{ m}^3$$

De la fórmula

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Despejando la masa

$$m = \rho_{\text{agua}} V$$

$$\rho_{\text{agua}} = 1\,000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$m = \left(1\,000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \cdot (4,26 \text{ m}^3)$$

$$m = 4\,258,59 \text{ kg} = 4\,258\,588,26 \text{ g}$$

Substituyendo valores en la ecuación (5-5)

$$Q = (4\,258\,588,26 \text{ g}) \cdot \left(\frac{1 \text{ cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}}\right) \cdot (89,68 ^\circ\text{C} - 16 ^\circ\text{C})$$

$$Q = 333\,772\,782,10 \text{ cal}$$

La tasa de inyección de combustible mínima de la caldera es de 18,7 gal/h.

Se sabe que un galón de diésel posee 140 000 Btu de poder calorífico.

La tasa de calor generado por la caldera a 18,7 gal/h es:

$$\dot{Q} = \left(18,7 \frac{\text{gal}}{\text{h}}\right) \cdot \left(\frac{140 \times 10^3 \text{ Btu}}{1 \text{ gal}}\right) = 2\,618\,000 \frac{\text{Btu}}{\text{h}} = 659\,724\,902,59 \frac{\text{cal}}{\text{h}}$$

El tiempo requerido para alcanzar 89,68 °C viene dado por la ecuación:

$$Q = \dot{Q} \Delta t \quad (6-5)$$

Donde:

$Q$  = calor necesario para alcanzar 89,68 °C expresado en calorías

$\dot{Q}$  = tasa de calor generado por la caldera expresado en calorías por hora

$\Delta t$  = diferencial de tiempo

Despejando  $\Delta t$  en la ecuación (6-5).

$$\Delta t = \frac{Q}{\dot{Q}} = \frac{333\,772\,782,10 \text{ cal}}{659\,724\,902,59 \text{ cal/h}} = 0,5 \text{ h} = 30,36 \text{ min}$$

Consumo de diésel expresado en galones.

$$\left(18,7 \frac{\text{gal}}{\text{h}}\right) \cdot (0,5 \text{ h}) = 9,46 \text{ gal}$$

Ahora se procede a calcular la energía térmica necesaria para alcanzar 89,69 °C, pero ahora desde 55 °C que es la temperatura que cada colector transfiere al agua.

$$Q = mC_p(T_f - T_0)$$

El procedimiento es el mismo pero la temperatura inicial es 55 °C

$$Q = (4\,258\,588,26\text{ g}) \cdot \left(\frac{1\text{ cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}}\right) \cdot (89,68^\circ\text{C} - 55^\circ\text{C})$$

$$Q = 147\,687\,831,84\text{ cal}$$

$$\dot{Q} = \left(18,7 \frac{\text{gal}}{\text{h}}\right) \cdot \left(\frac{140 \times 10^3 \text{ Btu}}{1 \text{ gal}}\right) = 2\,618\,000 \frac{\text{Btu}}{\text{h}} = 659\,724\,902,59 \frac{\text{cal}}{\text{h}}$$

$$Q = \dot{Q}\Delta t$$

$$\Delta t = \frac{Q}{\dot{Q}} = \frac{147\,687\,831,84\text{ cal}}{659\,724\,902,59\text{ cal/h}} = 0,22\text{ h} = 13,43\text{ min}$$

Consumo de diésel expresado en galones.

$$\left(18,7 \frac{\text{gal}}{\text{h}}\right) \cdot (0,22\text{ h}) = 4,11\text{ gal}$$

Para calcular la radiación que recibe el colector solar se necesita conocer el ángulo horario o de incidencia ( $h$ ), la altura solar ( $\beta$ ) y el acimut solar ( $\Phi$ ); se calculan para el 21 de cada mes.

Muestra de cálculo para el 21 de enero.

Datos:

Fecha: 21 de enero

Ubicación: ciudad de Guatemala

Latitud: 14,38° norte

Longitud: 90,37° oeste

Guatemala se encuentra en el huso horario del centro que se conoce como la hora estándar del centro (central estándar time) o CST por sus siglas en inglés y que es igual a 90° oeste al meridiano de Greenwich.

Luego se debe calcular la hora local solar o LST por sus siglas en inglés correspondiente a la hora local que se desee conocer.

Para calcular lo descrito anteriormente se multiplica la diferencia entre la longitud del lugar en donde se encuentra, para este caso es latitud 90,37° oeste y la longitud en tiempo estándar u hora estándar que es igual a 90°, esta diferencia se multiplica por cuatro minutos por grado, esto es:

6:00 A.M.

$6:00 \text{ A.M.} \pm 4(90,37^\circ - 90^\circ) = 6:00 + 1,48 \text{ min}$

6:00 + 1 min + 29 seg

6:01:29 A.M.

Si se está al oeste de la longitud en tiempo estándar sumar los minutos y si esta al este restárselos.

La hora civil local (LCT) será:

$LCT = CST + 00:01:29$

$LCT = 6:00:00 + 00:01:29 = 06:01:29$

Luego se procede a calcular la hora solar local,  $LST = 06:01:29$  – ecuación del tiempo para el día deseado.

De la tabla II para los días 21 de cada mes, la ecuación del tiempo para el 21 de enero, la ecuación del tiempo es -11,2 minutos.

$$\text{LST} = 06:01:29 - 00:11:12 = 5:50:17 \text{ A.M.}$$

Para calcular la altura solar ( $h$ ), se calcula cuantas horas hacen falta para el medio día solar con una hora solar local dada y se multiplica por  $15^\circ$  de ángulo que se mueve la tierra en una hora.

$$h = (12:00:00 - \text{LST}) (15^\circ)$$

$$h = (12:00:00 - 05:50:17) = 06:09:43$$

Faltan 6,16 horas para el medio día solar.

El ángulo horario o de incidencia será:

$$h = (6,16 \text{ h})(15^\circ) = 92,4^\circ$$

La altura solar ( $\beta$ ) se calcula con la ecuación (12-1)

$$\text{sen}\beta = \text{cos}l \text{ cos } h \text{ cos } d + \text{sen } l \text{ sen } d$$

Donde:

$$l = \text{latitud} = 14,38^\circ$$

$$h = \text{ángulo horario o de incidencia} = 92,4^\circ$$

$$d = \text{declinación, dato que se obtiene de la tabla II} = -20,2^\circ$$

$$\beta = \text{sen}^{-1}(\text{cos}14,38 \text{ cos}92,4 \text{ cos } 20,2 + \text{sen}14,38 \text{ sen}20,2) = 2,73^\circ$$

Nota: el signo menos en la declinación solo indica que está por debajo de la línea ecuatorial.

El acimut solar ( $\Phi$ ) se calcula con la ecuación (16-1)

$$\cos\varphi = \frac{\text{sen}\beta \text{ sen}l \text{ sen}d}{\cos\beta \cos l}$$

$$\varphi = \cos^{-1} \left( \frac{\text{sen}2,73 \text{ sen}14,38 - \text{sen}20,2}{\cos2,73 \cos14,38} \right) = 110,16^\circ$$

A continuación se muestra los resultados tabulados del cálculo para el ángulo horario (h), altura solar ( $\beta$ ) y acimut solar ( $\Phi$ ) desde las 6:00 A.M. hasta las 18:00 P.M. para los días 21 de cada mes.

**Tabla VIII. Ángulo horario o de incidencia (h) para los días 21 de cada mes, unidades en grados**

Hora	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	Mayo	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Promedio
6:00	92,40	93,15	91,57	89,35	88,85	89,92	91,19	90,23	87,75	85,82	86,13	89,23	89,63
7:00	77,40	78,15	76,57	74,35	73,85	74,92	76,19	75,23	72,57	70,82	71,13	74,23	74,63
8:00	62,40	63,15	61,57	59,35	58,85	59,92	61,19	60,23	57,75	55,83	56,13	59,23	59,63
9:00	47,40	48,15	46,57	44,35	43,85	44,92	46,19	45,23	42,75	40,83	41,13	44,23	44,63
10:00	32,40	33,15	31,57	29,35	28,85	29,92	31,19	30,23	27,75	25,83	26,13	29,23	29,63
11:00	17,40	18,15	16,57	14,35	13,85	14,93	16,19	15,23	12,75	10,83	11,13	14,23	14,63
12:00	2,40	3,15	1,57	0,64	1,20	0,00	1,19	0,23	2,20	4,27	3,82	0,77	1,79
13:00	12,57	11,85	13,45	15,64	16,20	15,02	13,87	14,72	17,20	19,27	18,82	15,77	15,37
14:00	27,60	26,85	28,45	30,64	31,20	30,02	28,87	27,72	32,20	34,27	33,82	30,77	30,20
15:00	42,60	41,85	43,45	45,64	46,20	45,02	43,87	44,72	47,20	49,27	48,82	45,77	45,37
16:00	57,60	56,85	58,45	60,64	61,20	60,02	58,87	59,72	62,20	64,27	63,82	60,77	60,37
17:00	72,60	71,85	73,85	75,64	76,20	75,02	73,87	74,72	77,20	79,27	78,82	75,77	75,40
18:00	87,60	86,85	88,45	90,64	91,20	90,02	88,87	89,72	92,20	94,27	93,82	90,77	90,37

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Altura solar ( $\beta$ ) para los días 21 de cada mes, unidades en grados**

Hora	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	Mayo	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	promedio
6:00	2,73	-0,30	-1,52	3,47	5,92	5,73	3,93	2,82	2,18	6,58	8,37	6,36	3,86
7:00	16,50	14,00	13,00	17,80	19,75	19,26	17,69	17,11	16,69	20,98	22,27	19,89	17,91
8:00	30,45	28,44	27,46	32,25	33,76	32,96	31,63	31,52	31,12	35,47	36,30	33,61	32,08
9:00	44,51	42,95	41,75	46,75	47,84	46,72	45,65	46,00	45,34	49,99	50,41	47,36	46,27
10:00	58,58	57,48	55,62	61,28	61,90	60,34	59,66	60,53	59,00	64,50	64,47	60,97	60,36
11:00	72,41	71,34	68,19	75,74	75,63	73,24	73,24	75,04	71,87	78,74	78,07	73,79	73,92
12:00	83,75	85,28	75,53	87,15	84,26	80,93	80,93	87,91	75,46	84,30	83,47	80,90	82,72
13:00	76,66	77,90	70,41	74,54	73,74	73,16	73,16	75,53	67,72	70,79	71,23	72,56	73,30
14:00	63,05	63,56	58,40	60,04	59,71	60,26	60,26	61,03	55,06	56,34	57,28	59,59	59,68
15:00	49,02	49,05	44,69	45,51	45,64	46,63	46,63	46,50	41,16	41,81	43,17	45,95	45,58
16:00	34,95	34,56	30,45	31,00	31,56	32,88	32,88	32,01	26,86	27,31	29,9	32,19	31,38
17:00	20,95	20,06	16,02	16,57	17,58	19,17	19,17	17,59	12,40	12,86	15,12	18,49	17,22
18:00	7,12	5,67	1,50	2,25	3,77	5,65	5,65	3,30	-2,12	-1,50	1,34	4,98	3,17

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Acimut solar ( $\Phi$ ) para los días 21 de cada mes, unidades en grados**

Hora	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	Mayo	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Promedio
6:00	110,16	101,23	90,39	101,09	109,17	112,77	110,26	101,98	89,44	99,20	108,40	112,63	103,89
7:00	107,21	97,78	86,61	97,80	106,44	110,22	107,43	98,78	85,59	95,92	105,83	110,13	100,81
8:00	105,24	91,64	82,34	94,81	104,67	108,87	105,59	95,78	81,10	92,77	104,22	108,83	97,99
9:00	104,35	91,46	76,77	91,74	104,05	109,09	104,91	91,93	74,96	89,27	103,81	109,15	95,96
10:00	105,31	87,56	67,99	87,94	105,63	112,33	106,32	89,62	64,73	84,23	105,94	112,62	94,19
11:00	111,77	80,63	50,15	80,43	114,96	124,97	114,26	83,82	42,35	71,08	118,55	126,13	93,26
12:00	158,40	40,59	6,30	12,73	168,63	179,88	169,87	6,15	8,77	47,54	146,57	175,52	93,41
13:00	117,62	74,00	43,91	81,49	112,23	124,82	117,16	83,49	51,25	80,55	109,41	123,69	95,06
14:00	106,40	85,31	65,37	88,33	105,14	112,30	106,89	89,48	68,47	87,39	104,35	112,00	95,10
15:00	104,38	89,96	75,30	92,02	104,05	109,08	104,95	92,82	77,05	91,32	103,83	109,02	96,15
16:00	104,81	93,33	81,32	95,05	104,88	108,87	105,39	95,68	82,54	94,55	104,92	108,91	98,35
17:00	106,47	96,46	85,78	98,06	106,80	110,22	107,07	98,59	86,77	97,72	105,04	110,33	100,77
18:00	109,10	99,70	89,61	101,40	109,69	112,80	109,76	101,86	90,54	101,23	110,10	112,96	104,06

Fuente: elaboración propia.

Se procede a calcular la radiación total ( $G_t$ ) que llega al colector con la ecuación:

$$G_t = G_D + G_d \text{ ecuación (1-1)}$$

Donde:

$G_D$  = radiación directa, expresada en ( $\text{Btu/h}\cdot\text{p}^2$ )

$G_d$  = radiación difusa, expresada en ( $\text{Btu/h}\cdot\text{p}^2$ )

$G_{ND}$  = irradiación directa perpendicular, expresada en ( $\text{Btu/h}\cdot\text{p}^2$ )

Se calcula primero la irradiación directa perpendicular

$$G_{ND} = \frac{A}{B e^{\text{sen}\beta}}$$

A y B se obtienen de la tabla I

$$A = 381,2 \text{ Btu/h}\cdot\text{p}^2$$

$$B = 0,141$$

$\beta = 2,73$  tabla IX,  $\beta$  para las 6:00 A.M. del 21 de enero

$$G_{ND} = 381,2 / e^{(0,141/\text{sen}2,73)} = 18,96 \text{ Btu/h}\cdot\text{p}^2$$

Cálculo de la radiación difusa ( $G_d$ )

$$G_d = G_{ND}(\cos\theta)$$

$\cos\theta = \sin\beta$ , para una superficie horizontal

$$G_d = (18,96) (0,047) = 0,89 \text{ Btu/h}\cdot\text{p}^2$$

Cálculo de la radiación difusa ( $G_d$ )

$$G_d = CG_{ND}$$

Donde:

$C = 0,103$  que se obtiene de la tabla II.

$$G_{ND} = 18,96$$

$$G_d = (0,103) (18,96) = 1,95$$

Por último se calcula la radiación total

$$G_t = G_d + G_d = 0,89 + 1,95 = 2,84 \text{ Btu/h}\cdot\text{p}^2$$

A continuación se presentan los resultados del cálculo de la irradiación directa perpendicular, directa, difusa y total para los días 21 de cada mes en la ciudad de Guatemala.

**Tabla XI. Irradiación directa perpendicular  $G_{ND}$ (Btu/h·p<sup>2</sup>)**

Hora	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	Mayo	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
6:00	19,75	0,00	0,00	23,83	63,04	54,29	22,97	8,68	4,70	98,12	142,24	106,92
7:00	232,03	209,28	190,32	209,36	207,71	187,93	187,93	189,08	202,67	241,81	259,39	252,26
8:00	288,62	279,35	267,19	263,27	255,04	243,11	243,11	247,81	261,61	284,50	296,84	295,94
9:00	311,75	305,59	295,10	285,82	276,21	267,22	267,22	272,54	285,47	303,15	313,81	315,20
10:00	323,14	318,06	308,13	296,94	286,94	279,40	279,40	284,79	296,96	312,40	322,36	324,94
11:00	328,79	324,18	314,37	302,27	292,13	285,45	285,45	290,73	302,31	316,62	326,33	329,66
12:00	330,79	326,41	316,46	303,79	293,55	287,45	287,45	292,56	303,58	317,33	327,05	330,19
13:00	329,78	325,52	315,11	301,98	291,65	285,99	285,99	290,85	301,21	314,73	324,75	329,34
14:00	325,43	321,20	309,86	296,26	285,70	280,66	280,66	285,80	294,37	307,99	318,70	324,21
15:00	316,26	311,89	298,63	284,47	273,73	269,66	269,66	273,11	280,17	294,34	306,58	313,79
16:00	298,03	292,99	275,08	260,37	250,07	248,05	248,05	249,00	249,86	265,44	281,74	293,01
17:00	256,97	248,80	215,11	201,44	195,18	200,31	200,31	192,20	166,95	186,75	218,91	244,76
18:00	122,21	89,42	1,24	5,49	52,89	59,17	59,17	14,87	0,00	0,00	0,87	75,24

Fuente: elaboración propia.

**Tabla XII. Radiación Directa  $G_D$  (Btu/h·p<sup>2</sup>)**

Hora	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	Mayo	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
6:00	0.94	0.00	0.00	1.44	6.50	5.42	1.57	0.43	0.18	11.24	20.71	11.84
7:00	65.90	510.63	42.81	64.00	70.19	65.19	57.11	55.63	58.21	86.58	98.30	85.82
8:00	146.27	133.04	1253.21	140.49	141.73	134.10	127.49	129.55	135.21	165.09	175.73	163.82
9:00	218.55	208.22	196.50	208.19	204.75	195.54	191.08	196.05	203.05	232.20	241.83	231.87
10:00	275.76	268.19	254.30	260.41	253.12	243.22	241.14	247.94	254.55	281.97	290.89	284.12
11:00	313.41	308.21	291.387	292.96	282.99	273.33	273.51	280.88	285.62	310.53	319.28	316.55
12:00	328.82	325.31	306.42	303.41	292.08	283.55	285.70	292.36	293.86	315.76	324.93	326.83
13:00	320.88	318.29	296.87	291.06	279.98	273.20	276.74	281.63	278.72	297.21	307.48	314.20
14:00	290.09	287.60	263.92	256.67	246.70	242.99	247.37	249.41	241.31	256.35	268.13	279.61
15:00	238.75	235.56	210.02	202.94	195.75	195.19	199.83	198.11	184.40	196.22	209.75	225.53
16:00	170.73	166.08	139.41	134.10	130.89	133.71	137.92	131.98	112.89	121.79	136.98	156.10
17:00	91.88	85.34	59.37	57.45	58.95	64.74	67.95	58.08	35.85	41.56	57.10	77.62
18:00	15.15	8.83	0.03	0.22	1.56	5.21	6.23	0.86	0.00	0.00	0.02	6.53

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. Radiación difusa  $G_d$  (Btu/h-p<sup>2</sup>)

Hora	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	Mayo	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
6:00	2,03	0,00	0,00	2,86	8,20	7,44	3,17	1,16	0,57	10,89	15,08	11,01
7:00	23,90	21,77	28,36	25,12	27,00	27,08	25,93	25,34	24,52	26,84	27,50	25,98
8:00	29,73	29,05	39,81	31,59	33,16	33,77	33,55	33,21	31,65	31,58	31,46	30,48
9:00	32,11	31,78	43,97	34,30	35,91	36,80	36,88	36,52	34,54	33,65	33,26	32,47
10:00	33,28	33,08	45,91	35,63	37,30	38,35	38,56	38,16	35,93	34,68	34,17	33,47
11:00	33,86	33,71	46,84	36,27	37,98	39,11	39,39	38,96	36,58	35,15	34,59	33,95
12:00	34,07	33,95	47,15	36,45	38,16	39,34	39,67	39,20	36,73	35,22	34,67	34,09
13:00	33,97	33,85	46,95	36,24	37,91	39,10	39,47	38,97	36,45	34,94	34,42	33,92
14:00	33,52	33,40	46,17	35,55	37,14	38,34	38,73	38,20	35,62	34,19	33,78	33,39
15:00	32,57	32,44	44,50	34,14	35,59	36,78	37,21	36,60	33,90	32,67	32,50	32,32
16:00	30,70	30,47	40,99	31,24	32,51	33,74	34,23	33,37	30,23	29,46	29,86	30,18
17:00	26,47	25,88	32,05	24,17	25,37	27,01	27,64	25,75	20,20	20,73	23,20	25,21
18:00	12,59	9,30	0,19	0,66	3,09	7,25	8,17	1,99	3768,75	13644,64	0,09	7,75

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. Radiación total  $G_t$  (Btu/h-p<sup>2</sup>)

Hora	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	Mayo	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
6:00	2,97	0,00	0,00	4,30	14,70	12,86	4,74	1,59	0,75	22,14	35,78	22,86
7:00	89,80	72,40	71,17	89,12	97,19	92,27	83,04	80,97	82,73	113,42	125,80	111,80
8:00	175,99	162,09	163,02	172,08	174,89	167,86	161,04	162,76	166,86	196,67	207,20	194,30
9:00	250,66	240,00	240,47	242,48	240,65	232,33	227,96	232,57	237,59	265,85	275,09	264,34
10:00	309,04	301,27	300,22	296,04	290,42	281,57	279,69	286,10	290,48	316,64	325,06	317,58
11:00	347,28	341,92	338,71	329,23	320,97	312,44	312,90	319,84	322,20	345,67	353,87	350,51
12:00	362,89	359,26	353,57	339,87	330,24	322,89	325,37	331,57	330,59	350,98	359,60	360,92
13:00	354,85	352,14	343,82	327,30	317,90	312,30	316,21	320,60	315,16	332,15	341,91	348,13
14:00	323,61	321,01	310,09	292,22	283,84	281,33	286,10	287,61	276,93	290,54	301,91	313,00
15:00	271,33	268,00	254,51	237,07	231,34	231,97	237,04	234,71	218,30	228,89	242,25	257,85
16:00	201,43	196,55	180,39	165,35	163,40	167,45	172,15	165,35	143,12	151,25	166,84	186,28
17:00	118,35	111,22	91,42	81,62	84,32	91,74	95,59	83,84	56,05	62,29	80,30	102,84
18:00	27,74	18,14	0,22	0,87	4,65	12,45	14,39	2,85	0,00	0,00	0,11	14,28

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Radiación total promedio que llega al colector solar el 21 de cada mes**

Hora	Radiación total promedio $G_t$ (Btu/h-p <sup>2</sup> )
6:00	10,22
7:00	92,48
8:00	175,40
9:00	245,83
10:00	299,51
11:00	332,96
12:00	343,98
13:00	331,87
14:00	297,35
15:00	242,77
16:00	171,63
17:00	88,30
18:00	7,98

Fuente: elaboración propia.

Por último se procede a calcular la temperatura que alcanza cada colector a lo largo del día, para determinar qué horas son mejores para empezar el calentamiento del agua, para hacer esto se usará la información de la tabla XV.

Para el cálculo de las temperaturas del colector a lo largo del día se usará la ecuación (5-5):

$$\dot{Q} = \dot{m}C_p(T_f - T_0)$$

Donde:

$\dot{Q}$  = flujo de radiación solar que llega al colector expresado en calorías por hora (cal/h).

$\dot{m}$  = flujo másico que pasa a través de la placa del colector expresado en gramos por hora (g/h).

$C_p$  = calor específico del agua expresado en calorías por gramo por grado centígrado (cal/g·°C).

$T_0$  = temperatura de entrada en la placa del colector.

$T_f$  = temperatura de salida en la placa del colector.

Muestra de cálculo para las 7:00 P.M.

El flujo de radiación que llega al colector por unidad de área es:

$$\dot{Q} = 92,48 \text{ Btu/h}\cdot\text{p}^2 = 258944 \text{ cal/h}\cdot\text{m}^2$$

El área del colector es 3,80 m<sup>2</sup>

Entonces el flujo de energía calórica en el colector es:

$$\dot{Q} = (258944 \text{ cal/h}\cdot\text{m}^2) (3,80 \text{ m}^2) = 9839872,2 \text{ cal/h}$$

Se asume que el agua de entrada está a 16 °C

El flujo másico que hay en el colector debido al efecto termosifón según el fabricante es de 90 540,92 g/h.

Substituyendo valores en la ecuación.

$$983\,987,2 \frac{\text{cal}}{\text{h}} = 90\,540,92 \frac{\text{g}}{\text{h}} \cdot 1 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (T_f - 16^\circ\text{C})$$

Despejando  $T_f$  se obtiene que el agua sale del colector a una temperatura de  $26^\circ\text{C}$ .

La tabla XVI presenta los resultados de la temperatura de salida en el colector con el paso de las horas en el transcurso del día.

**Tabla XVI. Temperatura de salida del colector durante las horas de sol utilizando las radiaciones solares promedio**

Hora	Radiación Total (Btu/h-p <sup>2</sup> )	Temp. de Entrada °C	Temp. de Salida °C
6:00	10,22	16,00	17,20
7:00	92,48	16,00	26,00
8:00	175,40	16,00	36,61
9:00	245,83	16,00	44,89
10:00	299,51	16,00	51,00
11:00	332,6	16,00	55,13
12:00	343,98	16,00	56,42
13:00	331,87	16,00	55,00
14:00	297,35	16,00	50,96
15:00	242,77	16,00	44,53
16:00	171,63	16,00	36,17
17:00	88,30	16,00	26,37
18:00	7,98	16,00	16,94

Fuente: elaboración propia.



## 6. ANÁLISIS ECONÓMICO

### 6.1. Costos del equipo

Se escogió un colector solar marca Chromagen CR-190 con capacidad de 300 litros.

Costo por unidad: Q 13 950

Costo de instalación: Q 2 850

Costo total por unidad: Q16 800

Costo total del sistema propuesto = costo total por unidad x 7 colectores

Costo total del sistema propuesto = Q 16 800,00 x 7 = Q 117 600

#### 6.1.1. Recuperación de la inversión

Se demostró en la sección 5,3 que a la caldera le toma 0,5 horas elevar la temperatura de 16 a 89 °C, con esta información se calcula el consumo de combustible diésel que se consume en este período de tiempo, sabiendo que la tasa de combustible del quemador en el arranque debe de ser de 18,7 gal/h.

Consumo de diésel

$(18,7 \text{ gal/h}) (0,5 \text{ h}) = 9,46 \text{ gal}$

El precio actual del combustible diésel por galón es de: Q 34,33

Costo de arranque diario de la caldera  
(Q 34,33/gal) (9,46 gal) = 324,79 Q/día

Según datos del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (Insivumeh) en Guatemala hay en promedio 240 días despejados al año.

El costo anual de combustible en un año será:  
(324,00 Q/día) (240 días) = Q 77 760,00

Utilizando el sistema de colectores solares, el tiempo de arranque de la caldera es de 0,22 horas.

El consumo de diésel en este tiempo será de:  
(18,7 gal/h) (0,22 h) = 4,11 gal

El precio del galón de diésel es Q 34,33/gal  
(Q 34,00 /gal) (4,11 gal) = 141,23 Q./día

Costo de combustible anual empleando colectores solares.  
(Q. 141,23/día) (240 días) = Q 33 895,20

Ahorro anual = Q/año 77 760,00 – Q/año 33 895,20 = Q/año 43 864,80

El período de recuperación de la inversión es:  
Costo total del proyecto/ahorro anual = Q 117 600 / ( Q/año 43 864,80)  
Período de recuperación de la inversión = 2,68 años ≈ 3 años.

## 6.2. Beneficios económicos

La vida útil de cada colector es de aproximadamente veinte años, como el período de recuperación es de tres años, se tiene un período de diecisiete años en los cuales se tendrá un beneficio económico.

$$(17 \text{ años}) (Q/\text{año } 43\,864,80) = Q\,745\,701,60$$

Con los precios actuales del diesel se obtuvo un beneficio de Q 745 701,60, que es el monto que se ahorrará por concepto de compra de combustible durante un período de 17 años. Es lógico prever que el diesel subirá de precio en los próximos años con lo que el beneficio es mayor al calculado. Como los colectores requieren poco mantenimiento, el monto ahorrado puede destinarse a equipos que son críticos para los servicios que presta el hospital.

## 6.3. Resumen de resultados

- Precalentamiento sin colectores solares  
Tiempo para alcanzar temperatura de operación de la caldera: 30,36 min  
Consumo de combustible para el arranque de la caldera: 9,46 gal  
Consumo monetario diario de combustible en el arranque: Q 324,79  
Consumo monetario anual de combustible en el arranque: Q 77 949,60
- Precalentamiento utilizando colectores solares  
Tiempo para alcanzar temperatura de operación 13,43 min  
Consumo diario de combustible para el arranque de la caldera: 4,11 gal  
Consumo diario de combustible en el arranque: Q 41,23  
Consumo anual de combustible en el arranque: Q 29 658,30

Costo unitario de un colector solar de placa plana: Q 13 950,00

Costo de instalación de un colector de placa plana: Q 2 500,00

Costo total por equipo: Q 16 800,00

Costo total del sistema propuesto: Q 117 600,00

Vida útil promedio de un colector: 20 años

- **Beneficios esperados**

Ahorro en el tiempo de arranque: 16,93 min

Ahorro en la cantidad de combustible diario: 5,35 gal

Ahorro monetario anual de combustible: Q 43 864,80

Periodo de recuperación de la inversión: 3 años

Ahorro monetario de combustible en un período de 17 años: Q 745 701,60

#### **6.4. Comentarios**

El empleo de agua calentada con energía solar en procesos industriales continuos no es viable, por el tiempo que requiere alcanzar altas temperaturas y la limitada cantidad y espacio de almacenaje.

Empleando colectores solares para precalentar el agua de una caldera se obtiene una inversión autofinanciable, prueba de ello es que el monto de la inversión en el equipo se recupera en tres años, y se obtienen beneficios en un período de diecisiete años.

## CONCLUSIONES

1. Un colector solar de placa plana puede captar un máximo de 343,98 Btu/h·p<sup>2</sup> en promedio, que es energía suficiente para subir la temperatura del agua a 55 °C, dependiendo de las condiciones pueden alcanzar un máximo de 65 °C; en condiciones de baja radiación solar o pérdidas de calor en el aislamiento, una resistencia eléctrica de bajo consumo ayuda a mantener o elevar la temperatura hasta un máximo de 75 °C en el interior del termotanque.
2. La ubicación de cualquier equipo de captación de energía solar depende de escoger un lugar que se encuentre libre de sombras y equipos, el edificio de Servicios de Apoyo del Hospital General San Juan de Dios dispone de suficiente área superficial, aproximadamente 2 586,2 metros cuadrados libres de sombras, esto ocurre en un período de tiempo que va desde las nueve de la mañana hasta las cuatro de la tarde, por lo que este espacio físico es apto para la instalación de equipo de captación de energía solar, para precalentar el agua de las calderas que se encuentran en el sótano de este edificio.
3. Un colector solar de placa plana comercial puede contener hasta trescientos litros de agua en su depósito, como las calderas del hospital tienen una capacidad de 1 125 galones, se estimó que se requieren al menos catorce colectores solares para proveer de agua precalentada a una caldera, esta opción no es viable por ser muy costosa, como cada colector solar puede calentar trescientos litros en el transcurso de la mañana, esta agua se puede descargar a un tanque aislado

térmicamente, que tenga una capacidad aproximada de quinientos sesenta y dos galones para permitir el calentamiento de otros quinientos sesenta y dos galones, que pueden quedar almacenados y distribuidos en cada colector solar, por lo que se determinó que siete colectores solares del tipo placa plana hacen posible el precalentamiento de agua para una caldera.

4. Al comparar los resultados, se muestra que el período de beneficio del proyecto durará al menos 17 años y alcanzará un monto estimado de Q745 701,60 de ahorro por concepto de combustible, solo en el encendido de la caldera, tomando como base el precio de combustible diésel actual, el costo diario de Q329,60 se reduce a Q 41,23, por lo cual el empleo de energía solar para el precalentamiento de agua para calderas es viable, porque brinda beneficios a largo plazo y los costos mantenimiento del equipo de captación solar son bajos.

## RECOMENDACIONES

1. Los colectores de placa están catalogados como colectores de temperatura media, pero los hay de temperaturas altas como los colectores de tubo evacuado que son mejores para un proceso de tipo industrial, por lo que los colectores de tubo evacuado son mejores para un proyecto requiera agua a alta temperatura.
2. Todos los colectores deberán ubicarse en la azotea del edificio de Servicios de Apoyo, y deberán ser colocados de tal manera para que no proyecten sombras entre sí, su orientación es hacia el sur verdadero y se tolera una desviación de 15° sur oeste o sur este con una inclinación respecto a la horizontal igual a la latitud de 14,38° norte, la captación de radiación solar no se verá afectada.
3. La red de agua debe ser lo más corta posible para evitar pérdidas de carga y calor, la tubería que transporta agua caliente debe tener aislante térmico, su exposición al medio ambiente reduce drásticamente la vida útil de este material que por lo general se fabrica de mailar y fibra de vidrio, por lo que deberá protegerse adecuadamente.
4. El uso de colectores puede extenderse a los edificios de maternidad y pediatría, los colectores planos son ideales para el servicio de agua caliente en duchas y lavamanos, y podrían reemplazar a los calentadores eléctricos que se usan actualmente y reducir el consumo de energía eléctrica.

5. A la Escuela de Ingeniería Mecánica incluir la investigación y desarrollo en tecnologías de energías renovables en su p nsun de estudios.

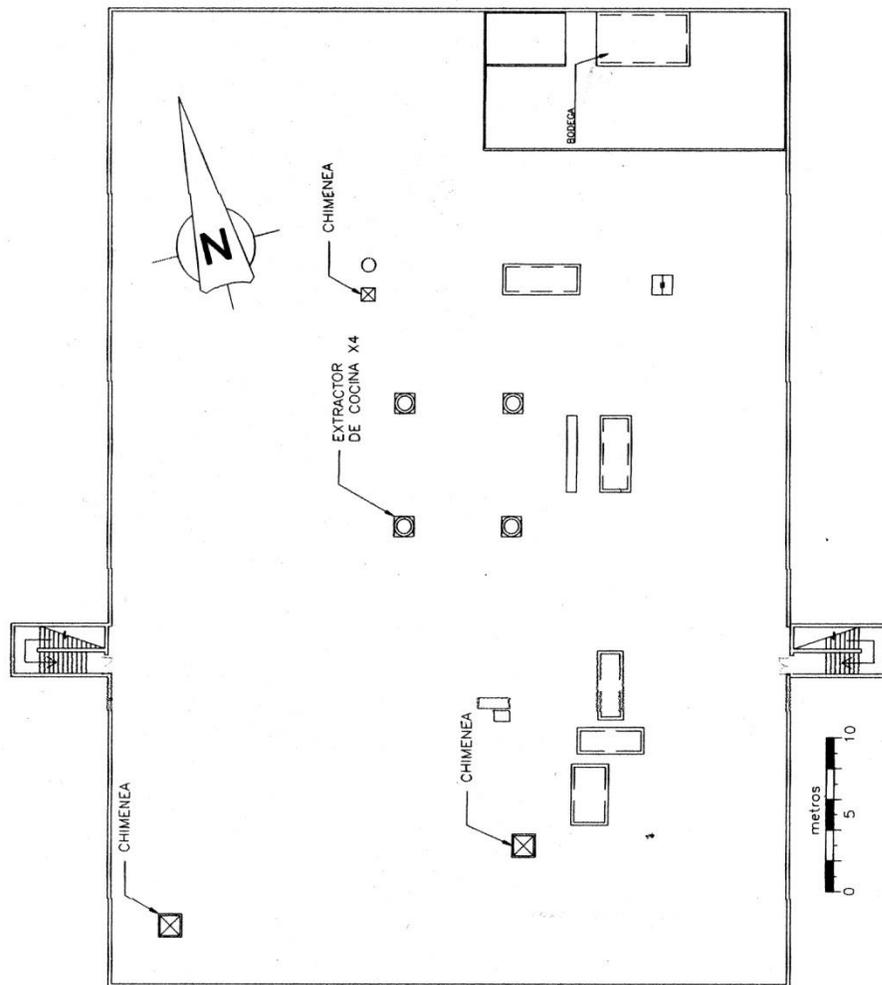
## BIBLIOGRAFÍA

1. CASTILLO VALDEZ, Álvaro. *Energía solar posibles aplicaciones para Guatemala en el campo de la tecnología adecuada*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1981. 161 p.
2. *Chromagen Catálogo técnico* [en línea]:<<http://www.chromagen.es>>ea] [Consulta: 24 de noviembre 2013].
3. ECHEVARRÍA BARRIOS, Juan Miguel. *Análisis de las variables relacionadas con el diseño de un calentador solar para climatizar piscinas*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánico. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1983. 84 p.
4. GÁLVEZ BARRIOS, Manuel Antonio. *Factibilidad de utilizar la energía solar para el precalentamiento de agua de calderas*. Trabajo de graduación de Ing. Químico. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1978. 56 p.
5. Impresos Industriales. *Aplicaciones de la energía solar*. Guatemala: ICAITI, 1983. 92 p.

6. LÓPEZ LÓPEZ, José Alfredo. *Prototipo de un colector solar plano y acumulador de calor con la tecnología apropiada para los laboratorios de la facultad de agronomía*. Trabajo de graduación de Ing. Agrónomo. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía, 1986. 131 p.
7. MCQUINSTON, Faye C. *Calefacción ventilación y aire acondicionado, análisis y diseño*. México: Limusa, 2003. 622 p.
8. MILLS, Anthony F. *Transferencia de calor*. España: McGraw-Hill, 1995. 960 p.
9. REYES BARRAGAN, Sergio. *Tesis Profesional Energía solar*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánico. México, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, 2009. 122 p.

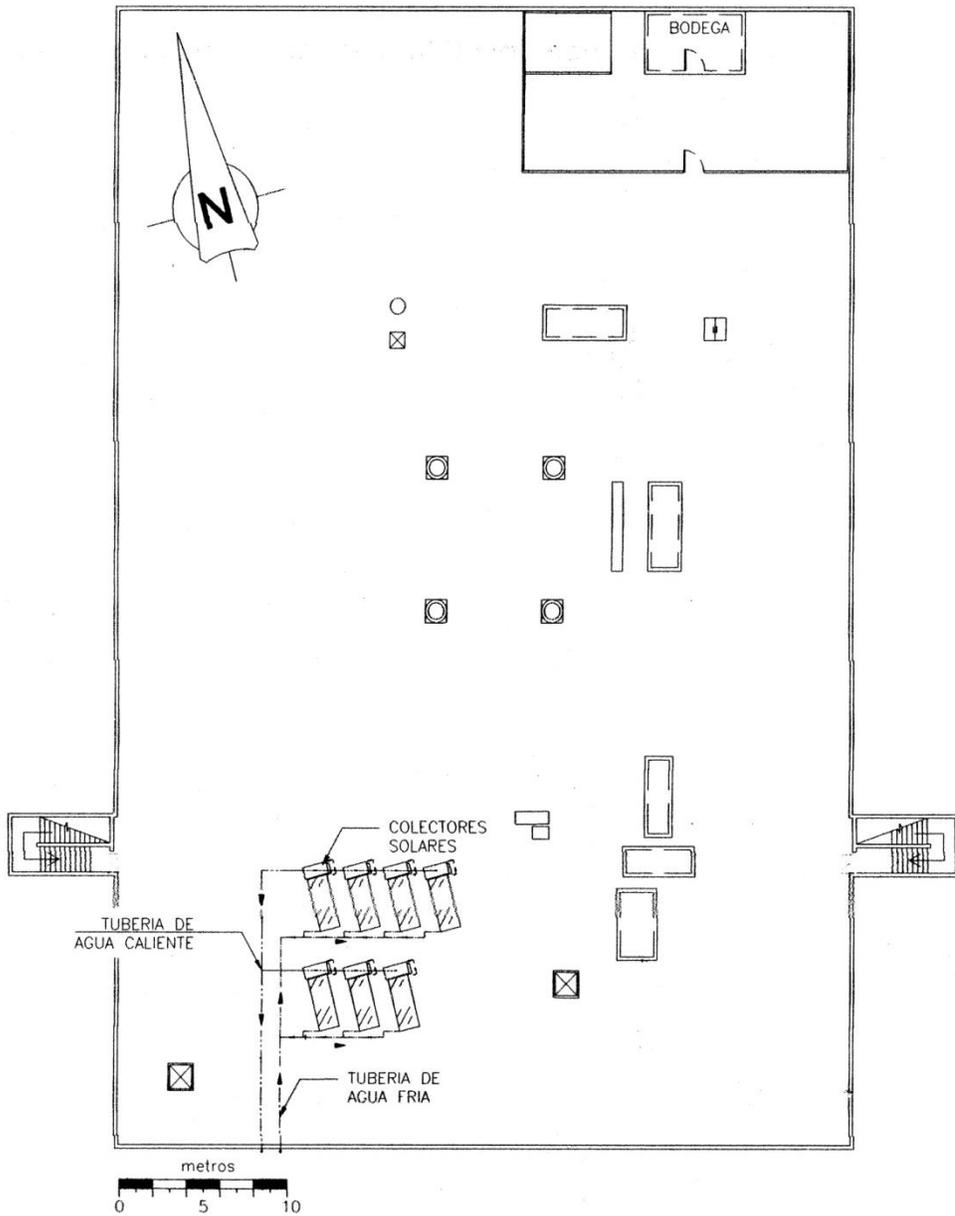
# APÉNDICES

Figura 1. Azotea del edificio de servicios generales



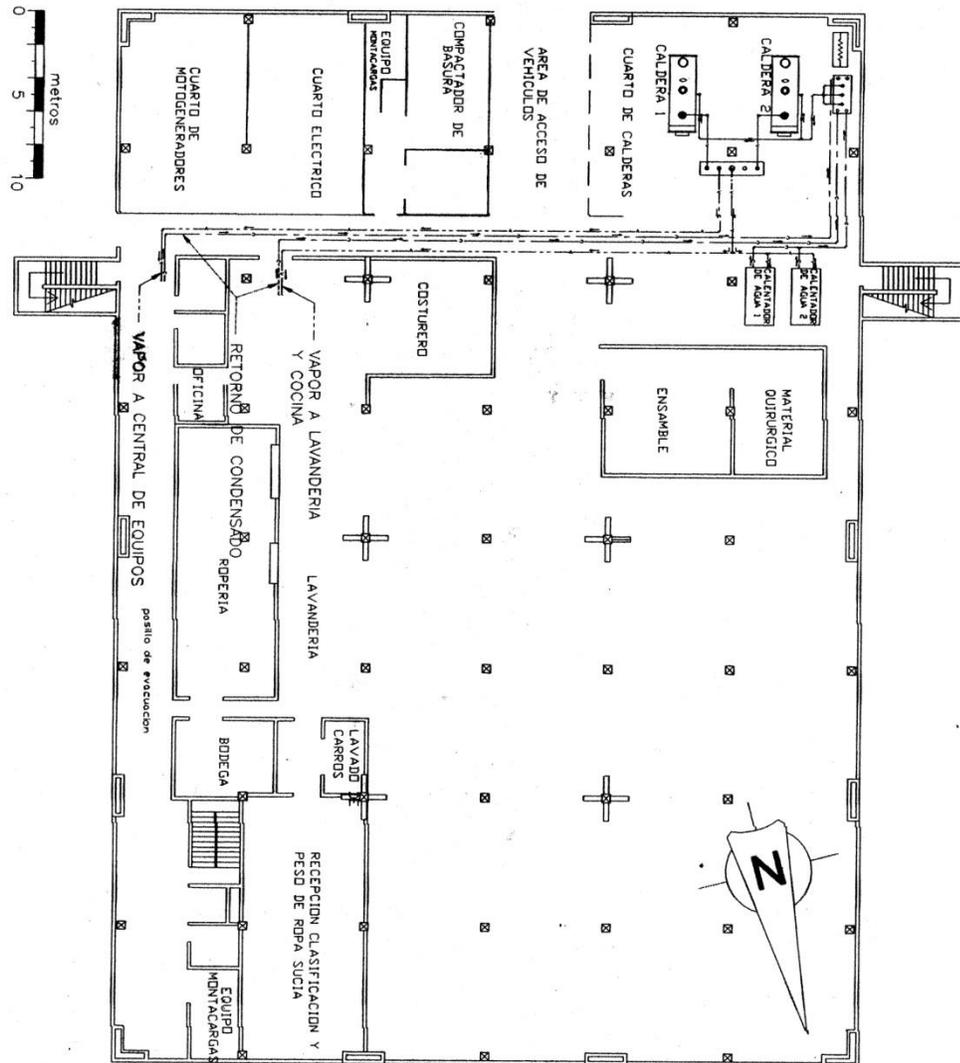
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2010.

Figura 2. **Posicionamiento de colectores solares, azotea del edificio de servicios generales**



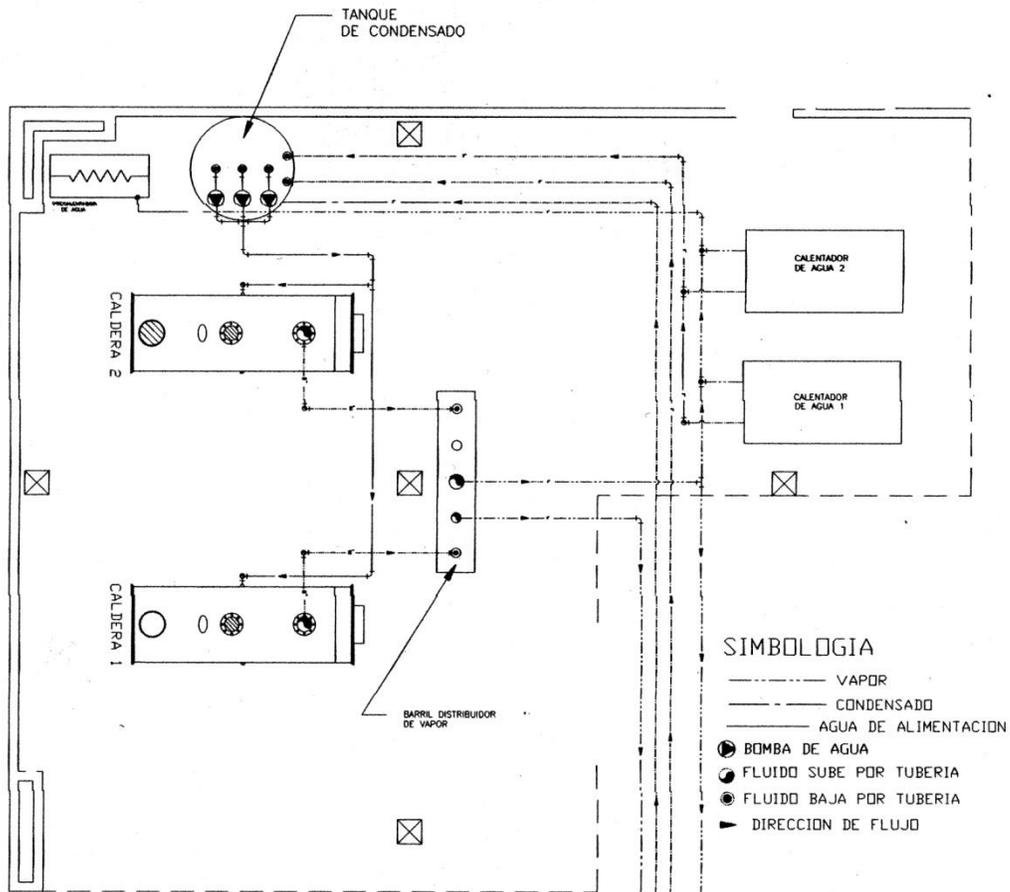
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2010.

Figura 3. **Planta baja, edificio de servicios generales**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2010.

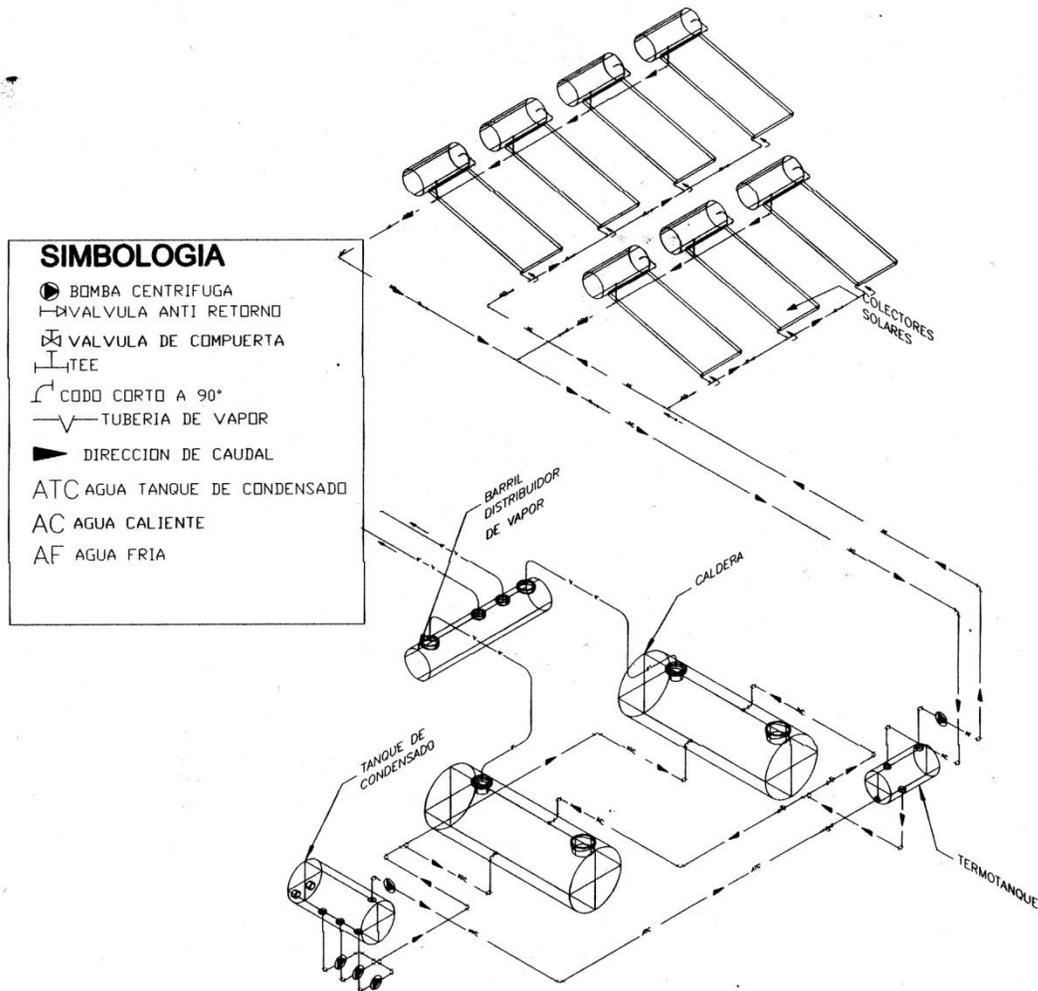
Figura 4. Vista en planta, cuarto de calderas



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2010.



Figura 6. **Proyección Isométrica del quipo generador de vapor con la conexión al sistema de colectores solares**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2010.