



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

**CONSIDERACIONES DE LOS PARÁMETROS Y CARACTERÍSTICAS PARA DETERMINAR
FUNCIONAMIENTO, EFICIENCIA Y DIMENSIONES DE LOS COMPONENTES UTILIZADOS
EN INSTALACIONES DE SISTEMAS ENERGÉTICOS TERMOSOLARES**

Erick David Salazar Hernández

Asesorado por el Ing. Roberto Guzmán Ortiz

Guatemala, julio de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CONSIDERACIONES DE LOS PARÁMETROS Y CARACTERÍSTICAS PARA DETERMINAR
FUNCIONAMIENTO, EFICIENCIA Y DIMENSIONES DE LOS COMPONENTES UTILIZADOS
EN INSTALACIONES DE SISTEMAS ENERGÉTICOS TERMOSOLARES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ERICK DAVID SALAZAR HERNÁNDEZ
ASESORADO POR EL ING. ROBERTO GUZMÁN ORTIZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, JULIO DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma
EXAMINADOR	Ing. Byron Giovanni Palacios Colindres
EXAMINADOR	Ing. Víctor Eduardo Izquierdo Palacios
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:

**CONSIDERACIONES DE LOS PARÁMETROS Y CARACTERÍSTICAS PARA DETERMINAR
FUNCIONAMIENTO, EFICIENCIA Y DIMENSIONES DE LOS COMPONENTES UTILIZADOS
EN INSTALACIONES DE SISTEMAS ENERGÉTICOS TERMOSOLARES**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 29 de marzo de 2011.



Erick David Salazar Hernández

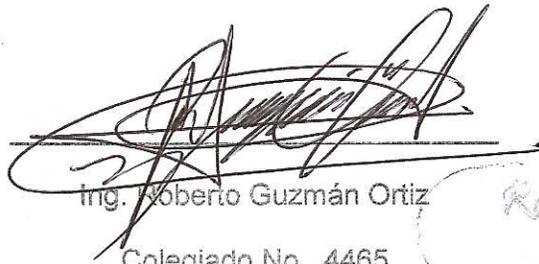
Guatemala, 27 de marzo de 2014

Ing. Julio Cesar Campos Paiz
Director de Escuela
Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero:

Me dirijo a usted para informarle, que ha finalizado la etapa de asesoría del trabajo de graduación titulado: **“CONSIDERACIONES DE LOS PARÁMETROS Y CARACTERÍSTICAS PARA DETERMINAR FUNCIONAMIENTO, EFICIENCIA Y DIMENSIONES DE LOS COMPONENTES UTILIZADOS EN INSTALACIONES DE SISTEMAS ENERGÉTICOS TERMOSOLARES”**, realizado por el estudiante Erick David Salazar Hernández que se identifica con número de carnet 200020104 , considerando que cumple con el contenido y objetivos propuestos en el protocolo aprobado por la Escuela de Ingeniería Mecánica.

Atentamente.


Ing. Roberto Guzmán Ortiz
Colegiado No. 4465

Roberto Guzmán Ortiz
INGENIERO MECÁNICO
Colegiado No. 4465

Asesor de Trabajo de Graduación



USAC

TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.Mecanica.75.2014

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 **CONSIDERACIONES DE LOS PARÁMETROS Y CARACTERÍSTICAS PARA DETERMINAR FUNCIONAMIENTO, EFICIENCIA, Y DIMENSIONES DE LOS COMPONENTES UTILIZADOS EN INSTALACIONES DE SISTEMAS ENERGÉTICOS TERMOSOLARES**, del estudiante **Erick David Salazar Hernández, carnet No. 200020104**, recomienda su aprobación.

"Id y Enseñad a Todos"


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



Guatemala, marzo de 2014.



USAC

TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.Mecanica.143.2014

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, con la aprobación del Coordinador del Área Térmica, del trabajo de graduación titulado **CONSIDERACIONES DE LOS PARÁMETROS Y CARACTERÍSTICAS PARA DETERMINAR FUNCIONAMIENTO, EFICIENCIA Y DIMENSIONES DE LOS COMPONENTES UTILIZADOS EN INSTALACIONES DE SISTEMAS ENERGÉTICOS TERMOSOLARES**, del Estudiante **Erick David Salazar Hernández**, procede a la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"

MA Ing. Julio César Campos Paiz
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica

MA Ing. Julio César Campos Paiz
DIRECTOR
Esc. Ingeniería Mecánica

Guatemala, julio de 2014.



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: **CONSIDERACIONES DE LOS PARÁMETROS Y CARACTERÍSTICAS PARA DETERMINAR FUNCIONAMIENTO, EFICIENCIA Y DIMENSIONES DE LOS COMPONENTES UTILIZADOS EN INSTALACIONES DE SISTEMAS ENERGÉTICOS TERMOSOLARES**, presentado por el estudiante universitario: **Erick David Salazar Hernández** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, julio de 2014

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

A todo lo que existe

Para el beneficio de nuestro planeta y de todo el universo.

Al pueblo de Guatemala

Por permitirnos a quienes hemos tenido la oportunidad, de recibir educación pública en todos los niveles hasta culminar la educación superior.

AGRADECIMIENTOS A:

Mis padres	En especial a mi mamá María Gabriela Hernández Soto que me ha dado todo su amor y mi papá Marco Tulio Salazar García.
Mis hermanos	Carolina Elizabeth Salazar Hernández e ingeniero industrial Hugo Oswaldo Salazar Hernández, por su cariño y apoyo.
Mi prima	María Olimpia Barrios Hernández, sus hijos Jorge Abimael, María Gabriela, Pablo Noé y su nieta Dahila María.
Todos los miembros de mi familia y amigos	Que me han apoyado y brindado su cariño.
Mis centros de estudios	Escuela Oficial Urbana Mixta No. 90 San Rafael 3 zona 18. Instituto Nacional de Educación Básica con Orientación Ocupacional Profesor Héctor Neri Castañeda Calderón. Al cincuentenario Instituto Técnico Vocacional Doctor Imrich Fischmann, en especial a su Taller de Dibujo de Construcción.

A la máxima casa de estudios superiores de Centroamérica, tricentenaria y grande entre las del mundo Universidad de San Carlos de Guatemala.

A la Facultad de Ingeniería y la Escuela de Ingeniería Mecánica, esperando que cumplan con la función de formar profesionales en el área científico tecnológica, con ética, responsabilidad social y excelencia académica, capaces de aportar soluciones a las necesidades de Guatemala.

FEU

Frente Estudiantil Universitario, que permanece y mantiene su espacio de unidad, organización y lucha por el libre acceso a la educación pública superior, con garantía de autonomía y sin privatización de los servicios que se deben proporcionar a toda la población guatemalteca.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	IX
LISTA DE SÍMBOLOS	XV
GLOSARIO	XVII
RESUMEN.....	XXIII
OBJETIVOS.....	XXV
INTRODUCCIÓN	XXVII
1. ANTECEDENTES Y REFERENCIAS PARA LA PROPUESTA DEL PROYECTO	1
1.1. Clasificación de los diferentes tipos de energía.....	1
1.2. Situación actual y visión a futuro de las fuentes energéticas a nivel mundial.....	2
1.3. Importancia de la utilización de fuentes energéticas renovables.....	5
1.4. Utilización de la energía solar.....	7
1.5. Situación actual del uso y consumo de la energía renovable a nivel nacional.....	8
1.6. Referencia de proyectos existentes en Guatemala aplicando sistemas energéticos a partir de fuentes solares ..	12
2. DEFINICIÓN TERMODINÁMICA DE LOS SISTEMAS DE TRANSFERENCIA ENERGÉTICA Y GENERACIÓN DE POTENCIA ...	15
2.1. Definición y descripción de sistemas de generación de potencia a partir de los ciclos termodinámicos convencionales utilizados en la actualidad.....	15

2.1.1.	Generación energética con vapor	15
2.1.2.	Generación energética con gases.....	19
2.1.3.	Generación energética combinada de vapor y gas	26
2.2.	Definición de sistemas de transferencia energética utilizando fuentes alternas renovables	28
2.2.1.	Energía eólica	28
2.2.2.	Energía hidráulica	29
2.2.3.	Energía generada con biomasa	31
2.2.4.	Energía mareomotriz.....	33
2.2.5.	Energía termosolar.....	34
2.2.6.	Energía solar fotovoltaica	35
3.	CARACTERÍSTICAS DE GENERACIÓN ENERGÉTICA APLICADAS EN PROCESOS TERMOSOLARES Y FOTOVOLTAICOS.....	37
3.1.	Clasificación de los sistemas de energía termosolar.....	37
3.1.1.	Energía termosolar a temperatura baja.....	38
3.1.2.	Energía termosolar a temperatura media	38
3.1.3.	Energía termosolar a temperatura alta	39
3.2.	Principios termodinámicos aplicados en los sistemas de energía solar	39
3.2.1.	Radiación solar en la superficie terrestre	39
3.2.1.1.	Radiación directa.....	42
3.2.1.2.	Radiación difusa.....	42
3.2.1.3.	Radiación reflejada.....	43
3.2.1.4.	Radiación global.....	43
3.2.1.5.	Radiación ultravioleta	44
3.2.1.6.	Luz visible.....	45

	3.2.1.7.	Radiación infrarroja.....	45
	3.2.2.	Distribución de la energía solar y la temperatura en Guatemala	46
	3.2.3.	Propiedades físicas y mecánicas de materiales utilizados en procesos termosolares.....	51
	3.2.3.1.	Parámetros de captación, emisión y reflectancia	51
	3.2.4.	Orientación y ubicación recomendable para los componentes del sistema energético termosolar....	55
4.		DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DE UN SISTEMA ENERGÉTICO TERMOSOLAR.....	59
	4.1.	Dispositivos de captación directa de la radiación solar	59
	4.1.1.	Colectores solares de superficie plana	59
	4.1.1.1.	Cubierta de los colectores	62
	4.1.1.2.	Placa absorbadora de energía.....	62
	4.1.1.3.	Aislante.....	68
	4.1.1.4.	Carcasa	70
	4.1.2.	Colectores solares de diversas formas geométricas	71
	4.1.2.1.	Colectores cilíndricos.....	72
	4.1.2.2.	Colectores parabólicos	73
	4.1.2.3.	Colectores esféricos	75
	4.1.2.4.	Colectores cilíndrico-parabólicos	76
	4.2.	Elementos de fijación	77
	4.3.	Intercambiadores de calor	78
	4.3.1.	Intercambiador externo	80
	4.3.2.	Intercambiador integrado con acumulador	82
	4.4.	Dispositivos almacenadores de energía	83

4.4.1.	Depósito y protecciones	89
4.4.1.1.	Descripción de la forma geométrica de depósitos	89
4.4.1.2.	Carcasa o recubrimiento	90
4.4.1.3.	Aislamiento.....	90
4.4.2.	Almacenadores de circuito abierto	91
4.4.3.	Almacenadores con intercambiador de calor	91
4.4.3.1.	Intercambiador simple	91
4.4.3.2.	Intercambiador múltiple	92
4.5.	Circuito hidráulico.....	93
4.5.1.	Bomba de circulación	94
4.5.2.	Materiales para ductos y tuberías	98
4.5.2.1.	Tuberías con recubrimiento aislante	98
4.5.2.2.	Tubería cpvc.....	99
4.5.3.	Vaso de expansión.....	99
4.5.3.1.	Vaso de expansión abierto.....	99
4.5.3.2.	Vaso de expansión cerrado.....	100
4.5.4.	Componentes de control hidráulico	101
4.6.	Instrumentos y aparatos de control en la instalación	103
4.6.1.	Sistema de control de temperatura y presión.....	104
4.6.1.1.	Aparatos de regulación	104
4.6.1.2.	Sensores de temperatura	106
4.6.1.3.	Instrumentos unitarios de medida	108
5.	PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS Y CÁLCULO PARA DETERMINAR FUNCIONAMIENTO Y EFICIENCIA DE LOS COMPONENTES A IMPLEMENTAR EN SISTEMAS ENERGÉTICOS TERMOSOLARES	109

5.1.	Descripción del funcionamiento y proceso en los dispositivos, aparatos y accesorios en la instalación de sistemas energéticos termosolares	109
5.2.	Análisis de propiedades termodinámicas para colectores solares.....	111
5.2.1.	Ecuaciones utilizadas para el balance energético.....	111
5.2.2.	Pérdidas de calor en colectores.....	116
5.2.3.	Coeficientes de transferencia de calor por convección utilizados en colectores solares planos.....	118
5.2.4.	Distribución de temperaturas en los tubos.....	119
5.2.5.	Tipos de captadores y sus aplicaciones	124
5.2.6.	Temperatura promedio en colectores	125
5.2.6.1.	Temperatura promedio en régimen estacionario	125
5.2.6.2.	Temperatura promedio en régimen transitorio.....	127
5.3.	Determinación del rendimiento energético de los dispositivos captadores, almacenadores y distribuidores de energía termosolar	128
5.3.1.	Factores de eficiencia y rendimiento usados en colectores y placas absorbentes.....	136
5.3.1.1.	Curvas de rendimiento.....	136
6.	DETERMINACIÓN DE LAS DIMENSIONES, DESCRIPCIÓN GRÁFICA Y ESPECIFICACIONES DE LOS COMPONENTES DE INSTALACIÓN EN UN SISTEMA DE TRANSFERENCIA ENERGÉTICA TERMOSOLAR.....	139

6.1.	Procedimiento de cálculo para determinar dimensiones de los componentes propuestos	139
6.2.	Proyección gráfica y especificaciones de la instalación	161
6.2.1.	Dispositivo de captación y distribución energética.....	162
6.2.2.	Dispositivo de almacenamiento energético	165
6.2.3.	Instalación del circuito hidráulico.....	166
6.2.4.	Ubicación del equipo de mando y control del sistema.....	169
6.3.	Proyección en conjunto del sistema propuesto	170
7.	COMPARACIONES DE FUNCIONAMIENTO Y EFICIENCIA EN LAS DIVERSAS CONFIGURACIONES DE DISPOSITIVOS EN LA INSTALACIÓN DE SISTEMAS ENERGÉTICOS TERMOSOLARES APLICADOS AL CALENTAMIENTO DE AGUA SANITARIA.....	173
7.1.	Diferentes tipos de circulación en el sistema	173
7.1.1.	Circulación natural.....	173
7.1.2.	Circulación forzada.....	174
7.2.	Diferencias en tipo de conexiones al utilizar varios captadores o colectores solares.....	175
7.2.1.	Conexión en serie	175
7.2.2.	Conexión en paralelo	176
7.2.3.	Conexión combinada serie y paralelo	177
7.3.	Diversos tipos de transferencia térmica	178
7.3.1.	Transferencia directa.....	178
7.3.2.	Transferencia con intercambiador y almacenador.....	178
7.4.	Diversos sistemas de expansión.....	180
7.4.1.	Sistema abierto	180

7.4.2.	Sistema cerrado.....	181
7.5.	Tipos de acoplamiento entre colector y almacenador de energía	181
7.5.1.	Equipo compacto	181
7.5.2.	Equipo separado.....	182
7.5.3.	Equipo integrado.....	183
7.6.	Formas de disposición de los componentes.....	184
7.6.1.	Colectores en sentido horizontal.....	184
7.6.2.	Colectores en sentido vertical.....	185
7.6.3.	Almacenador de energía en posición vertical	186
7.6.4.	Almacenador de energía en posición horizontal ...	187
CONCLUSIONES		189
RECOMENDACIONES		191
BIBLIOGRAFÍA.....		193

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Descripción del consumo de fuentes energéticas en Guatemala 2011.....	9
2.	Diagramas termodinámicos Ciclo Rankine.....	17
3.	Motor de combustión interna de dos tiempos.....	23
4.	Motor de combustión interna de cuatro tiempos	24
5.	Ciclo del motor de combustión interna encendido a chispa	25
6.	Ciclo combinado de gas y vapor	27
7.	Valores de radiación solar para Guatemala, Belice, El Salvador, Honduras, Nicaragua; correspondiente al promedio de marzo de 2013.....	50
8.	Ejemplo de una proyección instantánea para consultar valores de radiación.....	51
9.	Relación angular y vectorial para los parámetros de captación emisión y reflectancia.....	55
10.	Proyecciones de la ventana solar y la carta solar	57
11.	Colector solar plano	61
12.	Placa absorbedora con tubo en cinta	64
13.	Placa absorbedora con tubo en panel.....	65
14.	Placa absorbedora con tubo sobre cinta	65
15.	Placa absorbedora con tubo sobre panel.....	66
16.	Placa absorbedora con panel tipo oblea	67
17.	Placa absorbedora con aleta en tubos	67
18.	Placa absorbedora de tubos con aletas	68

19.	Colector cilíndrico	73
20.	Colector parabólico de revolución.....	74
21.	Colector parabólico compuesto	75
22.	Colector esférico.....	76
23.	Concentración solar en el colector cilíndrico parabólico	77
24.	Soportes para fijación de colectores solares	78
25.	Circuito con intercambiador de calor de contraflujo	80
26.	Circuito con intercambiador de calor de flujo mixto.....	81
27.	Circuito con intercambiador de calor de flujo paralelo	82
28.	Acumulador energético integrado con intercambiador de calor	83
29.	Circuito con colector y almacenador energético conectados directamente	85
30.	Intercambiador de calor tipo camisa	88
31.	Ejemplo de almacenador energético para sistemas termosolares.....	90
32.	Almacenador energético con intercambiador de calor simple.....	92
33.	Almacenador energético con intercambiador múltiple	93
34.	Ejemplo de bomba de circulación utilizada en sistemas termosolares	97
35.	Vaso de expansión abierto	100
36.	Vaso de expansión cerrado	101
37.	Ejemplos de válvulas utilizadas en instalaciones termosolares	102
38.	Ejemplo de central de regulación.....	106
39.	Ubicación recomendada de sensores de temperatura.....	107
40.	Diagrama de flujo de los componentes de un sistema energético termosolar	111
41.	Balance energético de un colector solar plano	115
42.	Distribución de energía solar incidente sobre colectores solares	117
43.	Unión de los tubos a placa.....	120
44.	Aleta de colector solar con sección transversal uniforme	121

45.	Balance energético en el depósito de almacenamiento	129
46.	Diagrama sistema termosolar con 2 depósitos de almacenamiento ..	133
47.	Curvas de rendimiento para el colector solar plano	137
48.	Gráfica transcurso del tiempo durante un día respecto a temperatura del depósito de almacenamiento	138
49.	Gráfica ancho de colector vs. eficiencia del colector.....	143
50.	Gráfica largo del colector vs. eficiencia del colector.....	143
51.	Gráfica número y diámetro de tubos vs. Eficiencia del colector	144
52.	Gráfica número y material de tubos vs. eficiencia.....	145
53.	Gráfica número de vidrios respecto a eficiencia.....	145
54.	Datos de radiación solar determinados por un software especializado	148
55.	Histograma de radiación solar mediante software especializado.....	148
56.	Radiación solar promedio para Guatemala mediante software especializado	149
57.	Características de la superficie reflectante esférica	157
58.	Sistema SRTA para colectores cilíndricos móviles	159
59.	Ubicación de equipos y accesorios en sistema termosolar con varios colectores	169
60.	Ubicación recomendada de equipo y accesorios en un sistema termosolar típico de un colector solar plano y un almacenador energético con intercambiador de calor simple	170
61.	Planta de distribución del sistema termosolar	171
62.	Proyección isométrica de la instalación termosolar residencial.....	172
63.	Comparación entre fluido en circulación natural y fluido en circulación forzada	174
64.	Proyección isométrica conexión de colectores en serie	176
65.	Proyección isométrica conexión de colectores en paralelo	176

66.	Proyección isométrica conexión de colectores combinada en serie y paralelo	177
67.	Transferencia térmica con acumulador de doble envolvente y acumulador con serpentín	180
68.	Diferencia en el sistema de expansión	181
69.	Equipo termosolar compacto Termosol	182
70.	Equipo separado.....	183
71.	Equipo integrado.....	184
72.	Colector en sentido horizontal	185
73.	Colector en sentido vertical.....	186
74.	Almacenador energético en posición vertical.....	187
75.	Almacenador energético en posición horizontal	187

TABLAS

I.	Balance energético de fuentes primarias en Guatemala 2011	5
II.	Radiación recibida y absorbida por la Tierra.....	46
III.	Energía solar reflejada.....	46
IV.	Temperaturas máximas, medias y mínimas en la República de Guatemala	47
V.	Índice de radiación solar en la República de Guatemala	48
VI.	Datos de radiación solar expresados en promedio mensual para Guatemala, Belice, El Salvador, Honduras, Nicaragua.....	49
VII.	Parámetros para determinar factor de eficiencia en colectores planos	122
VIII.	Consumo de agua caliente sanitaria para diversos usos.....	141
IX.	Parámetros para determinar componentes de la instalación termosolar.....	162
X.	Especificaciones para colectores solares planos.....	163

XI.	Parámetros y características de intercambiadores de calor, lado del colector y lado del almacenador.....	163
XII.	Especificaciones para tanques de almacenamiento energético.....	165
XIII.	Especificaciones para bombas en el circuito del colector solar.....	166
XIV.	Especificaciones para bombas en el circuito del almacenador energético	167
XV.	Especificaciones para bombas en el circuito de distribución del fluido	168

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
H₂O	Agua
ACS	Agua caliente sanitaria
CO₂	Bióxido de carbono
cm	Centímetro
Gv	Gigavoltio
Gw	Gigawatt
°C	Grados Celsius
°F	Grados Fahrenheit
g	Gramo
hp	<i>Horsepower</i> (caballo de fuerza)
J	Joule
kg	Kilogramo
kJ	Kilojoule
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt-hora
psi	Libras fuerza por pulgada cuadrada
MJ	Megajoule
MW	Megawatt
m	Metro
m²	Metro cuadrado
m³	Metro cúbico
µm	Micrómetro
mm	Milímetro

nm	Nanómetro
PVC	Policloruro de vinilo
CPVC	Tubería de policloruro de vinilo para agua caliente
V	Voltios
w	Watt

GLOSARIO

Absortancia	Relación entre el flujo de radiación absorbida por una superficie y la radiación total que incide sobre ella, también llamada coeficiente de absorción.
Albedo	Porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre la misma.
Balance energético	Valor estadístico de un sistema dado, proceso, región o sector económico, en un período de tiempo dado, de la cantidad de oferta de energía y la energía consumida, incluyendo las pérdidas estimadas, así como las formas de energía no empleadas con fines energéticos.
Calor	Forma de energía asociada al movimiento de átomos, moléculas y otras partículas que forman la materia.
Caudal volumétrico	Volumen de un fluido a través de una sección de un curso del mismo por unidad de tiempo, es denominado flujo volumétrico o en ocasiones simplemente caudal.

Catadióptrico	Es un sistema óptico que utiliza una combinación de espejos y lentes con el fin de mejorar la calidad de la imagen.
Celdas fotoeléctricas	Dispositivo electrónico que permite transformar la energía luminosa en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico. Es también llamada fotocelda o celda fotovoltaica.
CEPIS	Centro de Estudios para la Ingeniería Sanitaria.
Dendroenergía	Toda la energía obtenida a partir de biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos primarios y secundarios derivados de los bosques, árboles y otra vegetación de terrenos forestales.
Dióptrico	Sistema óptico formado por dos medios refringentes y una superficie de separación, los más importantes son el plano y el esférico, según que la superficie de separación sea plana o esférica.
Eficiencia energética	Cantidad de energía útil que se puede obtener de un sistema o de una tecnología en concreto. También se refiere a la utilización de tecnología que necesita menos energía para realizar la misma tarea.
Emitancia	Proporción de radiación térmica emitida por una superficie en relación a la de un cuerpo negro.

Energía alternativa	Se considera energía alternativa a toda forma de energía que puede sustituir a la energía convencional y que no implican impactos negativos significativos. Son consideradas como alternativas entre otras la energía solar, eólica, biomasa, etc.
Energía primaria	Se entiende por energía primaria a las distintas fuentes de energía tal como se obtienen en la naturaleza, ya sea: en forma directa como en el caso de la energía hidráulica, eólica o solar, la leña y otros combustibles vegetales, o después de un proceso de extracción como el petróleo, carbón mineral, energía geotérmica, etc.
Evaporación	Término aplicado al cambio de una sustancia de estado líquido a gaseoso.
INAB	Instituto Nacional de Bosques.
INE	Instituto Nacional de Estadística.
INSIVUMEH	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.
Lentes Fresnel	Diseño de lentes inventados por Augustin Fresnel, consiste en la construcción de lentes de gran apertura y una corta distancia focal sin el peso y volumen de material que debería usar en una lente de diseño convencional.

MEM	Ministerio de Energía y Minas.
NRECA	National Rural Electric Cooperative Association.
OPS	Organización Panamericana de la Salud.
OTEP	Oferta total de energía primaria.
Presión	Magnitud física que mide como la proyección de una fuerza actúa en la dirección perpendicular por unidad de superficie.
Reflectancia	Capacidad de las superficies de reflejar la luz, se define como la relación entre el flujo luminoso reflejado y el flujo luminoso incidente.
Reflexión	Cambio de dirección de una onda, que al estar en contacto con la superficie de separación entre dos medios cambiantes, regresa al punto donde se originó.
SWERA	Solar and Wind Energy Resource Assesment.
Temperatura	Magnitud escalar relacionada con la energía interna de un sistema termodinámico, definida por el principio cero de la termodinámica, está relacionada directamente con la energía cinética de un sistema.

Termodinámica

Rama de la física que estudia los fenómenos relacionados con las diversas formas de energía; se ocupa de las propiedades macroscópicas de la materia, especialmente las que son afectadas por el calor y la temperatura, así como de la transformación de unas formas de energía en otras.

RESUMEN

Los sistemas de energía captada a partir del sol se consideran una fuente renovable y sin perjuicio al medio ambiente; se incluye la descripción de la clasificación de las fuentes energéticas, la situación actual de los usos energéticos y la referencia sobre proyectos de energías renovables realizados en Guatemala. Se hace mención de la definición de los principales sistemas energéticos utilizados, incluidas las fuentes renovables, se consideran las características necesarias para la transferencia energética a partir de la fuente solar, tomando en cuenta características termodinámicas.

Se describen los componentes necesarios en un sistema termosolar siendo estos: colectores solares, equipos de almacenamiento de energía, intercambiadores de calor, elementos de fijación, aparatos y equipos para circulación hidráulica, además los instrumentos de medición y control de propiedades termodinámicas; se efectúa el proceso de análisis y se definen las ecuaciones necesarias, para determinar el funcionamiento y eficiencia de los componentes del sistema energético termosolar.

Además, se realiza el procedimiento para calcular el dimensionamiento recomendado para los equipos, aparatos y accesorios, así como la descripción gráfica constructiva y las especificaciones técnicas para un sistema energético termosolar. Por último se describen comparaciones de funcionamiento, en las diversas configuraciones de dispositivos en la instalación de sistemas energéticos termosolares, aplicados al calentamiento de agua sanitaria.

OBJETIVOS

General

Aplicar el conocimiento adquirido en el estudio y análisis de los parámetros y características que determinan el funcionamiento, la eficiencia y dimensiones de los componentes a utilizar en las instalaciones de sistemas energéticos termosolares; contribuyendo al desarrollo de las fuentes energéticas renovables y de manera orientada a la consulta de: estudiantes, profesionales de ingeniería mecánica, profesionales y estudiantes de diversas carreras y especializaciones, así como a la población en general.

Específicos

1. Realizar una propuesta referente a proyectos de aplicación de conocimientos, que interrelacionan en la carrera de ingeniería mecánica y su aporte a la sociedad guatemalteca en materia de fuentes energéticas renovables.
2. Describir todos los aspectos necesarios en la temática de fuentes energéticas termosolares, como parte del desarrollo nacional, para implementar como propuesta de solución efectiva en las necesidades de la población.
3. Plantear el desarrollo de proyectos de ingeniería mecánica; con la aplicación y utilización en forma concreta y apropiada de aspectos:

científicos, tecnológicos, económicos, sociales y ambientales en los temas relacionados a fuentes energéticas renovables.

INTRODUCCIÓN

La utilización apropiada de las fuentes energéticas alternas renovables es un tema de interés nacional, regional y mundial, en el cual intervienen directamente los conocimientos de la ingeniería mecánica.

A lo largo de la historia, la humanidad ha usado diversidad de fuentes energéticas y a las mismas se les ha dado una gran variedad de funciones; las fuentes energéticas han evolucionado respecto a: forma de captación, rendimiento de equipos, aprovechamiento y optimización en las características de funcionamiento.

En Guatemala se tiene gran variedad de formas y métodos que pueden contribuir al desarrollo nacional energético, una de estas formas es la utilización de fuentes energéticas alternas renovables; dentro de las cuales se puede mencionar: biomasa, eólica, solar, etc.

La energía solar se encuentra dentro de las fuentes energéticas primarias alternas y renovables, se ha seleccionado este tipo de energía como propuesta para el desarrollo de este trabajo de graduación, debido a la caracterización climática y energética que puede ser utilizada en Guatemala, considerando esta forma como una de las principales y significativas en varias regiones de la nación.

En este documento se describen las posibles alternativas de uso referente a transferencia de energía a partir de fuentes solares térmicas; lo que

establece directamente la utilización e implementación del equipo, aparatos y accesorios de tal forma que se obtenga la mayor eficiencia y rendimiento.

La transferencia energética a partir del sol consiste básicamente en la transformación de la energía solar incidente en otra forma de energía útil; esta transferencia térmica se realiza desde la fuente energética hacia un fluido, sin concentración de energía solar; a continuación se almacena en un dispositivo, luego se distribuye a través de tuberías o ductos para su utilización específica; el funcionamiento de estos sistemas puede efectuarse a partir de procesos termosolares o fotovoltaicos, dependiendo su uso.

El equipo de transferencia energética solar térmica comprende un dispositivo de captación, compuesto por colectores solares con características diversas de acuerdo al uso, en los cuales intervienen flujos de energía variables, teniendo una gran relevancia en los mismos los fenómenos de radiación y cambios de temperatura; además se debe contar con el equipo de almacenamiento, accesorios y aparatos para la distribución de la producción energética realizada por el sistema propuesto.

El contenido de este documento incluirá las características para determinar ubicación y montaje los elementos que conforman el sistema termosolar propuesto, con las recomendaciones técnicas y especificaciones necesarias para la implementación e interpretación del proyecto.

1. ANTECEDENTES Y REFERENCIAS PARA LA PROPUESTA DEL PROYECTO

1.1. Clasificación de los diferentes tipos de energía

Una de las formas de clasificación de las fuentes energéticas es la consideración de su proceso de transformación, el cual las establece como energías primarias y energías secundarias.

Se consideran energías primarias a aquellas en las que se logra obtener energía directamente del recurso utilizado. Dentro de los tipos de energía primaria se pueden enumerar: carbón, petróleo, gas, solar, biomasa, eólica e hidráulica.

Mientras que en las energías secundarias se necesita de un proceso de transformación energética para su utilización, dentro de los tipos de energía secundaria se puede enumerar: eléctrica, nuclear, geotérmica, hidroeléctrica.

Otra manera de clasificar los tipos de energía se hace según el recurso de extracción utilizado, este criterio clasifica las formas de energía como: renovables, no renovables o intermedias.

Los tipos de energía renovables están regidos por recursos, ciclos y fenómenos propios que inciden en el planeta Tierra; su existencia depende de las características y variaciones naturales de cada región, país o continente; dentro de las fuentes energéticas renovables se encuentran: solar, eólica, biomasa, hidráulica, corriente marina, gradiente térmico marino.

La energía solar a su vez se puede subdividir en termosolar y fotovoltaica, dependiendo de su uso, la primera para generación y transmisión de calor en fluidos y la segunda para generación eléctrica.

Los tipos de energía no renovable son producidos por la utilización de recursos energéticos formados en épocas remotas de la historia de la Tierra y su característica principal es la limitación en sus reservas y en la cantidad de producción.

Los recursos de los cuales procede la energía no renovable poseen carácter estático, es decir que su extracción desmedida puede llegar a producir su agotamiento total en un plazo corto, dentro de los recursos utilizados para la producción de energía no renovable se puede mencionar: carbón, petróleo, gas natural, energía nuclear por fisión.

Las energías de carácter intermedio, pueden presentar características como un plazo de agotamiento más largo, o pueden no estar regidas enteramente por ciclos y fenómenos naturales, por estas razones no se pueden considerar renovables o no renovables, más bien se catalogan como intermedias entre ambas; como ejemplos de estos tipos de energía están: geotérmica, energía nuclear por fusión, energía producida por las mareas.

1.2. Situación actual y visión a futuro de las fuentes energéticas a nivel mundial

Todas las formas de vida y todas las sociedades requieren en mayor o menor grado de una recepción y consumo constante de energía. Se puede considerar que las sociedades más industrializadas y complejas utilizan más energía que las no industrializadas.

Mientras las sociedades modernas industrializadas continúen sobreviviendo y desarrollándose, deben consumir más energía; sin embargo ha sido demostrado que deben cambiar su modelo tanto en la generación como en el consumo energético.

Cuando las fuentes energéticas utilizadas convencionalmente en la actualidad se vuelvan limitadas o bien cuando el uso de estas fuentes energéticas provoquen impacto económico, social y ambiental; esto se convertirá en una demanda urgente e impostergable de un cambio en el modelo de consumo y el descubrimiento de nuevas formas de energía compatibles con el bienestar humano y el de la naturaleza.

La demanda energética mundial, representada por los combustibles fósiles ha tenido un incremento entre 1955 y 2005 alrededor de un 450 %, trayendo como consecuencia varias y sucesivas etapas de crisis energética.

La más reciente de estas crisis energéticas que se está viviendo, no solo se refiere a la escasez de los hidrocarburos; también esta relacionada con las políticas determinadas por gobiernos y sectores que poseen el control del poder económico a nivel mundial; que en algunos casos han provocado la realización de diversas guerras con fines de invasión y control sobre los recursos de los pueblos, añadiendo a esto el calentamiento global que está produciendo un cambio climático en todo el planeta.

Ante la problemática energética actual, la ciencia y la tecnología juegan un papel sumamente importante, para mejorar considerablemente el nivel de vida de los pueblos del mundo, así como la protección del medio ambiente en beneficio de un equilibrio ecológico mundial.

Por consiguiente se hace necesario minimizar la influencia del cambio climático producido principalmente por las grandes potencias energéticas mediante la disminución considerable de la emisión de gases de efecto invernadero; será un objetivo de vital importancia realizar todos los esfuerzos relacionados al uso de equipos, instalaciones y fuentes de energía más eficientes y no perjudiciales para los ecosistemas de todo el planeta.

Es fundamental, el estudio, análisis y desarrollo de proyectos de ingeniería en el campo de la energía, para que las naciones establezcan verdaderos proyectos de desarrollo a nivel general y particular, además de establecer políticas de desarrollo y control sobre las fuentes y usos energéticos; con lo cual se logra seguir avanzando en la investigación e implementación tecnológica, para la utilización apropiada de las fuentes energéticas renovables y lograr ser menos dependientes de las fuentes convencionales por todas las implicaciones sociales, económicas y ambientales.

Tabla I. **Balance energético de fuentes primarias en Guatemala 2011**

ACTIVIDADES	PETR	CRBN	HYDR	GEOE	LEÑA	BCAÑ	
Total							
Producción	3,966.74	0.00	3,233.94	1,522.42	37,253.01	12,424.03	58,400.14
Importación	0.00	2,878.72	0.00	0.00	0.00	0.00	2,878.72
Exportación	3,504.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3,504.33
Variación Inventario	108.67	-395.56	0.00	0.00	0.00	0.00	-286.89
OFERTATOTAL	571.07	2,483.16	3,233.94	1,522.42	37,253.01	12,424.03	57,487.64
Refinerías	-571.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-571.07
Centrales Eléctricas	0.00	-2,483.16	-3,216.63	-1,522.42	0.00	-8,696.82	-15,919.03
Autoproductores	0.00	0.00	-17.31	0.00	0.00	-3,727.21	-3,744.52
TOTAL TRANSFORMACION	-571.07	-2,483.16	-3,233.94	-1,522.42	0.00	-12,424.03	-20,234.63
Consumo Propio	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pérdidas	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ajuste	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Transporte	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Industria	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Residencial	0.00	0.00	0.00	0.00	36,135.42	0.00	36,135.42
Comercio y Servicios	0.00	0.00	0.00	0.00	1,117.59	0.00	1,117.59
CONSUMO ENERGÍA	0.00	0.00	0.00	0.00	37,253.01	0.00	37,253.01
NO ENERGETICO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CONSUMOFINAL	0.00	0.00	0.00	0.00	37,253.01	0.00	37,253.01

Fuente: Ministerio de Energía y Minas (MEM).

1.3. **Importancia de la utilización de fuentes energéticas renovables**

Indudablemente se hace cada vez más necesario el abastecimiento de energía en diversas formas, y para diversos usos; como se explicó anteriormente el consumo es mucho mayor en los países industrializados; sin embargo la historia sigue avanzando y varios países de una u otra forma se acercan al aumento desmedido de consumo energético o están en vías de desarrollo y pueden acelerar el mismo.

Factores determinados por relaciones económicas, sociales, políticas, pueden ayudar o perjudicar el desarrollo de los proyectos de energías renovables, el mismo uso inapropiado y la exclusión de la población más pobre en decisiones respecto a la utilización y consumo de recursos energéticos, para el beneficio de sectores particulares impide una relación efectiva en el establecimiento y en la funcionalidad de los proyectos energéticos.

Mientras que algunos de estos proyectos solo benefician a los intereses de sectores privilegiados económicamente, seguirá existiendo una polarización en las relaciones sociales e influencia política, así como una serie de contradicciones entre la población, que en gran manera será afectada positiva o negativamente dependiendo la orientación en el uso y funcionamiento de los proyectos energéticos.

Muchos pueblos y culturas ancestrales comprendían y utilizaban las fuentes energéticas naturales dentro de su modo de subsistencia, manteniendo una relación de equilibrio entre el consumo energético y los ecosistemas, aun cuando el análisis y estudio de ambas materias no se habían desarrollado, o al menos no se tiene documentación específica acerca de esta temática.

Se hace cada vez más necesario y urgente, establecer procesos y métodos para minimizar la influencia del cambio climático mediante la disminución considerable de la emisión de gases nocivos; así como evitar un mayor deterioro de la naturaleza, siendo esto perjudicial para el mundo entero.

1.4. Utilización de la energía solar

Entre las múltiples aplicaciones de la energía solar se encuentran su aprovechamiento como luz directa, como fuente de calor y en la generación de electricidad principalmente, a continuación se amplía cada uno de estos usos.

Una de las aplicaciones de la energía solar es directamente como luz solar, por ejemplo, para la iluminación. Otra aplicación directa, muy común, es el secado de ropa y algunos productos en procesos de producción con tecnología simple.

Las aplicaciones en agricultura son muy amplias, con invernaderos solares pueden obtenerse mayores y más tempranas cosechas; los secaderos agrícolas consumen menos energía si se combinan con un sistema solar, y por citar otro ejemplo, pueden funcionar plantas de purificación o desalinización de aguas sin consumir ningún tipo de combustible.

La energía solar puede ser aprovechada por medio de celdas fotoeléctricas capaces de convertir la luz en un potencial eléctrico, sin necesariamente pasar por un efecto térmico. Para lograr esto la energía solar se recoge de una forma adecuada. El calor se genera mediante los colectores térmicos y la electricidad, a través de los llamados módulos fotovoltaicos.

La energía solar puede utilizarse para el calentamiento de algún sistema que posteriormente permitirá la climatización de viviendas, calefacción, refrigeración, secado, entre otros, son aplicaciones térmicas.

Los sistemas de aprovechamiento térmico permiten que el calor captado en los colectores pueda destinarse y satisfacer numerosas necesidades, por

ejemplo, se puede obtener agua caliente para consumo doméstico o industrial, o bien generar calefacción a casas, hoteles, escuelas, fábricas, entre otros.

Incluso se pueden climatizar las piscinas para permitir su uso durante gran parte del año, sobre todo en aquellos países donde se presentan las estaciones climáticas muy marcadas.

Las células solares, dispuestas en paneles solares, ya producían electricidad en los primeros satélites espaciales, actualmente se perfilan como la solución definitiva al problema de la electrificación rural, con clara ventaja sobre otras alternativas, pues, al carecer los paneles de partes móviles, resultan totalmente inalterables al paso del tiempo, no contaminan ni producen ningún ruido en absoluto, no consumen combustible y no necesitan mantenimiento sofisticado; además, y aunque con menos rendimiento, funcionan también en días nublados, puesto que captan la luz que se filtra a través de las nubes.

La energía solar térmica aprovecha la radiación del Sol para calentar un fluido que, por lo general suele ser agua o aire. La capacidad de transformar los rayos solares en calor es, precisamente, el principio elemental en el que se basa esta fuente de energía renovable.

1.5. Situación actual del uso y consumo de la energía renovable a nivel nacional

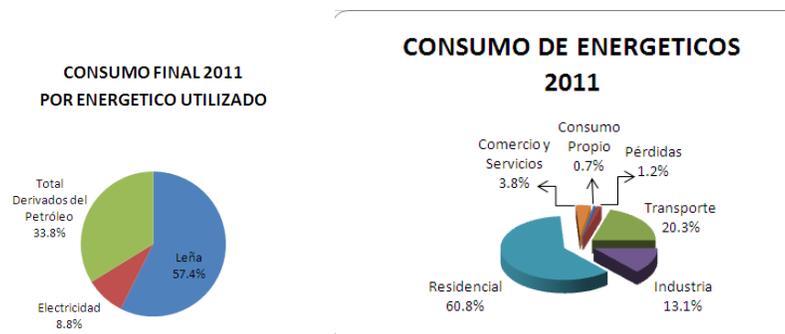
En Guatemala el recurso energético más utilizado es la leña con un consumo de 41314,14 GW/h lo que representa alrededor 48,1 % del consumo de energía del país; Guatemala es uno de los países de la región con más alto aporte de utilización de energía por leña denominada dendroenergía, alcanzando un porcentaje acumulativo cercano al 60 %.

Es importante mencionar que la información oficial recibida del Ministerio de Energía y Minas MEM indica que el 96 % de la leña consumida en áreas rurales y urbanas proviene de bosques sometidos a procesos de deforestación; por lo tanto se constituye en energía generada por biomasa no sostenible.

De acuerdo al balance energético oficial de Guatemala publicado por el MEM para el 2007, muestra que la leña constituye el 51,4 % del consumo final de energía, la leña todavía es un recurso energético utilizado por una gran cantidad de personas, principalmente en el área rural, donde mas del 80 % de los hogares dependen de ella como recurso energético cotidiano.

Guatemala cuenta con una considerable cantidad de recursos energéticos y por consiguiente un potencial para aprovecharlos, como lo muestra la gráfica de descripción de consumo, en donde se observa a la energía eólica con uno de los mayores potenciales pero aún sin ser utilizado.

Figura 1. **Descripción del consumo de fuentes energéticas en Guatemala 2011**



Fuente: Ministerio de Energía y Minas (MEM).

Guatemala tiene alto Índice de Sostenibilidad Residencial, significando esto que el país es fuertemente dependiente de la leña para satisfacer las necesidades de la población y es uno de los países de la región con más alto aporte de dendroenergía a la Oferta Total de Energía Primaria (OTEP).

Tomando en consideración los datos del Instituto Nacional de Bosques (INAB) durante el período 1999-2004, en Guatemala el volumen de la madera cosechada fue de aproximadamente 3,4 millones de m³, de este total, el 65 % se destinó a la industria forestal nacional, el 35 % se utilizó como energía primaria para combustión, generada a través de leña.

Entre los departamentos donde el uso de la leña es mayor, se pueden enumerar Petén, Alta Verapaz, Baja Verapaz, Quiché, Huehuetenango, Chimaltenango y Sacatepéquez, de donde se extrajo alrededor del 60 % de troza para abastecer a la industria forestal y el 40 % para leña.

En cuanto al uso de residuos agroindustriales la fuente principal es el bagazo de caña producida por las Plantas procesadores de caña de azúcar, conocidas como Ingenios, esta generación está regulada en el Decreto Ley 57-95, la producción total de electricidad de los Ingenios corresponde aproximadamente al 10,7 % de la capacidad total instalada del país para el 2011.

Respecto a la energía eólica, según investigaciones realizadas Guatemala cuenta con un potencial teórico de 7 800 MW provenientes de esta fuente. Este potencial representa 1,5 veces la capacidad bruta estimada de las hidroeléctricas que podrían ser construidas en el país, y cinco veces lo que consume la nación en su totalidad 1 500 MW, vale la pena mencionar que un Megawatt puede suministrar electricidad a una comunidad de 20 000 personas.

Este mismo estudio señala que Centroamérica está bajo la influencia de los vientos alisios, un sistema de velocidad y dirección relativamente constante, que sopla en ambos hemisferios, los países que han comenzado a explotar este recurso son Costa Rica, Nicaragua y en menor grado Honduras.

De acuerdo con la medición promedio durante un año, hecha por el MEM muestra a Santa Rosa, Sacatepéquez, Escuintla, Zacapa y Jutiapa como los departamentos más atractivos para construir campos eólicos en Guatemala, pues registran vientos con velocidades de hasta 12 metros por segundo.

“En materia legal y jurídica vigente en Guatemala se tiene el Decreto Número 52-2003 Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable” y “Acuerdo Gubernativo No. 211-2005 Reglamento de la Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable”, una ley y su respectivo reglamento cuya función debe ser regular, promover y apoyar los proyectos de energía renovable.”¹

La Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable y su respectivo reglamento, si bien es cierto apoyan y promueven el desarrollo energético a través de recursos renovables con diversos incentivos, limita directamente la creación e implementación de la tecnología impulsada por ingenieros, inventores, científicos y técnicos guatemaltecos; ya que solo incluye el apoyo a maquinaria, equipo, accesorios y repuestos importados; además de no regular en forma específica aspectos económicos, sociales y ambientales que puedan afectar a la población de comunidades donde se tenga un impacto directo o indirecto por la realización de estos proyectos.

¹Decreto Número 52-2003 Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable. Acuerdo Gubernativo No. 211-2005 Reglamento de la Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable

1.6. Referencia de proyectos existentes en Guatemala aplicando sistemas energéticos a partir de fuentes solares

El valor anual promedio que Guatemala tiene de radiación solar promedio que corresponde a 5,3 kWh/m²/día. Las mediciones de radiación solar, temperaturas y otros datos físicos climatológicos, se han recopilado en sistemas de información geográfica, a través de los cuales se determinan los lugares en donde puede ser aprovechada de mejor manera la energía solar con el objetivo de realizar proyectos de energía solar fotovoltaica y termosolar.

En Alta Verapaz se ha empleado energía solar para alimentar plantas de purificación de agua, cocinas no contaminantes e iluminación en escuelas para el uso de computadoras. Con relación a la población beneficiada, según el censo de población del 2002, realizado por el Instituto Nacional de Estadística (INE), unas 18 000 familias utilizaban ya en el país un panel solar en las viviendas.

El Ministerio de Energía y Minas MEM inició proyectos de electrificación rural con paneles fotovoltaicos desde 1994, se tiene un total de 3 435 paneles solares instalados al 2006. Los beneficiarios de estos proyectos se encuentran en comunidades de los departamentos de Huehuetenango, Quiché, Chiquimula y Alta Verapaz, los proyectos citados han sido financiados por la Unión Europea.

Existe un proyecto de energía solar, el cual consiste en 115 sistemas que fueron aprobados en 2005, estos sistemas fueron instalados en las comunidades de Panzós y El Estor con fondos internacionales y locales, siendo ejecutados por National Rural Electric Cooperative Association (NRECA), estos sistemas fueron utilizados para la iluminación domiciliar.

En el país existe un promedio de 20 000 sistemas fotovoltaicos instalados en el interior de la república, cada sistema tiene un costo inicial que oscila entre Q 4 000,00 y Q 5 000,00. En cuanto a la potencia de luz solar que existe en Guatemala para el 2006 era de 5,4 kw/m²/día en promedio, según datos oficiales.

“Energía limpia y renovable para el desarrollo rural y comunitario” es el lema de presentación y promoción del Programa Euro-Solar, el mismo es una iniciativa a nivel mundial de la Oficina de Cooperación de la Unión Europea.

El programa Euro-Solar tiene como objetivo principal que se promuevan las energías renovables como motor de desarrollo humano en los ocho países más desfavorecidos de América Latina: Bolivia, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicaragua, Paraguay y Perú.²

En Guatemala los proyectos de este programa han sido coordinados por el Ministerio de Energía y Minas a través de la Dirección General de Energía teniendo apoyo de los Ministerios de Educación, Salud y Asistencia Social además de 28 municipalidades. Dicho Programa inició el 18 de enero de 2007 y se contempló finalizar en octubre de 2011; quedando en aquel momento pendiente una segunda parte que consiste en una ampliación de tiempo por un período de 13 meses, planteando finalizar la fase operativa en mayo de 2012 y la fase de cierre para mayo 2013.

De acuerdo a entrevista realizada con un profesional de la Dirección General de Energía, Departamento de Energías Renovables, existe muy poca información a nivel gubernamental de los proyectos energéticos renovables, lo que se puede considerar un indicativo de que el desarrollo de estos proyectos

²Departamento de Energías Renovables, Dirección General de Energía, MEM.

se ha dejado puramente en la iniciativa privada e instituciones y organizaciones no gubernamentales principalmente de carácter internacional; reflejando así la inmadurez científica tecnológica, así como la irresponsabilidad histórica y política con las cuales el Estado de Guatemala atiende y afronta esta temática.³

Respecto al papel en el área académica que la Universidad de San Carlos de Guatemala a través de la Facultad de Ingeniería debe desempeñar, aún falta profundizar en la investigación y el desarrollo de estos proyectos, para tener claridad en aspectos económicos, sociales, ambientales y tecnológicos, referentes a fuentes energéticas renovables, todos los impactos causados por los proyectos en donde se desarrollen energías renovables, particularmente de origen solar y directamente en la aplicación para la construcción implementación y funcionamiento de estos proyectos.

³Departamento de Energías Renovables, Dirección General de Energía, MEM.

2. DEFINICIÓN TERMODINÁMICA DE LOS SISTEMAS DE TRANSFERENCIA ENERGÉTICA Y GENERACIÓN DE POTENCIA

2.1. Definición y descripción de sistemas de generación de potencia a partir de los ciclos termodinámicos convencionales utilizados en la actualidad

A fines del siglo XVIII aparece en Inglaterra la máquina de vapor, que surge de la necesidad de obtener fuerza motriz para las bombas de desagote en los pozos de las minas de carbón.

2.1.1. Generación energética con vapor

A fines del siglo XVIII aparece en Inglaterra la máquina de vapor, que surge de la necesidad de obtener fuerza motriz para las bombas de desagote en los pozos de las minas de carbón.

Transcurrió muy poco tiempo para que la aplicación del vapor se generalizara en Europa, haciendo posibles una serie de cambios en procesos económicos y productivos de gran impacto en ese continente, extendiéndose luego a otras partes del mundo.

En 1814 Stephenson, ingeniero autodidacta, construye la primera locomotora; en 1826 se tiende la primer vía férrea en Inglaterra. En 1830 en diversos países de todo el mundo hay 330 Km de vías para trenes, en 1870 se alcanza la cantidad de 200 000 km de líneas para el tránsito del ferrocarril.

En 1807 Fulton en Estados Unidos de América, construye y navega en el primer barco a vapor, en 1819 cruzó el Atlántico el primer barco a vapor, siendo un viaje accidentado pues se quedaron sin recursos al terminarse el suministro de carbón y hubo que finalizar a vela; las deficiencias técnicas se fueron superando hasta alcanzar una eficiencia aceptable en los dispositivos mecánicos a base de vapor de agua.

El inmenso aumento de productividad traído por el vapor, junto con la baja concomitante de precios de productos elaborados en forma masiva, trajo como consecuencia la ruina de las antiguas clases artesanales que terminaron formando un sustrato social enorme, desprotegido y miserable; suministrando mano de obra barata a los países europeos; esta tendencia facilitó la concentración de capital capaz de financiar la expansión colonialista hacia los otros continentes de mediados de siglo XIX, así como el aceleradísimo proceso de industrialización que transformó a Europa y luego a otras partes del mundo a partir de esa época.

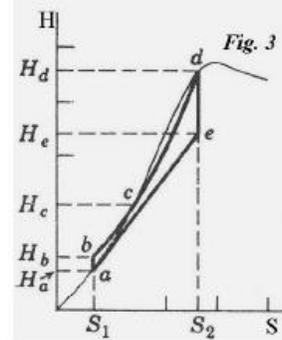
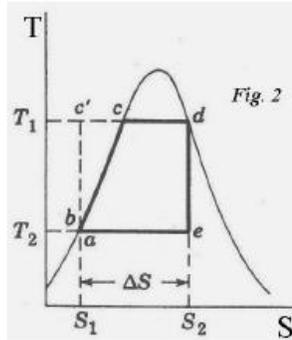
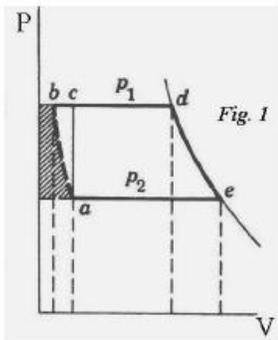
Los ciclos de generación de potencia por medio del vapor, han provisto parte de la generación de energía eléctrica que se produce en el mundo, en la actualidad muchas industrias, principalmente en países más desarrollados, disponen de generación de vapor propio ya sea para energía eléctrica o calentamiento. Cuando se emplea vapor para calentamiento y para generar energía el sistema puede ser bastante complejo.

El sistema que funciona según este ciclo es denominado Rankine, consta de una caldera donde el agua que es el fluido más conveniente por ser abundante y barato, entra a la caldera en el estado líquido y sale al estado de vapor; luego hay una turbina donde el vapor se expande produciendo trabajo; a continuación este vapor entra a un aparato de condensación de donde sale

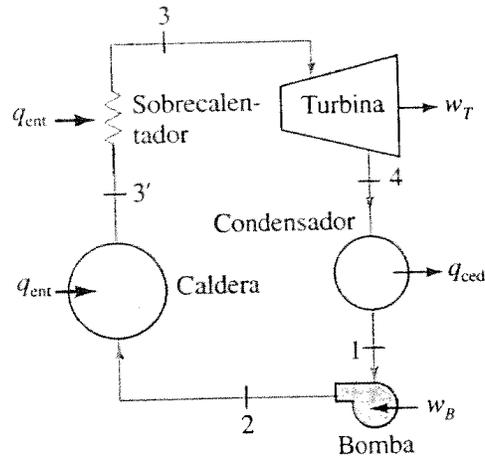
como líquido saturado; este a su vez es tomado por una bomba de inyección necesaria para vencer la presión de la caldera, que lleva el caudal de agua a presión alta hacia el siguiente estado, donde ingresa a la caldera, completando el ciclo Rankine, el mismo se describe gráficamente a través de los diagramas en la figura 3. En las diversas ilustraciones se exagera la etapa de bombeo; pero en la práctica sería prácticamente indistinguible de la curva de líquido saturado en cualquier diagrama.

El proceso de condensación es necesario para poder inyectar el agua como líquido en la caldera, porque al bombear un líquido se requiere mucho menos energía que comprimir un vapor. Si no existiese la condensación, el trabajo neto producido sería muy inferior al valor obtenido.

Figura 2. **Diagramas termodinámicos Ciclo Rankine**



Continuación de la figura 2.



Fuente: RODRÍGUEZ, Jorge. *Introducción a la termodinámica con algunas aplicaciones de ingeniería*. p. 370.

En general en un ciclo que tenga cualquier modificación que produzca un aumento del área encerrada por el ciclo sin modificar, la cantidad de energía suministrada Q_1 ha de aumentar el rendimiento, puesto que un aumento del área encerrada por el ciclo implica un aumento de trabajo neto, por lo que necesariamente debería aumentar la eficiencia. Algunos de los modos de conseguir esto son:

- Disminuir la presión de salida de la turbina
- Aumentar la temperatura y presión de operación en la caldera
- Implementar un ciclo regenerativo, utilizando intercambiadores de calor

Estas modificaciones ya han sido implementadas en la mayoría de sistemas que en la actualidad son diseñados y construidos a partir de estas características.

2.1.2. Generación energética con gases

Los ciclos de gas se caracterizan porque el fluido de trabajo no experimenta cambios de fase; estos ciclos se implementan en motores que pueden ser de combustión interna o externa, según donde ocurra esta.

En 1816 el sacerdote inglés Stirling dedicó mucho tiempo y esfuerzo en experimentar con un motor de combustión externa que usaba aire, el dispositivo fracasó a pesar de su innegable ingenio y habilidad mecánica; esto debido principalmente a los rudimentarios elementos e inadecuados materiales con los que contaba; actualmente versiones modificadas del motor de aire Stirling funcionan con altos rendimientos.

En 1856 el francés Beau de Rochas propone un ciclo de motor de combustión interna pero no lo construye; recién en 1860 aparece el primer motor de combustión interna de cierto éxito comercial, pero duró poco debido a la aparición de una máquina a pistón libre debida a Otto y Langen desarrollada en 1867 cuyo rendimiento era superior.

Posteriormente en 1876 aparece el motor silencioso de ciclo Otto, cuya denominación se justificaba no por insonoro, más bien porque comparado con el diseño de pistón libre era menos ruidoso.

Un poco antes del descubrimiento del ciclo Otto, el ingeniero sueco Ericsson construyó en Inglaterra un motor de aire de combustión externa que no tuvo aceptación, debido a la falta de materiales capaces de resistir eficazmente las altas temperaturas desarrolladas, y eso fue el fin del motor de gas de combustión externa en aquel tiempo; en la actualidad ha recobrado interés por su baja contaminación y un mejorado rendimiento.

En el resto del siglo XIX hasta la aparición del motor Diesel no se habló más de motores de combustión interna; a partir de la aparición del motor Diesel la máquina de vapor estuvo destinada a desaparecer.

Si la segunda mitad del siglo XVIII y todo el siglo XIX son la era del vapor y del carbón, el siglo XX se convierte en la era del motor de combustión interna y del petróleo, que origina la agudización de la lucha por el predominio económico y político, generando una crisis evidenciada en la cadena de conflictos económicos, políticos y armados desde la Primera Guerra Mundial en 1914 hasta la actualidad.

Las razones del éxito del motor de combustión interna sobre la máquina de vapor son varias: la máquina de vapor como planta de potencia portable es más grande por ser más ineficaz, ya que requiere una cámara de combustión desde donde se transfiere calor al agua que se vaporiza, y luego se transporta a la cámara de expansión donde se realiza trabajo útil.

El motor de combustión interna, en cambio, tiene estos dos elementos sintetizados en uno solo, donde el combustible al quemarse constituye el fluido de trabajo. La combustión se realiza en el mismo recinto donde ocurre la expansión, eliminando la transferencia de calor, con su carácter fuertemente irreversible y por lo tanto nefasto para el rendimiento.

Aunque parezca tener solo un interés teórico, resulta de la mayor importancia práctica. Por ejemplo, una máquina alternativa de vapor es demasiado voluminosa para ser portátil, ya que pesa en promedio unos cincuenta kilos por caballo de potencia generada. Semejante peso no podría ser soportado por ningún vehículo aéreo, de modo que no es posible construir

aviones o helicópteros impulsados por vapor; no es posible tener embarcaciones pequeñas de vapor.

En la actualidad hay dos versiones de motor de combustión interna, que responden a grandes rasgos a las características originales de los motores basados en los ciclos propuestos por Otto y Diesel, pero también hay muchos diseños intermedios que están, en la frontera entre ambas categorías, por ejemplo los motores de ciclo Otto con inyección de combustible.

Dentro de los ciclos de generación de potencia con gases, existe también el ciclo desarrollado por Brayton, un norteamericano que construyó un motor con dos pistones alrededor de 1873, siguiendo el ciclo propuesto por Joule, por lo que también se lo denomina a este ciclo Joule.

El motor de Brayton era muy inferior en eficiencia al motor con Ciclo Otto, que lo desplazó, pero actualmente se emplea el ciclo Brayton en plantas de energía eléctrica a turbina de gas, en vehículos terrestres y aviones, su aplicación no se realiza con pistones sino utilizando turbinas, razón por la cual también se lo denomina ciclo de turbina de gas.

En los motores de encendido a chispa se pueden encontrar dos versiones: de dos y cuatro tiempos. Se denomina tiempos a los desplazamientos del pistón que se requieren para completar un ciclo.

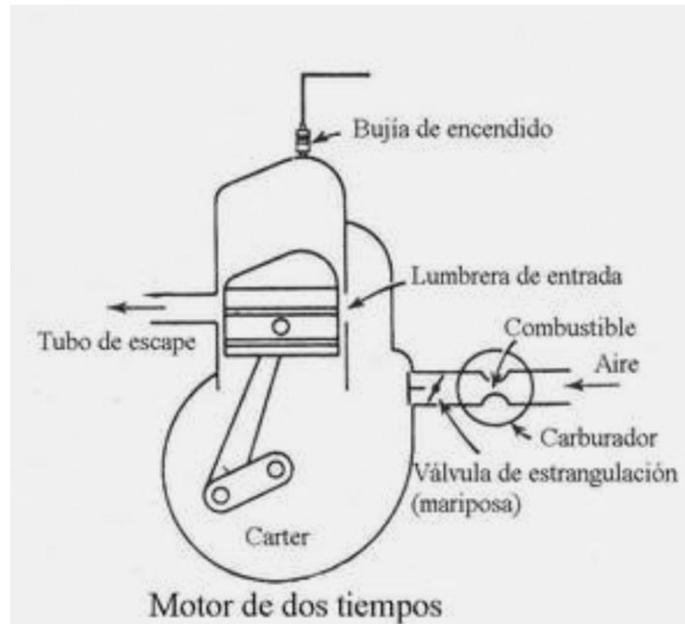
En el motor de dos tiempos la mezcla ingresa al cilindro a través de las lumbreras de admisión. Una vez producida la chispa ocurre la ignición de la mezcla de vapor de combustible y el aire funcionando como comburente, realizándose simultáneamente la expansión de los gases efectuando así el tiempo de expansión o embolada de potencia; finalizada esta, se produce la

admisión de la mezcla que desaloja los gases exhaustos, debido a que en el carter el pistón al bajar durante el tiempo de expansión comprime algo los gases frescos lo que los fuerza a entrar cuando se abren las lumbreras de admisión.

La forma trapezoidal de la culata facilita la expulsión. Luego se inicia el tiempo de compresión. El pistón sube tapando las lumbreras de admisión y escape y lleva la mezcla fresca a la presión adecuada para la explosión. Durante este tiempo el pistón produce al subir una depresión en el depósito de aceite y absorbe mezcla fresca del carburador.

El motor de dos tiempos se caracteriza por una elevada relación de peso sobre la potencia del motor comparado al de cuatro tiempos, porque está dando una embolada de potencia por cada revolución realizada. Al no tener válvulas de escape es imposible impedir las pérdidas de mezcla fresca en la etapa de admisión cuando esta desplaza a los gases exhaustos, lo que inevitablemente hace bajar el rendimiento del combustible y causa el típico olor de estos motores. No obstante, es un motor barato y sencillo, pequeño e ideal para vehículos livianos.

Figura 3. **Motor de combustión interna de dos tiempos**

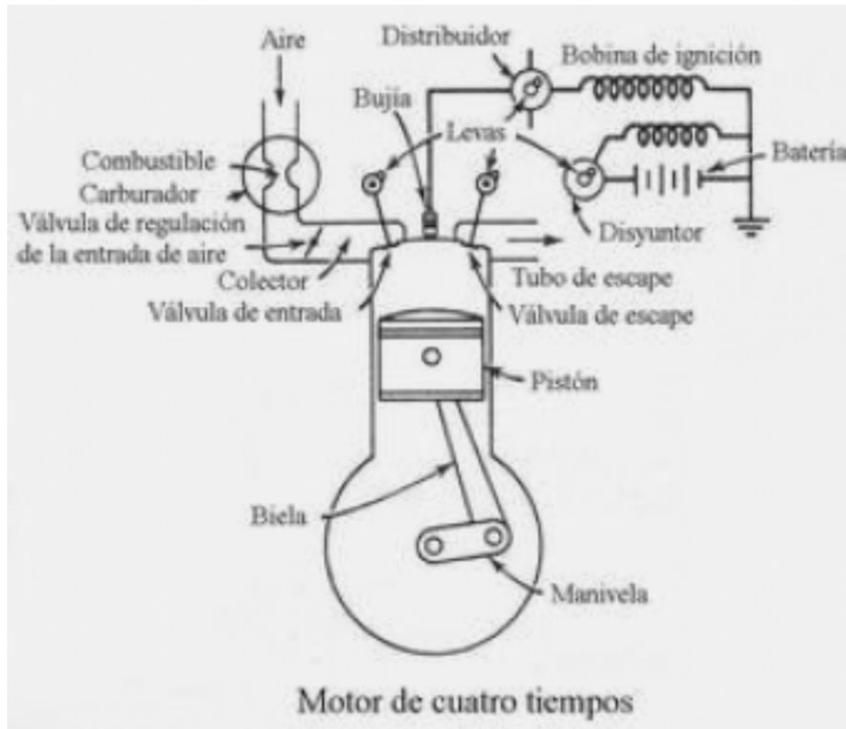


Fuente: RODRÍGUEZ, Jorge. *Introducción a la termodinámica con algunas aplicaciones de ingeniería*. p. 473.

El motor de cuatro tiempos tiene las siguientes etapas: en el tiempo de aspiración el pistón se desplaza hacia abajo con la válvula de admisión abierta y la de escape cerrada. Luego se invierte la dirección y comienza el tiempo de compresión; un poco antes de llegar al punto muerto inferior se cierra la válvula de admisión y la de escape permanece cerrada, quedando así durante el tiempo o carrera de compresión.

Un poco antes del punto muerto superior se produce la ignición con el salto de la chispa, en un instante determinado por el distribuidor de acuerdo a la velocidad del motor, y comienza el tiempo de expansión.

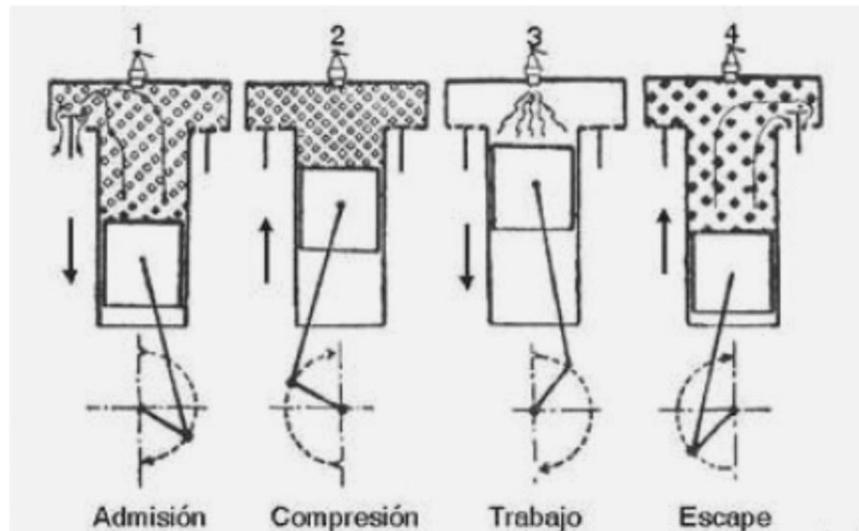
Figura 4. **Motor de combustión interna de cuatro tiempos**



Fuente: RODRÍGUEZ, Jorge. *Introducción a la termodinámica con algunas aplicaciones de ingeniería*. p. 473.

Cuando el pistón se aproxima cerca del punto muerto inferior se abre la válvula de escape y se iguala la presión con la externa. Es entonces cuando se inicia la etapa o tiempo de expulsión al retornar el pistón hacia el punto muerto superior evacuando los gases exhaustos a través de la válvula de escape cuya posición viene determinada por un mecanismo de sincronización denominado árbol de levas completando el ciclo. La siguiente figura muestra los tiempos de un motor de encendido a chispa.

Figura 5. **Ciclo del motor de combustión interna encendido a chispa**



Fuente: RODRÍGUEZ, Jorge. *Introducción a la termodinámica con algunas aplicaciones de ingeniería*. p. 473.

Este tipo de motor fue inventado por Diesel, quien tenía el propósito de emplear como combustible carbón pulverizado, pero al experimentarlo encontró dificultades causadas por la ceniza que deterioraba los cilindros, por lo que pasó al combustible líquido.

En los motores de ignición por chispa eléctrica, si se usa combustible de mala calidad o si el motor está muy desgastado como se suele decir, desajustado o desinflado; sucediendo esto cuando fluye el aceite lubricante a la cámara de combustión produciéndose depósitos de carbón en la parte superior del cilindro que se ponen al rojo a poco de andar, lo que origina la combustión antes de saltar la chispa, de modo que el encendido queda avanzado.

Esto ocurre especialmente en motores de alta relación de compresión en los que la ignición ocurre aproximadamente a 5/8 del total del recorrido de compresión, lo que origina desincronización entre los cilindros, tensiones en el cigüeñal, pérdida de potencia y notable disminución del rendimiento. Externamente se percibe golpeteo, una vibración anormal, pistoneo, el motor no se detiene con el corte de corriente eléctrica sino que continúa andando un rato.

El combustible de un motor de encendido por chispa eléctrica, debe entonces ser muy resistente a la autoignición; la capacidad de resistencia a la autoignición se mide por el índice de octano. Cuanto mayor es el índice de octano de un combustible tanto mejor se comporta en un motor de encendido eléctrico, en particular los motores modernos de elevada relación de compresión y alta velocidad que requieren un combustible de mayor octanaje que los motores más grandes y lentos.

Esta característica debe ser totalmente la opuesta en un combustible para motores de autoignición, en los que la facilidad de encenderse espontáneamente por compresión es esencial. Esto se mide por el índice de cetano y cuanto mayor sea este mayor es el rendimiento y mejor el funcionamiento de un motor de autoencendido.

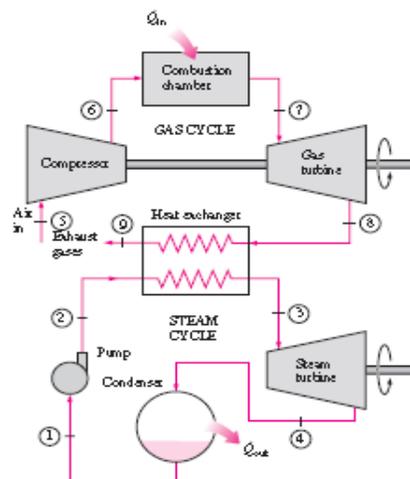
2.1.3. Generación energética combinada de vapor y gas

La sustancia de trabajo usada en casi todos los sistemas de vapor para generar energía es el vapor de agua. La principal razón es económica, al ser el agua la sustancia más fácil de obtener en grandes cantidades con un razonable grado de pureza. Sin embargo, el vapor de agua está muy lejos de ser la sustancia ideal. Se ha gastado una considerable cantidad de tiempo y dinero

en investigar posibles alternativas, en busca de una sustancia más adecuada que permita mejorar el rendimiento del ciclo de Rankine para acercarlo más al del ciclo de Carnot, sin tener que recurrir a complejos sistemas como el ciclo regenerativo.

Entre otros, se recurrió al mercurio como fluido de trabajo, pero existen varios problemas con esta sustancia. En primer lugar el precio, ya que es muy caro, y en segundo lugar el hecho de que sus vapores son sumamente tóxicos. No obstante, las experiencias realizadas con mercurio despertaron interés en los ciclos binarios. Un ciclo binario es un sistema que usa dos fluidos de trabajo, por ejemplo mercurio y agua. Este sistema consiste en realidad de dos ciclos separados, uno que usa mercurio y el otro que usa agua como fluido de trabajo.

Figura 6. **Ciclo combinado de gas y vapor**



Fuente: CENGEL, Yunus. *Termodinámica*. p. 592.

2.2. Definición de sistemas de transferencia energética utilizando fuentes alternas renovables

A continuación se presenta la definición de energía eólica, hidráulica, generada por biomasa, mareomotriz, entre otras.

2.2.1. Energía eólica

Es el tipo de energía producida por el viento, dentro de sus características se puede mencionar que no es constante y tiene dificultad para ser concentrada. La transferencia energética se realiza a dispositivos que transforman energía generada por la velocidad del viento a diversas formas de energía mecánica o energía eléctrica.

Los movimientos de masas de aire en la atmósfera, son generados por diferencias en temperaturas debido al diferencial de calentamiento solar; lo que hace que la energía del viento sea una forma de energía solar.

El aprovechamiento de la energía del viento o energía eólica, para la producción de electricidad es la tecnología de energía renovable que más ha crecido en los últimos veinte años, con porcentajes de crecimiento del 40 % por año desde 1993, la capacidad instalada actualmente en todo el mundo se estima en 18 000 MW.

Las turbinas utilizadas actualmente para generar energía con el viento son muy confiables, con factores de disponibilidad de más del 98 %. Esto significa que son operacionales durante más de ese porcentaje de tiempo en un año. Además, las turbinas solo requieren mantenimiento cada 6 meses.

Para la generación de electricidad se han construido parques eólicos, los cuales consisten en varias turbinas en un mismo sitio, donde las turbinas y vías de acceso ocupan menos que 1 % del terreno. El resto del terreno se puede utilizar para agricultura u otros usos.

La energía eólica tiene una gran desventaja, la variabilidad del viento, tanto en la turbulencia de la dirección como en la velocidad, con variaciones en un período de unos 10 minutos y variaciones diarias, mensuales y anuales. Este tiene un impacto en la calidad de la electricidad que se pueda producir con la energía eólica. Sin embargo, turbinas modernas son diseñadas específicamente para manejar estas variaciones y producir electricidad de forma constante, con mecanismos que controlan el nivel de aprovechamiento de la energía en el viento.

2.2.2. Energía hidráulica

La energía hidráulica está regida por el ciclo hidrológico, la energía solar produce la evaporación de fuentes acuíferas de gran magnitud localizadas en los océanos, este vapor producido se condensa y se distribuye posteriormente en forma de lluvia, aportando agua líquida a los ríos que a su vez aportan agua de nuevo a los océanos.

Al utilizar una fuente energética hidráulica los principales factores a tomar en cuenta son, el caudal que puede aportar la fuente de generación y la diferencia de altura entre la fuente y punto de interés a generar el servicio específico a utilizar.

Las cuencas fluviales se encargan de concentrar este tipo de energía; si el río de donde se extrae el agua atraviesa un desnivel es posible su utilización, ya

sea por caudal directo o mediante la construcción de represas para la captación del embalse de agua, su almacenamiento y su aporte de energía transformada en algún momento.

Para la generación de hidroelectricidad se plantea el proceso que se describe a continuación; la fuerza del agua se transforma en energía mecánica al mover las aspas de una turbina en una central hidroeléctrica, donde se transforma en energía eléctrica.

Las presas hidráulicas se destinan a la producción de energía eléctrica o energía mecánica como el caso de beneficios de café y aserraderos de países del norte. Una central hidroeléctrica consta de las siguientes partes:

El embalse es el lugar donde se almacena el agua captada desde un río. Además regula el caudal del río, una presa está constituida fundamentalmente por un muro grueso cuya función es retener el agua del embalse; además de poseer componentes como los aliviaderos, siendo estas salidas de agua que sirven para regular el volumen de agua almacenada.

Se debe tener en el sistema tuberías forzadas que enlazan el embalse con la sala de máquinas, y soporta gran presión. El canal de descarga es el que se redistribuye el agua al río.

La sala de máquinas es la edificación donde se sitúan: los elementos y máquinas que transforman la energía hidráulica en eléctrica; las turbinas son máquinas en las que se transforma energía cinética del agua en energía de rotación.

Generador-alternador: dispositivo unido a la turbina que convierte la energía de rotación en energía eléctrica. El transformador, como su nombre lo indica transforma la energía que se produce en el generador en una corriente de baja intensidad, para transportarla a largas distancias de la central.

2.2.3. Energía generada con biomasa

El término biomasa se refiere a toda la materia orgánica que proviene de árboles, plantas y desechos de animales que pueden ser convertidos en energía; o las provenientes de la agricultura, del aserradero y de los residuos urbanos como aguas negras, basura orgánica y otros.

Esta es la fuente de energía renovable más antigua conocida por el ser humano, pues ha sido usada desde que descubrieron la utilización del fuego.

Los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de procesos más eficientes y limpios para la conversión de biomasa en energía; un proceso común es la transformación en combustibles líquidos y gaseosos, los cuáles son más convenientes y eficientes. Así aparte de la combustión directa, se pueden distinguir otros dos tipos de procesos: el termoquímico y el bioquímico.

Las fuentes más importantes de biomasa son los campos forestales y agrícolas, pues en ellos se producen residuos que normalmente son dejados en el campo al consumirse, solo un bajo porcentaje de ellos con fines energéticos.

En la agroindustria se realizan procesos de secado de granos que generan subproductos usados en la generación de calor, para sistemas de

combustión directa; entre los cuales se puede mencionar el caso del bagazo de caña de azúcar, la cascarilla de café y la de arroz.

Por otro lado, los centros urbanos generan grandes cantidades de basura compuestas en gran parte, por materia orgánica que puede ser convertida en energía, después de procesarla adecuadamente.

Actualmente, los procesos modernos de conversión solamente suplen un estimado del 3 % en el consumo de energía primaria en países industrializados. Sin embargo, gran parte de la población rural en los países subdesarrollados que representa cerca del 50 % de la población mundial, aún depende de la biomasa tradicional, principalmente de leña, como fuente de energía primaria; esta suple, aproximadamente, 35 % del consumo de energía primaria en países subdesarrollados y alcanza un 14 % del total de la energía consumida en el nivel mundial.

Recientemente se han desarrollado grandes plantaciones de árboles y plantas cultivadas con el objetivo de producir energía. Para ello se seleccionan árboles o plantas de crecimiento rápido y bajo mantenimiento, las cuales usualmente se cultivan en tierras de bajo valor productivo. Su período de cosecha varía entre los tres y los diez años.

Existen también muchos cultivos agrícolas que pueden ser utilizados para la generación de energía: caña de azúcar, maíz, sorgo y trigo. Igualmente, se pueden usar plantas oleaginosas como palma de aceite, girasol o soya y algunas plantas acuáticas como jacinto de agua o las algas, para producir combustibles líquidos como el etanol y el biodiesel.

Otra de las formas de obtención de energía por biomasa es a través de la utilización de desechos vegetales durante los procesos de preparación de los alimentos, los cuales pueden ser transformados usando un biodigestor, que descompone la materia sólida obtenida en gas, para ser usado posteriormente en la cocinas como alternativa al gas propano.

2.2.4. Energía mareomotriz

La energía solar que incide anualmente sobre la superficie terrestre es del orden de $6E14$ MW/hora. Los océanos, con una superficie de alrededor de $361\ 000\ 000$ de km^2 y un volumen de $1\ 370$ km^3 , actúan como sistemas colectores y de almacenamiento, lo cual se manifiesta de diversas formas.

Estas formas pueden ser; olas que generan transferencia de energía eólica, gradientes térmicos, gradientes salinos y corrientes marinas que transfieren energía solar maremotérmica, las más estudiadas son las debidas a las mareas, olas y térmica marina, estando las de las corrientes y gradientes salinos mucho menos desarrolladas.

A estas formas de energía hay que sumar la transferencia producida por las mareas denominada energía mareomotriz, debida a la atracción gravitatoria de la Luna y el Sol, y a la rotación de la Tierra, $3E6$ MW.

La marea es la fluctuación periódica del nivel de los océanos, debida principalmente a la atracción gravitatoria de la Luna y en menor cuantía del Sol, la Luna ejerce una atracción correspondiente a 2,2 veces la del Sol, y al movimiento de rotación de la Tierra, siendo conocido este fenómeno como aceleración de Coriolis; otros factores son la forma y fisionomía del relieve de las costas y del fondo, los fenómenos meteorológicos, etc.

La aceleración que produce el efecto de marea aumenta con la masa y disminuye con el cubo de la distancia. Con relación a la Tierra, y teniendo en cuenta las distancias y las masas, solo el Sol y la Luna son capaces de producir mareas apreciables; el Sol, más distante, influye por su masa; la Luna, de masa mucho menor, por su proximidad a la Tierra.

2.2.5. Energía termosolar

Los sistemas de energía termosolar; consisten en el equipo y accesorios necesarios para atrapar el calor del Sol y utilizarlo para calentar líquidos o climatización.

En los sistemas pasivos de energía solar, los edificios son diseñados de manera que se logre captar calor durante las horas de luz solar y liberarlo gradualmente en las horas de oscuridad. La energía del Sol se puede captar con una forma adecuada en la construcción; hay que mencionar sin embargo, que la gran desventaja que tienen estos sistemas es la falta de posibilidades para almacenar calor a largo plazo, ni permiten un control automático de calor en edificios con estos sistemas.

Este documento se refiere precisamente a los componentes para instalaciones de sistemas energéticos termosolares activos, siendo esta una importante área de aplicación en la ingeniería mecánica.

La primera manera desarrollada y la más sencilla de calentar líquidos por medio de la energía solar ha sido utilizando un “calentador de azotea, de tambor o almohadilla”; este dispositivo consiste en un recipiente expuesto al Sol en un lugar de mayor altura al que aquel en donde se utilicen los líquidos. El recipiente se llena de agua durante las primeras horas del día, en horas de la

tarde el agua ha recogido el calor suficiente para ser utilizada como agua caliente.

Los colectores o captadores de energía solar han ido evolucionando así como las formas de almacenamiento de líquidos calientes; se logró desarrollar un circuito donde se capta el agua y se almacena la energía, además de contar con una purga de aire, a medida que el Sol calienta el agua del colector se vuelve más ligera y fluye hacia el recipiente de almacenamiento; este es un circuito de convección natural y es denominado “circuito de termosifón”.

La energía solar puede ser utilizada para procesos de refrigeración y calefacción, utilizando una bomba de calor como calentador auxiliar, debiendo mencionarse que este sistema está más difundido en países y regiones con temperaturas extremas.

La bomba de calor logra la energía durante el invierno y funcionar con fines de refrigeración durante el verano; otra de las opciones para estos procesos son los enfriadores de absorción que operan directamente con el tanque de almacenamiento de energía solar.

2.2.6. Energía solar fotovoltaica

Este tipo de energía corresponde a un sistema directo de conversión energética, ya que los fotones producidos por la radiación solar interactúan directamente sobre los electrones del captador fotovoltaico, a través de esto se logra el efecto fotoeléctrico generando corriente eléctrica.

Como componente básico el sistema posee la célula solar, a partir de la célula solar se construyen los paneles o módulos solares, que proporcionan

corriente eléctrica cuyo valor depende de la energía solar con incidencia en la superficie del panel.

A través de un conjunto de componentes complementarios se acumula energía eléctrica utilizada posteriormente a su obtención, utilizando energía solar fotovoltaica es posible dimensionar instalaciones para generar energía eléctrica en corriente directa, corriente alterna o en ambos modos.

Las principales aplicaciones de la generación eléctrica utilizando energía solar fotovoltaica son: electrificación rural principalmente en viviendas fuera del alcance de líneas de distribución, iluminación de invernaderos y granjas, bombeo de agua, sistemas de riego, alimentación de sistemas de repetidoras para telefonía, radio o televisión.

3. CARACTERÍSTICAS DE GENERACIÓN ENERGÉTICA APLICADAS EN PROCESOS TERMOSOLARES Y FOTOVOLTAICOS

3.1. Clasificación de los sistemas de energía termosolar

El aprovechamiento de la energía captada mediante la radiación solar, es clasificado según su finalidad por dos procedimientos, que pueden ser procedimiento pasivo y procedimiento activo.

El procedimiento pasivo corresponde a la climatización de espacios habilitados sin que existan o intervengan componentes de instalaciones termosolares específicos. Esto se refiere comúnmente en modo arquitectónico a edificios proyectados y construidos de manera que se obtenga el máximo aprovechamiento energético.

Los sistemas de energía termosolar activa corresponden a instalaciones de elementos materiales para la captación, almacenamiento y distribución de la energía obtenida a partir de la transferencia por radiación solar, con diversidad de aplicaciones descritas posteriormente.

Los tres procesos básicos que implica el aprovechamiento de las instalaciones de energía termosolar activa se describen a continuación:

- Captación de radiación solar, a través de un dispositivo de captación o colector solar que elevara la temperatura del fluido que circula en su interior.

- Almacenamiento del fluido calentado para ser utilizado en momentos requeridos para la aplicación determinada.
- Incorporación de dispositivos y medios de apoyo para mantener las condiciones de temperatura que requiere el fluido que ha sido almacenado y será utilizado cuando el sistema de transferencia está inactivo.

3.1.1. Energía termosolar a temperatura baja

Las instalaciones termosolares a temperatura baja son las que emplean la radiación del Sol para obtener agua caliente para uso sanitario y en climatización. La temperatura máxima de operación alcanza el rango de los 90 °C.

La aplicación de estos sistemas se realiza en sectores residenciales, hoteleros, hospitalarios y deportivos; siendo estos sectores los que requieren mayormente de agua caliente para uso sanitario, climatización interna de recintos en forma parcial o total o bien adecuación climática de instalaciones deportivas.

3.1.2. Energía termosolar a temperatura media

En general las instalaciones de energía termosolar a temperatura media son utilizadas en procesos industriales como por ejemplo la desalinización del agua de mar y en procesos de refrigeración. La temperatura de operación para estos sistemas está comprendida entre 80 °C y 250 °C

3.1.3. Energía termosolar a temperatura alta

Los sistemas de energía termosolar a temperatura alta son aplicados industrialmente en la generación de vapor para producción de energía eléctrica y procesos similares, su rango de temperatura de operación es superior a los 250 °C.

3.2. Principios termodinámicos aplicados en los sistemas de energía solar

A continuación se explica como la radiación puede propagarse en el espacio.

3.2.1. Radiación solar en la superficie terrestre

Desde el punto de vista energético, la masa solar que por segundo se irradia al espacio en forma de partículas de alta energía y de radiación electromagnética es aproximadamente de $5,6E35$ GV, la Tierra recibe en el exterior de su atmósfera un total de $1,73E14$ Kw, o sea $1\ 353$ Kw/m², que se conoce como constante solar y cuyo valor fluctúa en un $\pm 3\%$ debido a la variación periódica de la distancia entre la Tierra y el Sol.

La atmósfera y la superficie terrestre se encuentran a temperaturas medias distintas y, por lo tanto, también radian energía; así, la longitud de onda de la radiación solar está comprendida entre $0,05\ \mu\text{m}$ y $4\ \mu\text{m}$, mientras que la radiación terrestre lo está entre $3\ \mu\text{m}$ y $80\ \mu\text{m}$, es decir, se trata de emisiones de onda larga.

Los $1,73E14$ Kw de energía solar que inciden sobre la Tierra, se distribuyen en la siguiente forma:

Energía reflejada por la atmósfera hacia el espacio exterior correspondiente al 30 %, y con valor estimado de $0,52.E14$ Kw.

La energía solar que se utiliza en calentamiento de la atmósfera, correspondiente al 47 %, y con un valor estimado de $0,80E14$ Kw.

Una parte de energía solar que se utiliza en la evaporación de los océanos, correspondiente al 23 %, y con valor estimado de $0,40.E14$ Kw.

La energía solar que genera perturbaciones atmosféricas, como el viento, utilizada como energía mecánica estimada alrededor de $0,0037E14$ Kw.

La porción de energía utilizada en la fotosíntesis, aproximadamente con valor estimado de $0,0004E14$ Kw.

De todo lo anterior, solo el 47 % de la energía solar incidente alcanza la superficie terrestre, de forma que el 31 % lo hace directamente y el otro 16 % después de ser difundida por el polvo, vapor de agua y moléculas de aire.

El 53 % de la energía restante no alcanza la superficie de la Tierra, ya que un 2 % es absorbida por la estratósfera, principalmente por el ozono, el 15 % por componentes de la tropósfera, agua, ozono y nubes, en total de 17 % y por otra parte, un 23 % es reflejada por las nubes, un 7 % es reflejada por el suelo y el 6 % restante corresponde a aquella energía difundida por la atmósfera que se dirige hacia el cielo.

El conjunto de radiaciones electromagnéticas constituyen la radiación solar emitidas por el Sol. Considerando que el Sol se comporta prácticamente como un cuerpo negro que emite energía, siguiendo la Ley de Planck a una temperatura de unos 6 000 °K.

La intensidad de la radiación solar se distribuye desde el infrarrojo hasta el ultravioleta; no toda la radiación alcanza la superficie de la Tierra, porque las ondas ultravioletas más cortas, son absorbidas por los gases de la atmósfera, fundamentalmente por el ozono.

La magnitud que mide la radiación solar que llega a la Tierra es la irradiancia, que mide la cantidad de energía recibida por unidad de tiempo y área, que alcanza a la Tierra; su unidad para el sistema internacional es el watt por metro cuadrado en forma abreviada W/m^2 .

Hay una parte de energía recibida del Sol, que al atravesar la atmósfera de la Tierra calienta el vapor de agua en unas zonas de la atmosfera más que otras, provocando alteraciones en la densidad de los gases y, por consiguiente desequilibrios que causan la circulación atmosférica.

Esta energía produce la temperatura en la superficie terrestre y el efecto de la atmósfera es aumentarla por efecto invernadero, y mitigar la diferencia de temperaturas entre el día y la noche así como entre los polos y el ecuador.

La mayor parte de la energía utilizada por los seres vivos procede del Sol, las plantas la absorben directamente y realizan la fotosíntesis, en el caso de los animales herbívoros absorben indirectamente una pequeña cantidad de esta energía comiendo las plantas, y los animales carnívoros absorben indirectamente una cantidad más pequeña comiendo a los herbívoros.

La mayoría de las fuentes de energía usadas por el hombre derivan indirectamente del Sol, ya que el Sol puede a través de toda su radiación lanzada ser aprovechada como energía para los humanos.

Los combustibles fósiles preservan energía solar capturada hace millones de años mediante fotosíntesis, la energía hidroeléctrica usa la energía potencial del agua que se condensó en altura después de haberse evaporado por el calor del Sol, etc.

En función de cómo reciben la radiación solar los objetos situados en la superficie terrestre, se pueden distinguir estos tipos de radiación.

3.2.1.1. Radiación directa

Es aquella que llega directamente del Sol sin haber sufrido cambio alguno en su dirección. Este tipo de radiación se caracteriza por proyectar una sombra definida de los objetos opacos que la interceptan.

3.2.1.2. Radiación difusa

Parte de la radiación que atraviesa la atmósfera es reflejada por las nubes o absorbida por estas. Esta radiación, que se denomina difusa, va en todas direcciones, como consecuencia de las reflexiones y absorciones, no solo de las nubes sino de las partículas de polvo atmosférico, montañas, árboles, edificios, el propio suelo, etc.

Este tipo de radiación se caracteriza por no producir sombra alguna respecto a los objetos opacos interpuestos. Las superficies horizontales son las

que más radiación difusa reciben, ya que ven toda la bóveda celeste, mientras que las verticales reciben menos porque solo ven la mitad.

3.2.1.3. Radiación reflejada

La radiación reflejada es, como su nombre indica, aquella reflejada por la superficie terrestre. La cantidad de radiación depende del coeficiente de reflexión de la superficie, también llamado albedo.

Las superficies horizontales no reciben ninguna radiación reflejada, porque no ven ninguna superficie terrestre y las superficies verticales son las que más radiación reflejada reciben.

3.2.1.4. Radiación global

Es la radiación total, constituida por la suma de las tres radiaciones anteriores (directa, difusa, reflejada). En un día despejado, con cielo limpio, la radiación directa es preponderante sobre la radiación difusa.

Por el contrario, en un día nublado no existe radiación directa y la totalidad de la radiación que incide es difusa.

Los distintos tipos de colectores solares aprovechan de forma distinta la radiación solar. Los colectores solares planos, por ejemplo, captan la radiación total constituida por la radiación directa y la radiación difusa, sin embargo, los colectores de concentración solo captan la radiación directa.

Por esta razón, los colectores de concentración suelen situarse en zonas de muy poca nubosidad y con pocas brumas, en el interior, alejadas de las costas.

3.2.1.5. Radiación ultravioleta

La radiación ultravioleta tiene menor longitud de onda (360 nm), lleva mucha energía e interfiere con los enlaces moleculares. Especialmente las de menos de 300 nm que pueden alterar las moléculas de ácido desoxirribonucleico (ADN), muy importantes para la vida. Estas ondas son absorbidas por la parte alta de la atmósfera, especialmente por la capa de ozono. Es importante protegerse de este tipo de radiación ya que por su acción sobre el ADN está asociada con el cáncer de piel.

Solo las nubes tipo cúmulos de gran desarrollo vertical atenúan estas radiaciones prácticamente a cero. El resto de las formaciones tales como cirrus, estratos y cúmulos de poco desarrollo vertical no las atenúan, por lo cual es importante la protección aun en días nublados.

Es importante tener especial cuidado cuando se desarrollan nubes cúmulos, ya que estas pueden llegar a actuar como espejos y difusores e incrementar las intensidades de los rayos ultravioleta y por consiguiente el riesgo solar. Algunas nubes tenues pueden tener el efecto de lupa, proyectando el calor que absorben y llegando a provocar daños.

3.2.1.6. Luz visible

La radiación correspondiente a la zona visible cuya longitud de onda está entre 360 nm para color violeta y 760 nm para color rojo, por la energía que lleva, tiene gran influencia en los seres vivos. La luz visible atraviesa con bastante eficacia la atmósfera limpia, pero cuando hay nubes o masas de polvo parte de ella es absorbida o reflejada.

3.2.1.7. Radiación infrarroja

Radiación infrarroja es la que tiene más de 760 nm, corresponde a longitudes de onda más largas y lleva poca energía asociada, el efecto de esta aumenta la agitación de las moléculas, provocando el aumento de la temperatura. El CO₂, el vapor de agua y las pequeñas gotas de agua que forman las nubes absorben con mucha intensidad las radiaciones infrarrojas.

La atmósfera se desempeña como un filtro ya que mediante sus diferentes capas distribuyen la energía solar, para que a la superficie terrestre solo llegue una pequeña parte de esa energía. La parte externa de la atmósfera absorbe parte de las radiaciones reflejando el resto directamente al espacio exterior, mientras que otras pasarán a la Tierra y luego serán irradiadas. Esto produce el denominado balance térmico, cuyo resultado es el ciclo del equilibrio radiante.

Tabla II. **Radiación recibida y absorbida por la Tierra**

RADIACIÓN RECIBIDA POR LA TIERRA	porcentaje	Radiación absorbida por la tierra	porcentaje
Directa a la tierra	26 %	Por la atmósfera	16 %
Indirecta a la tierra	11 %	Por las nubes	2 %
Difusa a la tierra	14 %	Por ozono y diversos gases	1 %
Pérdida de radiación por reflexión	4 %		
Total de radiación	47 %		19 %

Fuente: FERNÁNDEZ DIEZ, Pedro. *Procesos termosolares a baja, mediana y alta temperatura*. p. I-1.

Tabla III. **Energía solar reflejada**

ENERGÍA SOLAR REFLEJADA	porcentaje
Radiación reflejada por los materiales terrestres indirectamente	10 %
Radiación reflejada por las nubes (directamente)	24 %
Total	34 %

Fuente: FERNÁNDEZ DIEZ, Pedro. *Procesos termosolares a baja, mediana y alta temperatura*. p. I-1.

3.2.2. **Distribución de la energía solar y la temperatura en Guatemala**

Las temperaturas máximas, medias y mínimas registradas por el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), se encuentran en la siguiente tabla, donde se describe una estación por cada departamento de la República de Guatemala.

Tabla IV. Temperaturas máximas, medias y mínimas en la República de Guatemala

Temperaturas máxima, media y mínima (grados centígrados)			
ESTACIÓN	t max	t prom	t min
Cobán, Alta Verapaz	24.5	17.4	13.0
San Jerónimo, Baja Verapaz	28.4	21.1	15.2
Santa Cruz, Chimaltenango	22	16.4	10.1
Esquipulas, Chiquimula	27.8	21.6	17.3
Sabana Grande, Escuintla	29.6	24.7	18.5
Ciudad de Guatemala	25.0	18.4	14.3
Huehuetenango, Huehuetenango	25.4	16.9	9.9
Puerto Barrios, Izabal	29.3	25.5	21.4
Monjas, Jalapa	28.7	22.1	15.6
Asunción Mita, Jutiapa	32.8	26.0	20.9
Sayaxché, Petén	31.4	24.6	19.8
Morazán, El Progreso	34.6	27.5	19.8
Olintepeque, Quetzaltenango	21.7	13.6	5.8
Chichicastenango, Quiché	21.7	15.5	9.8
Rethaluleu, Rethaluleu	33.5	26.8	21.2
San Lucas Sacatepéquez, Sacatepéquez	18.5	11.8	6.9
San Marcos, San Marcos	20.0	13.8	6.0
Cuilapa, Santa Rosa	30.7	23.2	16.4
Santiago Atitlán, Sololá	24.4	18.7	12.4
San Juan, Suchitepéquez	29.2	23.9	19.6
Santa Lucía, Totonicapán	26.6	18.7	10.7
Estanzuela, Zacapa	34.4	27.4	21.2

Fuente: Insivumeh.

En la siguiente tabla se encuentran los datos obtenidos en la Estación Central del INSIVUMEH, única estación de esta institución que registra la medición de la radiación solar, se aportan estos datos de medición de la radiación solar mensual y anual desde 1990 hasta 2010.

Tabla V. Índice de radiación solar en la República de Guatemala

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROM
1995	0.21	0.26	0.28	0.28	0.28	0.45	0.42	0.34	0.28	0.37	0.38	0.34	0.32
1996	0.37	0.46	0.49	0.46	0.46	0.43	0.43	0.48	0.43	0.40	0.39	0.37	0.43
1997	0.40	0.5	0.47	0.42	0.43	0.32	0.39	0.39	0.37	0.31	0.31	0.29	0.38
1998	0.31	0.35	0.37	0.37	0.32	0.35	0.32	0.33	0.32	0.30	0.29	0.32	0.33
1999	0.3	0.37	0.35	0.35	0.33	0.28	0.34	0.34	0.25	0.32	0.29	0.35	0.32
2000	0.37	0.36	0.37	0.36	0.29	0.37	0.30	0.32	0.30	0.34	0.31	0.32	0.33
2001	0.33	0.30	0.32	0.26	0.28	0.35	0.38	0.53	0.36	0.39	0.34	0.30	0.35
2002	0.35	0.37	0.40	0.43	0.35	0.37	0.33	0.32	0.28	0.31	0.34	0.33	0.35
2003	0.41	0.38	0.31	0.36	0.3	0.31	0.37	0.31	0.35	0.35	0.44	0.45	0.36
2004	0.47	0.53	0.55	0.59	0.47	0.48	0.51	0.53	0.51	0.50	0.47	0.50	0.51
2005	0.52	0.57	0.55	0.55	0.47	0.49	0.47	0.45	0.40	0.42	0.50	0.49	0.49
2006	0.53	0.52	0.58	0.56	0.47	0.38	----	0.47	0.50	0.47	0.47	0.51	0.50
2007	-----	0.55	0.56	0.58	0.50	0.50	0.50	0.40	0.40	0.40	0.50	0.40	0.44
2008	0.50	0.60	0.50	0.60	0.50	0.50	0.40	0.50	0.40	0.50	0.50	0.40	0.53
2009	0.50	0.50	0.46	0.42	0.50	0.50	0.40	0.38	0.39	0.38	0.35	0.34	0.41
2010	0.41	0.39	0.41	0.36	0.36	0.36	0.39	0.48	0.40	0.48	0.40	0.46	0.41

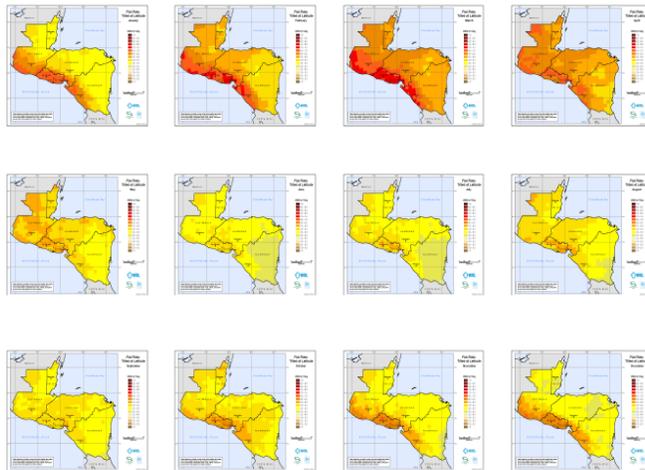
Fuente: Insivumeh

Entre los esfuerzos por realizar la medición de las propiedades físicas climatológicas se han elaborado mapas de distribución de radiación solar y temperatura entre otras variables, para toda la región centroamericana. La herramienta geoespacial Toolkit⁴ fue desarrollada dentro del proyecto denominado Solar and Wind Energy Resource Assesment (SWERA), con esta herramienta es posible conocer la capacidad del potencial eólico y solar, entre otros usos disponibles para los países de Centroamérica; las características más importantes con las que cuenta esta herramienta son:

⁴Software de información geoespacial climática desarrollado por SWERA.

- Potencial eólico y solar de Guatemala, El Salvador, Honduras y Nicaragua.
- Es posible realizar un análisis básico con el objetivo de selección de sitios para un aprovechamiento y optimización de energía solar y eólica.
- Identifica lugares con valores anuales promedio respecto a velocidad del viento, ayudando con esto en la decisión respecto a la ubicación de proyectos de energía eléctrica, bombeo de agua.
- Al estar constituido como un sistema de información geográfica, a través de esta herramienta se obtienen datos acerca de elevaciones de sitios específicos, límites municipales, áreas protegidas, líneas de transmisión, puertos, aeropuertos, carreteras, distribución de población, etc.

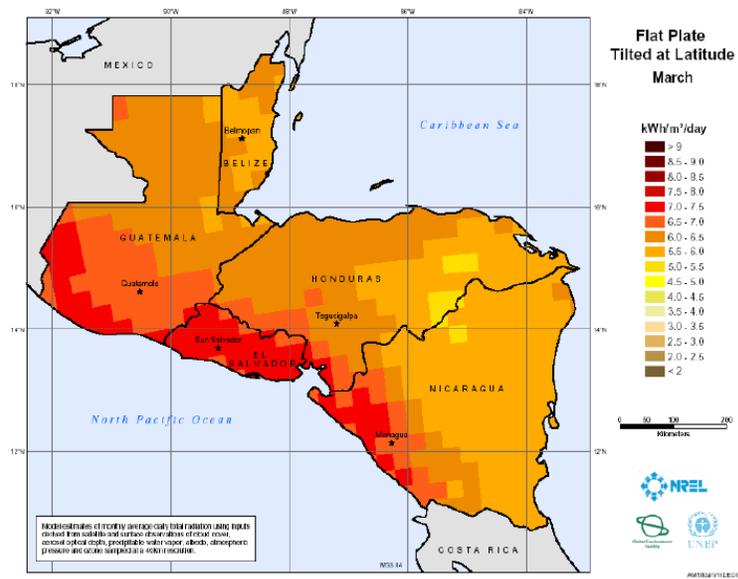
Tabla VI. **Datos de radiación solar expresados en promedio mensual para Guatemala, Belice, El Salvador, Honduras, Nicaragua**



Fuente: Solar and Wind Energy Resource Assesment (SWERA).

De acuerdo a la tabla VI se puede observar una utilidad de la energía por radiación solar mayormente entre noviembre a abril, teniendo entre estos los rangos de radiación solar más altos.

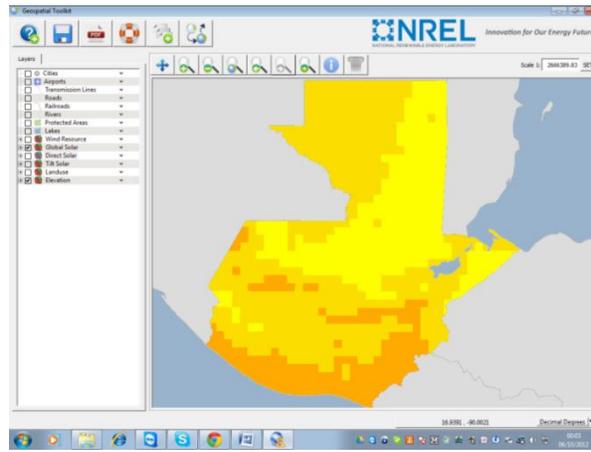
Figura 7. Valores de radiación solar para Guatemala, Belice, El Salvador, Honduras, Nicaragua; correspondiente al promedio de marzo de 2013



Fuente: Solar and Wind Energy Resource Assesment (SWERA).

En la figura 7 se puede observar la distribución geográfica en Centroamérica de la radiación solar de acuerdo a las mediciones realizadas en promedio mensual por Swera, para marzo en particular siendo este mes el que registra los valores más elevados de radiación solar en todo el año.

Figura 8. **Ejemplo de una proyección instantánea para consultar valores de radiación**



Fuente: Solar and Wind Energy Resource Assesment (SWERA).

3.2.3. Propiedades físicas y mecánicas de materiales utilizados en procesos termosolares

A continuación se presentan propiedades de los materiales, tales como: captación, emisión, reflectancia, entre otras.

3.2.3.1. Parámetros de captación, emisión y reflectancia

Los principales parámetros de captación, emisión y reflectancia que influyen en los sistemas energéticos solares son los que se describen a continuación.

La absorptancia direccional monocromática se define como la fracción de energía incidente en la dirección respectiva a la longitud de onda que se absorbe por la superficie.

Absortancia direccional es la cantidad de energía incidente que proviene de una dirección determinada, e incluye todas las longitudes de onda; esta no es una propiedad de la superficie, más bien es una función de distribución de las longitudes de onda de la radiación incidente.

Absortancia hemisférica monocromática es la fracción de energía incidente que proviene de todas las direcciones y que se absorbe en una longitud de onda determinada; no es una propiedad de la superficie, sino una función de distribución de las longitudes de onda de la radiación incidente; viene dada en la siguiente forma:

La absorptancia hemisférica incluye todas las direcciones y todas las longitudes de onda.

La emitancia direccional monocromática de una superficie, es la relación entre la intensidad monocromática emitida por una superficie en una dirección determinada y que representa la intensidad monocromática que un cuerpo negro emitiría a la misma temperatura, siendo esta una propiedad de la superficie.

La emitancia direccional, es una propiedad de la superficie y se define como la relación entre la intensidad total emitida en la dirección dada y la intensidad del cuerpo negro.

Dentro de las características de radiación de materiales opacos se debe considerar los siguientes aspectos:

La reflexión en superficies, considerando la distribución espacial de la radiación reflejada por una superficie; si la radiación incidente tiene la forma de un haz estrecho, existen dos tipos de distribución de la radiación reflejada, que son la especular y la difusa, descritas a continuación.

- La reflexión especular es idéntica a la reflexión en un espejo, es decir, el ángulo incidente y el reflejado son iguales, estando contenidos, junto con la normal al espejo, en un mismo plano.
- La reflexión difusa elimina todas las características de la radiación incidente, distribuyendo la radiación uniformemente en todas direcciones.
- La reflexión general participa de los dos tipos de reflexión, con direcciones en que esta es más intensa que en otras.

En general, la magnitud de la intensidad reflejada en una dirección determinada para una superficie dada es función de la longitud de onda y de la distribución espacial de la radiación incidente.

La energía incidente comprendida en el ángulo sólido se puede reflejar en todas direcciones, por lo que la intensidad reflejada en una determinada dirección será muy pequeña en comparación con la intensidad incidente.

El producto de la intensidad incidente por su ángulo sólido y por el coseno del ángulo cenital, comprendido entre la normal y la dirección de los rayos solares incidentes, permite obtener el flujo solar radiante incidente, que debe

tener un valor del mismo orden de magnitud que la intensidad reflejada. La intensidad reflejada es el cociente entre la energía reflejada en cada dirección y el ángulo sólido reflejado correspondiente.

Existen dos tipos de reflectancia hemisférica:

- Reflectancia angular hemisférica monocromática se tiene cuando un haz estrecho de radiación incide sobre una superficie y se recoge toda la radiación reflejada.
- Reflectancia hemisférica angular es la que recoge una fracción de la radiación reflejada, en una dirección determinada, cuando la superficie especular es irradiada desde todas las direcciones.

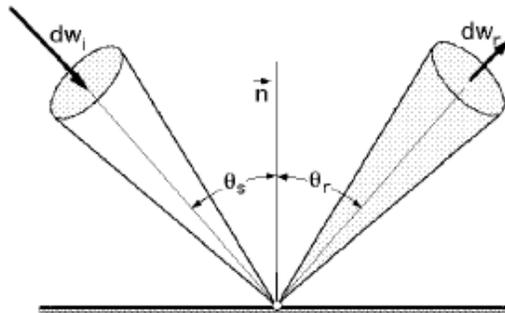
La reflectancia angular hemisférica monocromática se designa vectorialmente por " $\rho_\lambda(\phi_s, \beta_s)$ " en la que " ϕ_s ", es el coseno del ángulo cenital solar incidente y " β_s " es el ángulo acimutal solar incidente en cada instante; la reflectancia angular hemisférica monocromática, se define como la fracción de energía radiante monocromática reflejada en todas direcciones respecto al flujo solar incidente contenido en el ángulo sólido " $d\omega_i$ ", todas las relaciones geométricas de acuerdo a lo observado en la figura 9.

Conociendo la reflectancia angular hemisférica monocromática, se pueden deducir a partir de ella las propiedades de emitancia y de absortancia para la superficie. La intensidad monocromática en una dirección (ϕ_s, β_s) procedente de una superficie infinitesimal (radiosidad), está compuesta por radiación reflejada y por radiación emitida de valor igual a (Ib_λ) a la temperatura T.

$$I_{b\lambda} = I_{\lambda}(\phi_s, \beta_s) \text{emitancia} + I_{\lambda}(\phi_s, \beta_s) \text{reflectancia} \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

Por lo que, tanto la emitancia direccional monocromática, como la absortancia direccional monocromática, se pueden calcular a partir de la reflectancia angular hemisférica monocromática.

Figura 9. **Relación angular y vectorial para los parámetros de captación emisión y reflectancia**



Fuente: FERNÁNDEZ DIEZ, Pedro. *Procesos termosolares a baja, mediana y alta temperatura*. p. II-39.

3.2.4. Orientación y ubicación recomendable para los componentes del sistema energético termosolar

Los sistemas típicos para lugares de habitación emplean colectores fijos, montados sobre cubiertas, o construyendo estructuras para el montaje de estos colectores.

En el hemisferio norte se orientan hacia el sur y en el hemisferio sur hacia el norte respectivamente, el ángulo de inclinación óptimo para montar los colectores depende de la latitud; en general para sistemas que se usan durante todo el año, como los que producen agua caliente.

Debido a la inclinación del eje terrestre, el Sol estará ubicado en puntos más altos o más bajos, durante el recorrido de la Tierra en la órbita solar; por medio de mapas solares se puede determinar el movimiento del Sol para cualquier fecha en el año y cualquier zona geográfica.

El grado de precisión de los mapas solares se expresa con la ventana solar, este método consiste en la representación de una bóveda solar; el curso del Sol se puede trazar sobre una bóveda hemisférica determinando así la ventana solar, cuya función será limitar el área a través de la cual puede llegar a los colectores la máxima cantidad de energía solar en los días que puede ser aprovechada.

El centro de la bóveda representa un colector situado sobre un edificio; el curso del sol puede determinar una ventana solar, la cual limitaría el área a través de la cual llega la cantidad de energía máxima generada.

La línea superior de la ventana queda trazada por el curso seguido por el Sol en el solsticio de verano 21 de junio; aproximadamente en esta fecha el Sol recorre su curso más alto en el cielo. La línea inferior de esta ventana queda determinada por el curso del Sol en el solsticio de invierno 22 de diciembre, siendo esta fecha en la cual el Sol recorre el curso más bajo.

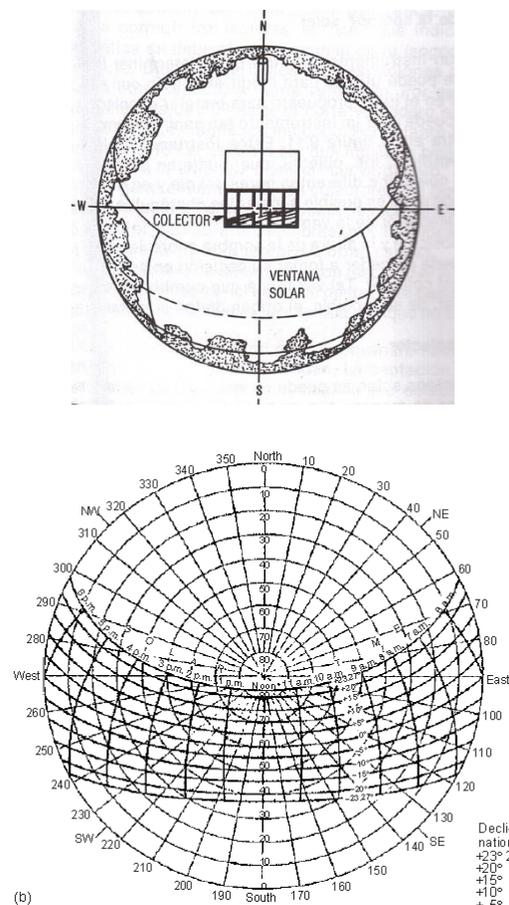
Los lados de la ventana estarán determinados por la posición ocupada por el Sol, tres horas antes y tres horas después del mediodía.

Gran parte de la energía solar que puede utilizar el colector debe poder penetrar en la ventana; mediante este estudio se puede considerar que objetos pueden interferir en la captación de energía, por ejemplo árboles, edificios, etc. mediante la observación de sombra que estos produzcan.

La ventana solar tendrá variaciones de acuerdo al área geográfica donde se utiliza, los límites superior e inferior dependen de la latitud del lugar, mientras que los lados dependen de la longitud y el huso solar.

La ventana solar también se puede determinar sobre una superficie plana, denominada proyección de Mercator; la latitud y longitud se trazan como líneas rectas y se pueden indicar los obstáculos encontrados alrededor del lugar que ocupará el colector.

Figura 10. **Proyecciones de la ventana solar y la carta solar**



Fuente: MONTGOMERY, Richard. *Energía Solar. Selección del equipo, instalación y aprovechamiento.* p. 9.

La ubicación de los colectores depende de varios factores entre los cuales está el diseño del edificio, la proyección de sombras y el área geográfica.

Dentro de los instrumentos para determinar la sombra solar está el sextante, utilizado para medir el ángulo con el cual el Sol cae en el lugar propuesto para instalar el colector. Este instrumento ayuda a identificar que objetos pueden interferir con sombra en el colector para las diversas horas de luz solar en cualquier fecha del año, con este instrumento es posible marcar la posición y la altura utilizando la ventana solar.

El ángulo formado por el colector y la horizontal se le conoce como ángulo de inclinación del colector, este es un factor importante para el diseño; este ángulo es determinado por el área geográfica y la decisión respecto a capacidad energética.

Para los sistemas de calentamiento de líquidos el ángulo óptimo de inclinación es el correspondiente a la latitud geográfica del sitio a utilizar, el uso de este ángulo garantiza optimización en el desarrollo de funcionamiento del colector.

En los sistemas que se utilizan para calefacción se recomienda usar como ángulo de inclinación, el ángulo de latitud geográfica más 15° , logrando con esto la energía máxima del Sol en época de menor temperatura ambiental.

Los ángulos de inclinación se pueden tomar como una guía en el diseño y en las posibles alteraciones a construcciones existentes; un cambio menor a $\pm 10^\circ$ respecto al ángulo más recomendable no debe reducir la capacidad de captación de energía.

4. DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DE UN SISTEMA ENERGÉTICO TERMOSOLAR

4.1. Dispositivos de captación directa de la radiación solar

A continuación se hace una descripción de los dispositivos de captación de energía a través de la radiación proveniente del Sol.

4.1.1. Colectores solares de superficie plana

Se denomina captador solar o colector solar a cualquier dispositivo diseñado y fabricado para recibir la energía irradiada por el Sol y convertirla en otras formas de energía. Los colectores solares se dividen en tres tipos: el colector de placa plana, el colector de tubo evacuado y el colector concentrador o seguidor.

Los captadores o colectores también puede ser clasificados según el rango de temperatura de funcionamiento; los colectores de baja temperatura son utilizados fundamentalmente en sistemas domésticos de calefacción y calentamiento de agua sanitaria, y los colectores de alta temperatura, conformados mediante espejos, y utilizados generalmente para producir energía eléctrica.

En los procesos de transferencia térmica los colectores de placa plana interceptan la radiación solar en una placa de absorción, por la que pasa el llamado fluido portador; que puede encontrarse en estado líquido o gaseoso, se calienta al atravesar los canales por transferencia de calor desde la placa de

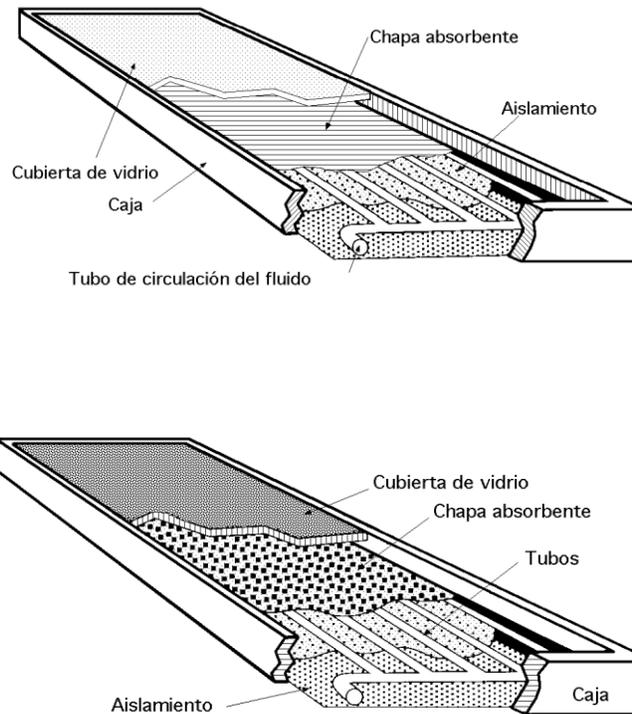
absorción. La energía transferida por el fluido portador, dividida entre la energía solar que incide sobre el colector y expresada en porcentaje, se llama eficiencia instantánea del colector.

Los colectores de placa plana tienen, en general, una o más placas de cubierta transparentes para intentar minimizar las pérdidas de calor de la placa de absorción en un esfuerzo para maximizar la eficiencia. Se ha logrado a través de estos dispositivos una capacidad de calentar fluidos portadores hasta 82 °C y obtener entre el 40 y el 80 % de eficiencia.

Un colector de tubo evacuado emplea el vacío como aislador contra pérdida de calor y para impedir que la capa de absorción se deteriore; el colector de tubo evacuado tiene similitud a 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 absorbedora 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 11. **Colector solar plano**



Fuente: FERNÁNDEZ DIEZ, Pedro. *Termodinámica Técnica*. p. III-62.

El diseño del colector de tubo emplea tanto aire como líquido para transferir el calor; en otros diseños la construcción es diferente, utilizándose aire o únicamente líquido para hacer la transferencia.

El colector de tubo evacuado recoge la radiación solar directa con mucha eficiencia; algunos sistemas tienen diseños muy efectivos en radiación directa como en radiación difusa.

Los sistemas de colector de tubo son muy eficientes en aplicaciones de alta temperatura, con requerimientos de agua caliente para procesos

industriales, o bien en operaciones de enfriadores de absorción en sistemas de refrigeración residencial o comercial.

4.1.1.1. Cubierta de los colectores

La cubierta es la superficie frontal o de incidencia de la luz solar en el colector; la composición de la misma es por lo general elaborada a base de vidrio templado o un material similar, con las condiciones de transparencia a la radiación externa y opacidad a las ondas largas emitidas por la placa de absorción interna; a través del efecto originado por la cubierta se obtiene el efecto invernadero necesario para el funcionamiento de todo el sistema.

La eficiencia de transmisibilidad es superior al 90 %, este valor indica y constituye una característica que diferencia a los diversos colectores construidos actualmente.

Como labor complementaria la cubierta de un colector, realiza la protección de la placa absorbidora respecto a las variaciones climáticas, fenómenos atmosféricos acumulación de polvo u objetos no deseados.

4.1.1.2. Placa absorbidora de energía

La placa absorberá es el componente a través del cual se capta o absorbe la energía solar que incide sobre la superficie del colector, elevando la temperatura del fluido que circula por los conductos dispuestos en el interior.

Los materiales que forman la placa absorbidora pueden ser cobre, cobre-aluminio o acero, puede incorporar asimismo una capa de cromo negro sobre níquel o similar consigue al aplicarse un tratamiento termoquímico que logra un

aumento en la absorción, teniendo la posibilidad de alcanzar eficiencia hasta de un 95 %. Existen dos configuraciones básicas para la disposición de los conductos útiles en la transferencia energética siendo estos:

Sistema de red vertical de tubos, correspondiendo este a tubos dispuestos en vertical entre dos de mayor diámetro transversales y colocados cada uno en los extremos superior e inferior, distribuyendo de esta forma la entrada de agua fría en su parte inferior y en la salida el agua caliente por la parte superior.

Otro modo de captar la energía térmica es a través de un serpentín en la placa absorbadora, a través de la disposición continua del conducto en forma de serpentín entre los tubos de entrada y salida, colocados de forma horizontal del colector.

Los diversos conductos por los que circula el fluido que viene del circuito primario, están fuertemente adheridos a la parte posterior de la placa absorbadora para limitar las pérdidas de energía, afectando esto directamente al rendimiento del colector solar; en este tipo de instalaciones el fluido será el agua de la red, agregándose aditivos en función de cambios climáticos, siendo los más empleados los anticongelantes y anticorrosivos.

Existen varias configuraciones de la placa de absorción, entre los cuales se puede mencionar los siguientes:

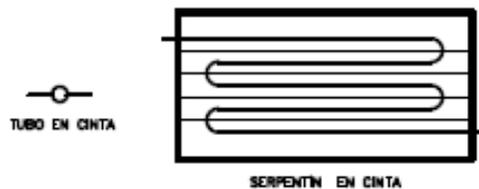
- Tubo en cinta
- Tubo en panel
- Tubo sobre cinta
- Tubo sobre panel
- Panel tipo oblea

- Aleta en tubo
- Tubos con aletas

Con el método de producción de tubo en cinta, se estira una cinta larga de metal que lleva un tubo integrado; un tubo típico contiene varios metros de tubo de cinta doblados en forma de serpiente, con bordes de aletas adyacentes atornillados o soldados entre sí.

El uso de esta técnica tiene la desventaja de ubicar los tubos con demasiada separación, existiendo solo un tubo recorriendo el panel, si existen tapones en cualquier punto deja de circular el fluido; la eficiencia de las aletas es baja.

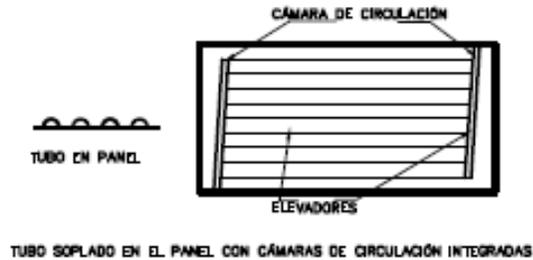
Figura 12. **Placa absorbedora con tubo en cinta**



Fuente: MONTGOMERY, Richard. *Energía Solar. Selección del equipo, instalación y aprovechamiento*. p. 10.

En la configuración de tubo en panel, se estampa un patrón acanalado en una lámina metálica que puede ser de cobre o aluminio; colocando adicionalmente una segunda lámina encima de la primera, luego se utiliza un laminador caliente para lograr la adhesión de ambas láminas.

Figura 13. **Placa absorbedora con tubo en panel**

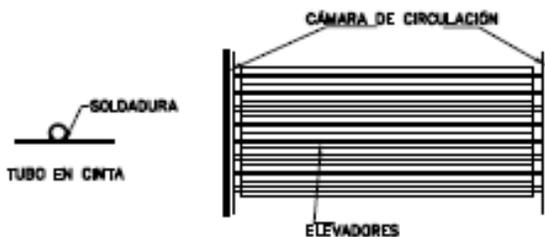


Fuente: MONTGOMERY, Richard. *Energía Solar. Selección del equipo, instalación y aprovechamiento*. p. 11.

El conjunto de láminas adheridas debe ser colocado entre dos prensas para que sea inyectado aire con alta presión hasta inflamar los canales; este sistema posee gran flexibilidad de circulación del fluido.

La configuración del tubo sobre cinta consiste en la aplicación de soldadura de alto punto de fusión, uniendo un tubo de metal a una cinta de absorción; se sueldan varias cintas a los múltiples superior e inferior formando un conjunto de elevadores paralelos.

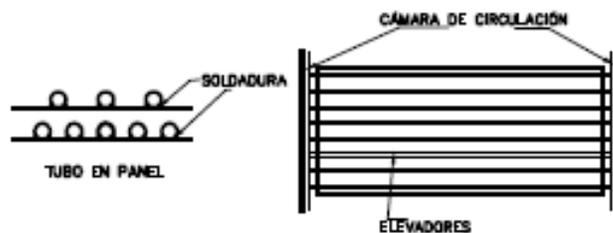
Figura 14. **Placa absorbedora con tubo sobre cinta**



Fuente: MONTGOMERY, Richard. *Energía Solar. Selección del equipo, instalación y aprovechamiento*. p. 11.

La técnica de fabricación del tubo sobre panel es similar a la del tubo sobre cinta; siendo un método muy utilizado que puede ser comprobado en la fabricación de placas de absorción, teniendo la ventaja de poder ensamblar previamente los múltiples y elevadores para probarlos.

Figura 15. **Placa absorbidora con tubo sobre panel**

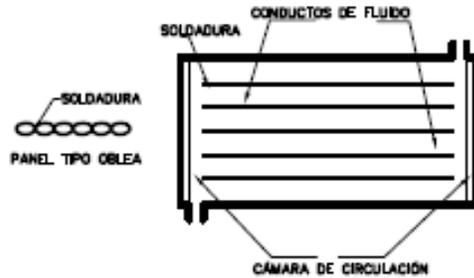


Fuente: MONTGOMERY, Richard. *Energía Solar. Selección del equipo, instalación y aprovechamiento*. p. 11.

En el tubo sobre panel con frecuencia la placa recibe previamente la forma de los canales donde estarán los elevadores y los múltiples.

El panel tipo oblea tiene un gran número de variantes; esta configuración consiste básicamente en dos piezas metálicas, comúnmente de acero, soldadas en varios puntos; tiene una consistencia muy fuerte y el fluido ocupa gran parte del panel; como peculiaridad tiene la desventaja de oxidarse con facilidad y la transferencia de calor es lenta.

Figura 16. **Placa absorbedora con panel tipo olea**

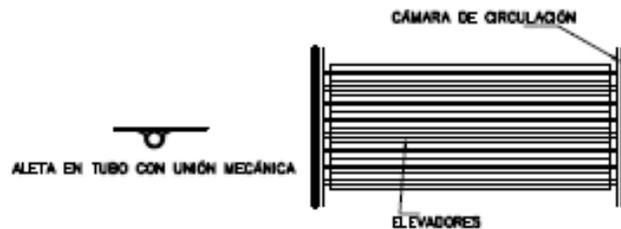


Fuente: MONTGOMERY, Richard. *Energía Solar. Selección del equipo, instalación y aprovechamiento*. p. 12.

La configuración de aleta en los tubos consiste en fijar una aleta separada a los tubos elevadores; no existe unión metálica entre los tubos y las aletas, lo que puede provocar deficiencias en la transferencia térmica.

La aleta y el tubo por lo general son construidos con distintos materiales, por lo general el tubo es de cobre y la aleta puede ser de otro metal por ejemplo aluminio; con este diseño se puede generar con facilidad la corrosión galvánica en condiciones de humedad.

Figura 17. **Placa absorbedora con aleta en tubos**



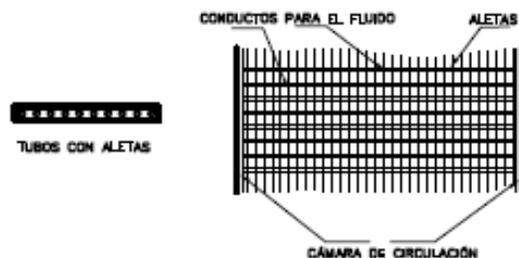
Fuente: MONTGOMERY, Richard. *Energía Solar. Selección del equipo, instalación y aprovechamiento*. p. 12.

En el diseño de tubos de cobre con aletas de aluminio incorporadas, los elevadores de cobre se dilatan para establecer la unión mecánica; las aplicaciones de este diseño se dan en instalaciones de calefacción y aire acondicionado.

El funcionamiento del panel de tubos con aletas incorporadas consiste en incidencia de radiación en las aletas, las que actúan como trampas reflectoras que captan y retienen energía solar.

La configuración de tubos con aletas incorporadas sufre pérdidas de eficiencia aproximadas entre en 2 % y 4 %, cuando el recubrimiento superficial se omite deliberadamente con fines de prueba; lo que genera un rendimiento térmico muy alto durante la vida útil del dispositivo.

Figura 18. **Placa absorbidora de tubos con aletas**



Fuente: MONTGOMERY, Richard. *Energía Solar. Selección del equipo, instalación y aprovechamiento*. p. 12.

4.1.1.3. **Aislante**

El aislante tiene como función reducir las pérdidas de calor a través de los lados y el fondo de la carcasa del colector; para cumplir su finalidad el aislante dispone de una capa de espuma de poliuretano de resina de melanina o

material similar ubicada debajo y lateralmente en la placa absorbadora, contando con una cámara de separación entre la placa y el aislante que deduce las pérdidas térmicas.

Las características del material para la fabricación del aislante son determinadas por la densidad y capacidad de temperatura; al sistema de aislamiento se puede agregar lámina de aluminio, para reflejar la radiación emitida por la placa absorbadora y lograr mayor reducción de pérdidas de calor en la parte posterior de los colectores solares.

Existen 4 tipos básicos de aisladores que se pueden considerar:

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

Los aisladores de fibra mineral o de cerámica, con excepción de la lana mineral, son materiales diseñados para soportar temperaturas superiores a las que se encuentran en los colectores de superficie plana; la lana mineral es un relleno suelto que pierde las propiedades aisladoras, cuando sufre los efectos de un ciclo de humedad.

La espuma de uretano y el poliestireno dilatado no tienen buena estabilidad a diferentes temperaturas, tienden a producir gasificación y tienen inflamabilidad baja; su utilización limita el funcionamiento de los colectores que deben quedar encerrados en su propio recipiente, separados de la cubierta y de la placa de absorción; la espuma de vidrio tiene características más favorables y se considera un buen aislante.

En general la fibra de vidrio que se emplea en el aislante de los colectores no tiene muy buena calidad, la misma es fabricada con grandes cantidades de aglutinantes fenólicos, cuyo límite de temperatura superior se encuentra por debajo de las temperaturas de estancamiento de los colectores.

Las planchas de fibra de vidrio para altas temperaturas están fabricadas con poco o ningún aglutinante y constituyen un aislador muy satisfactorio, estas planchas se fabrican con diversas densidades, se debe verificar el factor de radiación según el espesor a utilizar.

4.1.1.4. Carcasa

La carcasa es el componente estructural que tiene como función soportar la cubierta, y la placa absorbidora; es fabricada en aluminio o acero galvanizado, con ranuras para fijación en cubiertas, suelo o similar.

La carcasa debe estar completamente sellada para asegurar el estancamiento, siendo esto una condición necesaria e imprescindible en este componente obligado a situarse a intemperie.

Entre los materiales más utilizados para la fabricación de las carcasas están: aluminio, lámina galvanizada, fibra de vidrio laminada, termoplásticos para alta temperatura, madera, concreto de peso ligero.

Los materiales mencionados son muy satisfactorios usándolos debidamente, los puntos que normalmente provocan problemas son los ajustes y ensambles de las piezas; se hace necesario asegurar el respaldo y la cubierta a los lados, si se usan metales se debe considerar además las dilataciones térmicas.

4.1.2. Colectores solares de diversas formas geométricas

En los procesos constructivos de concentradores reflectores es necesario emplear superficies ópticas de grandes dimensiones. Los sistemas dióptricos a partir de lentes de cristal no se recomiendan a causa de su fragilidad, peso y precio.

Sin embargo existen colectores constituidos por un gran número de prismas de cristal de reflexión total de pequeño espesor, conocidos como sistemas catadióptricos, con un factor de reflexión del 95 %; la reflectividad global es del orden del 90 %, superior a la de los mejores espejos y no experimentan degradación con el paso del tiempo.

Los colectores de concentración utilizan sistemas ópticos reflectores y en algunos casos muy particulares, refractores, para aumentar la intensidad de la radiación solar que se dirige sobre una superficie receptora que la absorbe, pudiendo ser lentes Fresnel y lentes de líquido.

Al tener mayor flujo solar sobre la superficie, menor será la zona necesaria para conseguir el mismo efecto térmico sobre un fluido, lo que supone una reducción de las pérdidas térmicas.

Sin embargo aparecen otros tipos de pérdidas como son el que estos colectores funcionan únicamente con la componente directa de la radiación, que aparecen pérdidas ópticas por defectos de enfoque y dirección; asimismo aparecen otros problemas, como:

- Una mayor complicación de las características ópticas de los concentradores, por cuanto precisan de sistemas de orientación y

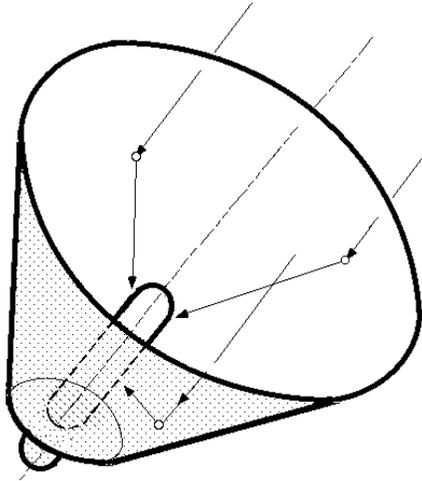
seguimiento del Sol, que permiten aprovechar al máximo la radiación solar incidente.

- La existencia de flujos no estacionarios en los fluidos que circulan por el receptor.
- Grandes variaciones tanto en la forma y diseño, como en las temperaturas y pérdidas térmicas de las superficies receptoras absorbentes. La amplia gama de configuraciones permiten la manipulación de una serie de nuevos parámetros de diseño.
- Mayor complejidad con la introducción de factores ópticos adicionales, que complican los balances energéticos.
- Una mayor calidad en los sistemas ópticos, ya que tienen que trabajar durante largos períodos de tiempo, lo que implica el que deben mantener inalterables sus propiedades ópticas contra la suciedad, erosión, oxidación, condiciones climáticas, etc.

4.1.2.1. Colectores cilíndricos

Receptor cilíndrico y concentrador-reflector cónico; se mejoran las características receptor cilíndrico y concentrador reflector esférico.

Figura 19. **Colector cilíndrico**



Fuente: FERNÁNDEZ DIEZ, Pedro. *Termodinámica técnica*. p. IV-81.

4.1.2.2. **Colectores parabólicos**

Un paraboloide de revolución se obtiene por rotación de una parábola alrededor de su eje; el concentrador reflector tipo paraboloide de revolución; permite obtener relaciones de concentración muy elevadas, lo que a su vez implica elevadas temperaturas; una modificación del mismo introduce un segundo reflector que permite llevar al foco a otra posición más conveniente.

Las pérdidas son debidas a: reflexión, absorción, irregularidades geométricas de la superficie reflectora, sombra de las monturas, soporte del horno, imperfecciones de orientación, etc., de forma que pueden llegar a adquirir una importancia considerable si se pretende obtener concentraciones elevadas.

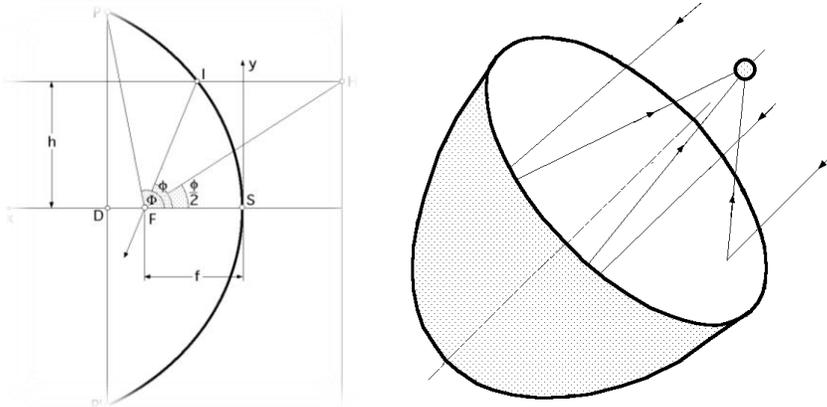
En general, un horno solar se compone de dos tipos de espejos, uno parabólico fijo que concentra energía en el foco y otro plano que reenvía el haz

de rayos solares a la zona de máxima temperatura, con lo que se tienen dos espejos con las pérdidas correspondientes. Para los espejos recubiertos con plata o aluminio.

Las pérdidas son del orden del 10% para cada uno, en total un 20 %. Las demás pérdidas son difíciles de evaluar, pero se pueden cuantificar entre un 30 % y un 70 %, según el tipo de construcción.

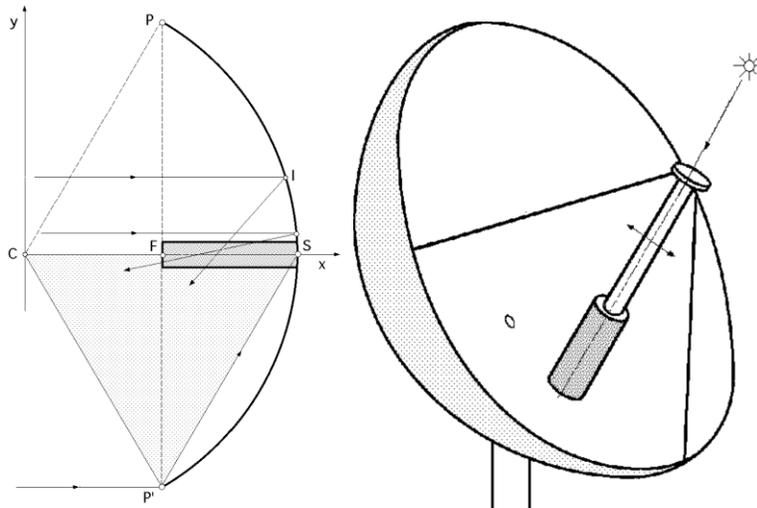
La relación entre la energía obtenida y la calculada a partir del factor de concentración es el factor del horno F, que en las mejores condiciones no es superior a 0,6 para factores de concentración del orden de 20 000.

Figura 20. **Colector parabólico de revolución**



Fuente: FERNÁNDEZ DIEZ, Pedro. *Termodinámica técnica*. p. IV-81.

Figura 22. **Colector esférico**



Fuente: FERNÁNDEZ DIEZ, Pedro. *Termodinámica técnica*. p. IV-89.

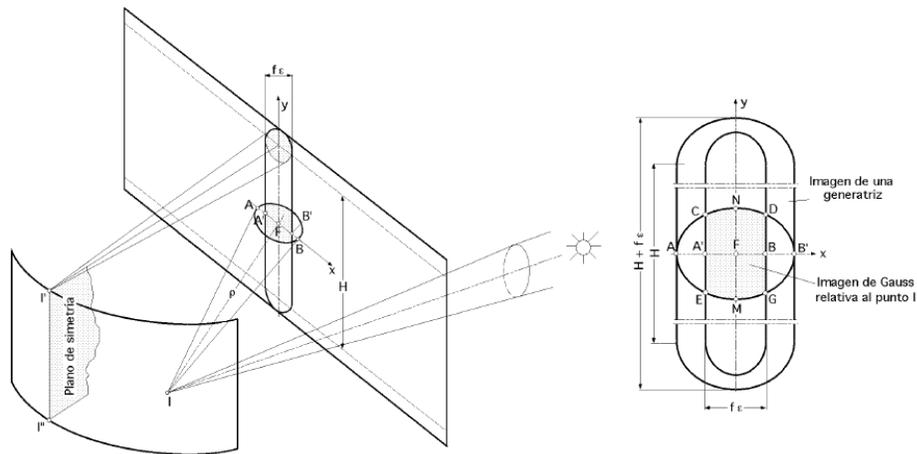
4.1.2.4. **Colectores cilíndrico-parabólicos**

El colector con concentrador-reflector cilíndrico parabólico y receptor tubular; es el modelo más utilizado y en el que el tubo receptor se encuentra a lo largo de todas las posiciones focales. La temperatura alcanzada en el mismo puede llegar a ser del orden de los 300 °C, suficiente para una gran diversidad de aplicaciones.

La superficie de abertura del concentrador, es el área del mismo proyectada sobre un plano normal al plano de simetría. Para un colector cilíndrico parabólico es un rectángulo de dimensiones la anchura y longitud de la superficie reflectante. Si se considera un haz de rayos luminosos de abertura e incidente en el punto I del cilindro, el haz reflejado corta al plano normal en el eje de la parábola básica que define el perfil del cilindro, según una elipse de

eje mayor (AB). En primera aproximación se puede admitir que el foco F de la parábola que pasa por el punto I es el centro de esta elipse.

Figura 23. **Concentración solar en el colector cilíndrico parabólico**



Fuente: FERNÁNDEZ DIEZ, Pedro. *Termodinámica técnica*. p. IV-89.

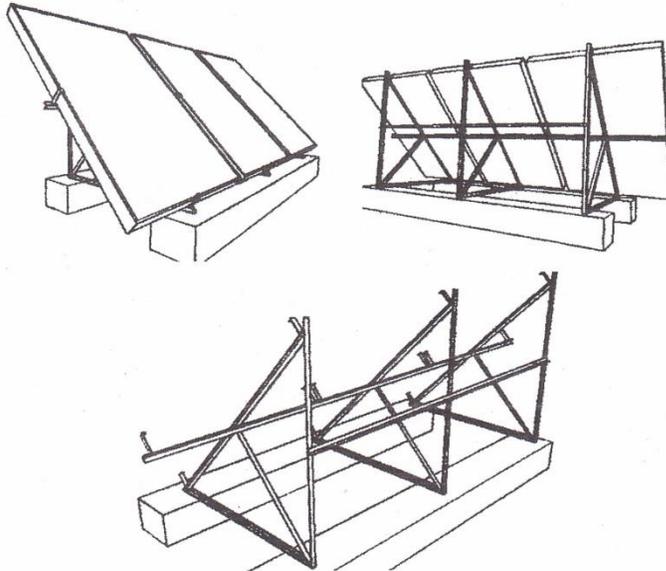
4.2. Elementos de fijación

Los colectores solares se pueden adaptar de acuerdo a geometría y características constructivas de los edificios, integrándose a las características arquitectónicas, por ejemplo en las cubiertas; o bien puede realizarse su montaje en estructuras construidas específicamente para ese propósito.

La ubicación y dimensiones de las estructuras donde estará montado un colector solar estarán determinadas por factores descritos anteriormente como la posición geográfica y trayectoria de la luz solar. Para la sujeción en cubiertas inclinadas se utiliza una disposición de ganchos para situar los colectores solares sobre la cubierta; si es necesario al mecanismo de soporte se debe

incorporar elementos de variación de elevación y ajuste de la inclinación, esta inclinación depende de condiciones climáticas.

Figura 24. **Soportes para fijación de colectores solares**



Fuente: PERALES, Tomas. *Guía del instalador de energías renovables*. p. 165.

4.3. Intercambiadores de calor

En los sistemas energéticos termosolares, es necesaria la utilización de intercambiadores de calor directos, cuando el fluido en circulación por el colector es el utilizado en el servicio a prestar.

Un intercambiador de calor es todo dispositivo capaz de realizar algún tipo de transferencia energética comúnmente en forma de calor de una sustancia a otra, muchos intercambiadores de calor están contruidos de tal forma que las sustancias no se puedan mezclar.

Los intercambiadores de calor indirectos se utilizan cuando la instalación se distribuye con un fluido en el circuito primario en el colector, mientras que un circuito secundario se asigna para el fluido de servicio, sin que exista mezcla alguna entre los fluidos.

Al utilizar los intercambiadores de calor directos, el líquido en circulación puede provocar en los conductos incrustaciones calcáreas, deposición de suciedad e incorporación de sustancias anticongelantes y antioxidantes, afectando significativamente en regiones con temperaturas y condiciones extremas.

Comúnmente se utiliza el intercambiador de calor que facilite la separación del fluido en el colector y el fluido a consumir; con esto se podrá incorporar los agentes protectores necesarios para un funcionamiento óptimo.

El dispositivo de intercambio calorífico es un sistema de transferencia térmica de dos circuitos, en el que se produce la condición necesaria cuando existe un determinado gradiente de temperatura; el líquido caliente obtenido en el colector es transferido por conducción a un sistema de agua fría, generando un intercambio térmico, este proceso se da sin mezclar los líquidos de ambos circuitos.

El proceso de intercambio de calor para instalaciones de configuración indirecta o de dos circuitos, tiene dos formas diferentes de ubicación y funcionamiento descritas en los siguientes incisos.

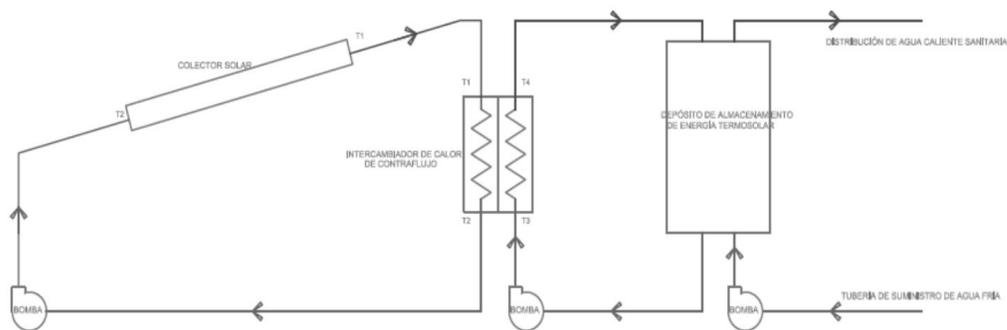
4.3.1. Intercambiador externo

El intercambiador se sitúa formando 2 circuitos como se expone gráficamente en las figuras, mostrando un esquema tradicional para esta configuración; este componente puede tener diversidad de formas, como el intercambiador térmico de placas, teniendo el mismo principio termodinámico, siendo su diferencia notable el rendimiento térmico.

Existen varios tipos de configuración del intercambiador de calor que se puede aplicar para uso externo los cuales se describen a continuación.

El intercambiador de calor de contraflujo es un dispositivo integrado en el cual las dos sustancias fluyen en direcciones opuestas, se emplea para calentamiento de agua y el ambiente por medio de energía solar.

Figura 25. **Circuito con intercambiador de calor de contraflujo**



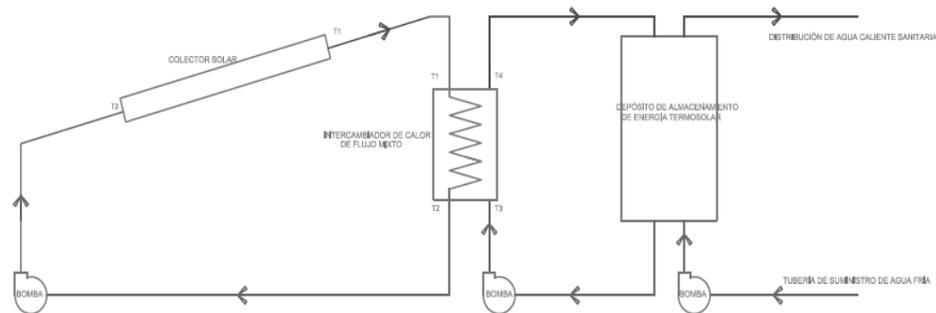
Fuente: elaboración propia, con AutoCAD 2012.

El funcionamiento del intercambiador de contraflujo consiste en la circulación de caudal de la sustancia más fría del lado de alimentación o lado del colector, esta encontrará a la sustancia que se calienta del lado del depósito

o almacenador; la fuerza impulsora es mayor en la entrada del almacenador energético; la temperatura del colector estará determinada por la del tanque de almacenamiento antes de recibir el calor.

El intercambiador de calor de flujo mixto es un dispositivo en el cual una sustancia recibe la temperatura media de la otra sustancia; la sustancia de distribución puede recibir la temperatura media desde la sustancia que se calienta, o esta última puede recibir la temperatura media de distribución, la temperatura del colector quedará en algún punto entre las temperaturas de entrada y salida del tanque.

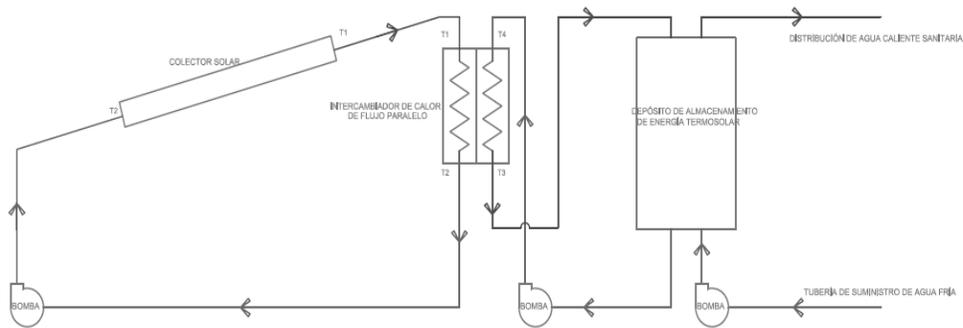
Figura 26. **Circuito con intercambiador de calor de flujo mixto**



Fuente: elaboración propia, con AutoCAD 2012.

El intercambiador de calor de flujo paralelo es un dispositivo integrado, en el cual las dos sustancias fluyen en la misma dirección, es poco satisfactorio para sistemas colectores de energía solar; la sustancia más caliente de suministro encuentra siempre la sustancia más fría en el lado en donde se calienta. La fuerza impulsora tiende a ser más baja en la entrada del almacenador de energía, el calor agregado al fluido de almacenamiento determina la temperatura del colector.

Figura 27. **Circuito con intercambiador de calor de flujo paralelo**



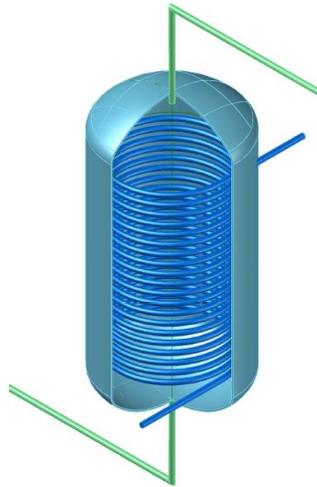
Fuente: elaboración propia, con AutoCAD 2012.

4.3.2. **Intercambiador integrado con acumulador**

Esta configuración muy utilizada en instalaciones indirectas con objetivo de obtener agua caliente sanitaria ACS, consiste en el acumulador o almacenador de energía con un circuito interno de intercambio térmico. Un doble envoltente en el depósito o una horquilla interna, provocan un efecto de intercambio entre el fluido caliente del circuito primario y el secundario destinado al consumo.

El intercambiador de calor de serpiente en tanque, es un tipo de intercambiador que puede estar integrado al almacenador energético, este consiste en un serpiente provisto de aletas colocado en el fondo un tanque con agua. Este tipo de intercambiador es empleado comúnmente en sistemas de calentamiento de agua sanitaria, el agua se encuentra a temperatura baja en el fondo del tanque; a medida que se calienta asciende por convección de la parte superior, se puede extraer la máxima cantidad de energía producida antes del retorno del fluido al colector.

Figura 28. **Acumulador energético integrado con intercambiador de calor**



Fuente: elaboración propia con AutoCAD 2012.

4.4. **Dispositivos almacenadores de energía**

La energía solar es una fuente de energía que depende del tiempo; para una amplia gama de aplicaciones las necesidades de energía dependen también del tiempo, pero en forma distinta del suministro de energía solar, por lo que el desfase entre los períodos de disponibilidad de la energía solar y los períodos de consumo, requieren de alguna forma de almacenamiento.

El almacenamiento de energía solar se tiene que realizar teniendo en cuenta: tipo de colector solar, las unidades de almacenamiento, aparatos de conversión tales como acondicionadores de aire o motores, cargas, suministros de energía auxiliares o suplementarios, los sistemas de control.

La capacidad de almacenamiento óptimo de la energía solar es función de su disponibilidad, que depende de: el tiempo, la naturaleza de las cargas que se pueden esperar en el proceso, la forma en que se suministra la energía auxiliar,

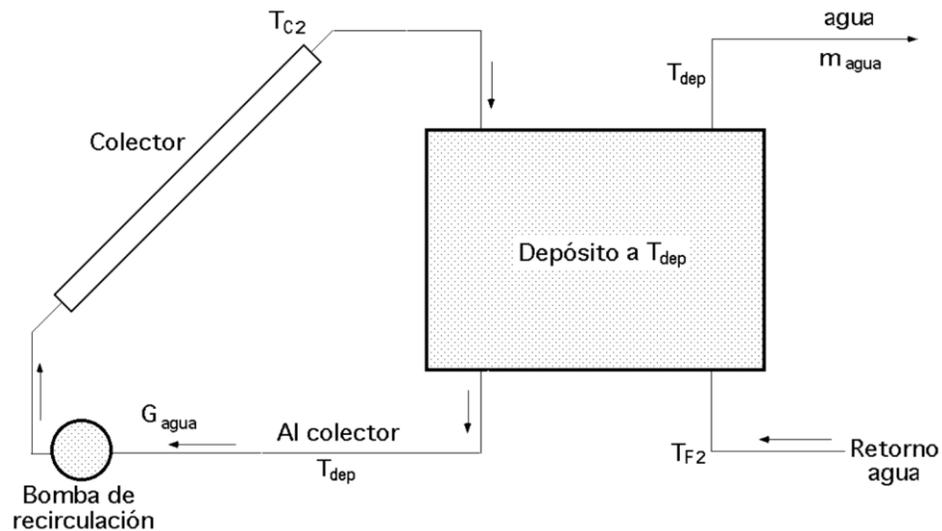
análisis económico que determina qué parte de las cargas totales de energía deben ser de tipo solar y qué otras partes procedentes de otras formas de energía.

Para las instalaciones de sistemas termosolares existen diversas formas de almacenamiento energético de tipo pasivo, consiguiendo la elección adecuada de los materiales de construcción, en el tipo activo interviene un fluido en circulación transportando energía térmica obtenida desde el colector solar.

El calentamiento del líquido como medio de almacenamiento de la energía en el almacenador, es el procedimiento empleado para este fin; teniendo en cuenta la capacidad calorífica promedio del agua $4,186 \text{ KJ/ (kg}^{\circ}\text{C)}$ y capacidad volumétrica $4,186 \text{ KJ/ (}^{\circ}\text{C}^{\ast}\text{m}^3)$, utilizando unidades SI.

El almacenador de energía es un componente fundamental en cualquier instalación termosolar, durante las horas en las que el captador solar no genera energía calorífica; desde el almacenador se distribuye el líquido caliente para su utilización.

Figura 29. **Circuito con colector y almacenador energético conectados directamente**



Fuente: FERNÁNDEZ DIEZ, Pedro. *Termodinámica técnica*. p. V-16.

Pueden considerarse dos diferentes tipos fundamentales de almacenadores de energía termosolar descritos en los siguientes párrafos.

Los almacenadores de circuito abierto constan de un depósito con capacidad para retener energía térmica mediante una pared de acero; estos almacenadores reciben fluido desde el colector si el sistema de la instalación es directo, o desde el intercambiador de calor externo si es de modo indirecto.

Los almacenadores de circuito abierto pueden incorporar calentadores eléctricos de apoyo para calentar el líquido interno, cuando la demanda energética sea superior a la proporcionada por el sistema termosolar.

A través de un controlador electrónico se pueden realizar medidas de temperatura para poder determinar puntos de instalación de calentadores de apoyo durante el tiempo necesario.

Los interacumuladores son formados por la unión en el mismo equipo de un intercambiador de calor y un almacenador, este equipo normalmente será utilizado en instalaciones de tipo indirecto; este equipo también puede incorporar calentadores de apoyo o más de un intercambiador de calor como apoyo para la generación energética del sistema termosolar.

El dispositivo de almacenamiento más sencillo consiste en un depósito, ya sea de tambor o de almohadilla; puede estar compuesto por una bolsa de plástico colocada en una plataforma, un simple tambor instalado en una parte alta del edificio, o bien una caja rectangular inclinada con reflectores y un compartimiento aislado para el agua.

El método utilizado comúnmente para calentar el agua almacenada consiste en usar un tanque similar a un calentador eléctrico de agua común; con la peculiaridad que este tanque no debe tener ninguna fuente de calor para lograr mayor eficiencia.

El tanque debe tener un intercambiador de calor que puede estar integrado al propio tanque o externo al mismo, para captar la energía desde el circuito del colector, se debe instalar además un precalentador para el caudal de agua que proviene de la red o cisterna de agua sanitaria a utilizar.

Si el sistema puede captar toda la energía suficiente, este suministro será suficiente a través del precalentador, cuando no se capte energía suficiente se

hará necesaria la utilización de un calentador auxiliar, que eleva la temperatura de servicio.

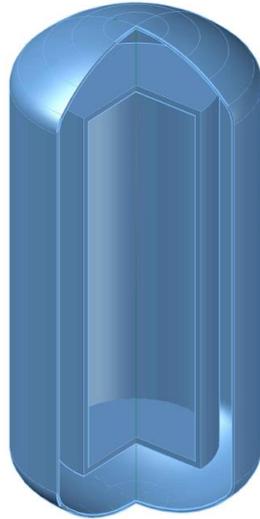
Los materiales utilizados normalmente en la construcción del precalentador pueden ser: lamina de acero galvanizada, acero con revestimiento de lana de vidrio, acero revestido con cerámica, cobre o fibra de vidrio, el tanque precalentador debe tener además un material aislante para evitar la pérdida de calor.

La capacidad de los tanques precalentadores por lo general está comprendida entre 40 y 120 galones, por supuesto la capacidad necesaria será determinada mediante un proceso de análisis y cálculo descrito posteriormente,

En los tanques precalentadores con intercambiador integrado se pueden usar tres tipos: intercambiador tipo camisa, intercambiador tipo serpentín o intercambiador de conducto interno.

El intercambiador tipo camisa está constituido como un tanque dentro de otro tanque, el fluido de transferencia circula por el espacio que rodea el tanque interior; existen 2 modelos del intercambiador tipo camisa, en uno de esos modelos la camisa rodea totalmente al interior y a través de ella circula el fluido de transferencia; el otro modelo cuenta con una serie de canales paralelos por los cuales circula sin mezclarse el fluido de transferencia y el agua del tanque.

Figura 30. **Intercambiador de calor tipo camisa**



Fuente: elaboración propia con AutoCAD 2012.

En cualquiera de los modelos descritos, el intercambiador debe operar en la modalidad de contraflujo, esto significa que el fluido caliente que viene desde el colector fluye hacia abajo, mientras que el agua fría del tanque o del abastecimiento fluye hacia arriba.

El intercambiador interno de serpentín, por lo general fabricado de cobre tiene gran tamaño y está provisto de aletas, debe estar colocado cerca del fondo del tanque.

Un sistema de intercambiador de serpentín no posee doble pared, lo que limita la elección del fluido de transferencia; otra limitación es la presencia del serpentín de cobre más grande dentro del tanque de acero, los dos metales reaccionan y provocan corrosión, limitando de esta manera la vida útil del dispositivo de almacenamiento.

El precalentador con conductos internos que actúan como intercambiador de calor; este tipo de tanque se utiliza en los sistemas con drenaje, en los cuales se usa agua destilada como fluido de transferencia sin temor de que se congele; este es un sistema que funciona como circuito abierto, lo que requiere gran potencia de bombeo.

4.4.1. Depósito y protecciones

El depósito utilizado para almacenamiento energético se puede considerar compuesto por tres secciones: carcasa o recubrimiento, aislamiento y cilindro.

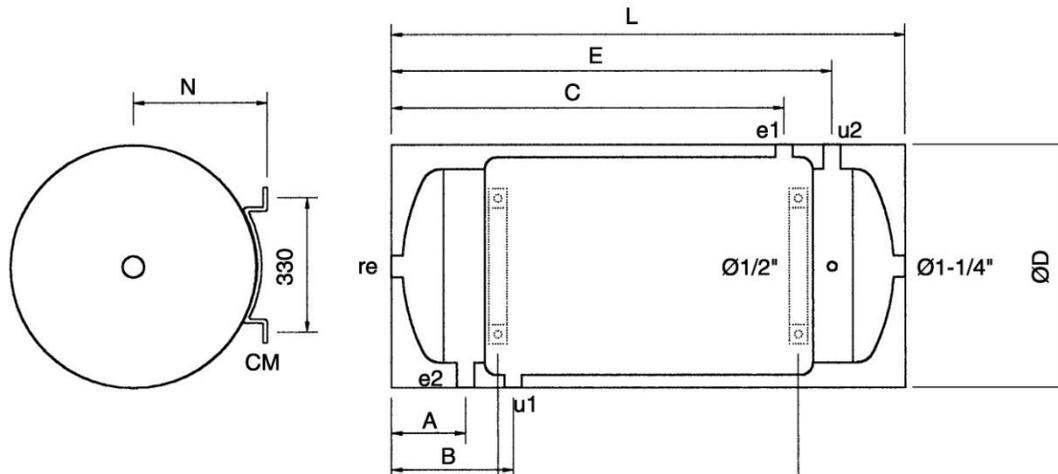
Las principales especificaciones para depósitos son las siguientes: capacidad de producción de líquido caliente en litros, temperatura máxima alcanzada dentro del depósito, presión máxima del depósito, el peso en vacío.

4.4.1.1. Descripción de la forma geométrica de depósitos

Los depósitos en general tendrán forma cilíndrica, para su fabricación se emplea acero inoxidable cuyo interior se puede vitrificar o depositar una capa de esmalte con espesor variable de 100 a 200 μm .

El cilindro puede contener un ánodo de magnesio para proteger el acero de la corrosión; la protección consiste en la incorporación de una válvula de seguridad para la presión del interior del depósito al valor máximo, evacuando fluido cuando es necesario para restaurar la presión en el conjunto de la instalación.

Figura 31. **Ejemplo de almacenador energético para sistemas termosolares**



Fuente: SALVADOR ESCODA S. A. *Manual técnico energía solar térmica*. p. 21.

4.4.1.2. **Carcasa o recubrimiento**

El recubrimiento o carcasa de un almacenador de energía es la estructura del equipo en donde están dispuestos los componentes para la sujeción; el material de la carcasa es acero galvanizado revestido electroquímicamente y cocido en horno.

4.4.1.3. **Aislamiento**

El aislamiento en los almacenadores de energía está constituido por la capa de espuma rígida de poliuretano o material similar, en depósitos pequeños y medianos mientras que está hecho de poliuretano flexible para los depósitos de mayor tamaño; la capa de espuma es empleada como aislante del depósito inferior con el recubrimiento del equipo, el espesor de la capa está

comprendido entre 30 y 40 mm para espuma rígida, mientras que para espuma flexible se encuentra entre 60 y 70 mm.

4.4.2. Almacenadores de circuito abierto

Este dispositivo de almacenamiento no posee intercambiador de calor, no siendo este requerido en la instalación; otra razón de no requerir el intercambiador de calor es por ubicarse en el exterior de la edificación.

A este equipo se puede incorporar un calentador eléctrico a base de resistencia como medio de apoyo, si la demanda de líquido caliente producido por el sistema termosolar es inferior a la necesaria para proveer el servicio.

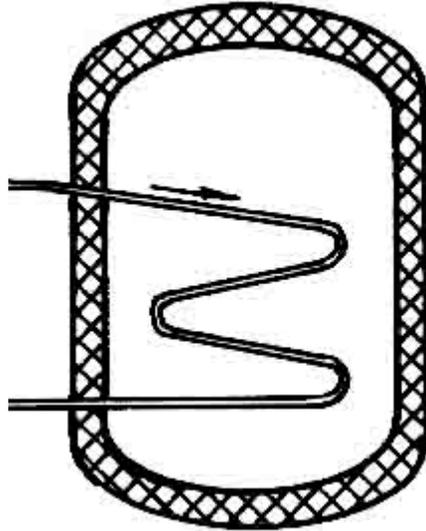
4.4.3. Almacenadores con intercambiador de calor

Este equipo consistente en un interacumulador por incorporación de por lo menos un intercambiador de calor, existiendo dos versiones diferentes del mismo, utilizando un intercambiador simple o bien un intercambiador múltiple.

4.4.3.1. Intercambiador simple

Este es el procedimiento comercialmente conocido del almacenador en el que se ha introducido un medio de intercambio térmico, entre el fluido en circulación procedente del colector solar y el líquido de consumo, existiendo 2 formas diferentes para realizar el proceso: intercambiador de serpentín para circuito primario, intercambiador mediante doble pared o equivalente.

Figura 32. **Almacenador energético con intercambiador de calor simple**



Fuente: RIBOT, Jaume. *Curso de energía solar, Tomo 3*. p. 46.

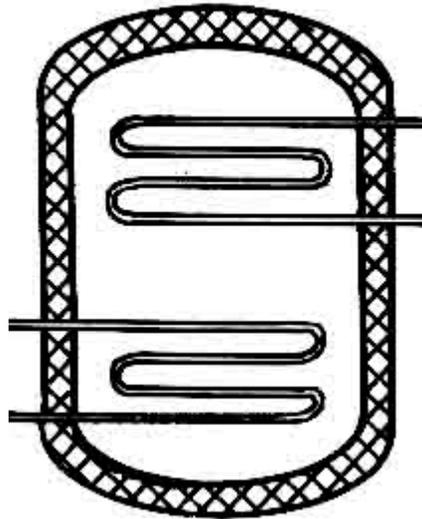
4.4.3.2. Intercambiador múltiple

El almacenador puede contener dos intercambiadores de calor, utilizando un serpentín como intercambiador básico entre el fluido del colector solar y el líquido a aportar como servicio, mientras el otro intercambiador sirve como sistema de apoyo cuya energía procede de un calentador auxiliar.

Si es necesario este almacenador también puede utilizar una resistencia eléctrica tipo horquilla, como medio auxiliar para el calentamiento del líquido.

Las especificaciones a tomar cuenta adicionalmente a las del circuito abierto deben ser: volumen producido del serpentín de intercambio básico, volumen producido por el serpentín de intercambio de apoyo.

Figura 33. **Almacenador energético con intercambiador múltiple**



Fuente: RIBOT, Jaume. *Curso de energía solar*, Tomo 3. p. 46.

4.5. Circuito hidráulico

Cuando se utilizan sistemas de circulación forzada se necesita trasladar el fluido desde el dispositivo de captación solar, hacia el dispositivo de almacenamiento a través de un sistema de bombeo desde el circuito primario, siendo este el sistema hidráulico de la instalación termosolar.

Este sistema hidráulico está compuesto por los siguientes componentes: bomba de circulación, tuberías donde transita el fluido entre los circuitos de la instalación, vaso de expansión y accesorios para realizar acciones de protección; las características fundamentales que determinan el equipo son: caudal de circulación, longitud de las tuberías y tipo de componentes de seguridad.

El sistema de circulación forzada necesita situar el almacenador por debajo del colector solar, implicando esto la utilización de una bomba que haga circular el fluido caliente en régimen controlado por el consumo del líquido de servicio, a través de las tuberías dispuestas entre el sistema de captación y el sistema de almacenamiento.

Al existir variaciones de temperatura, también existirán variaciones de volumen y de presión, esto puede afectar el funcionamiento de la instalación. Dicha situación se compensa agregando el vaso de expansión al circuito hidráulico, este dispositivo está constituido por una membrana que mantiene la presión dentro de valores previstos.

El sistema hidráulico necesita la instalación de válvulas de vaciado, llenado, antirretorno y todas las necesarias para protección y circulación del fluido; debe contar con sensores de temperatura para proveer información a un termómetro diferencial o un aparato similar para el control del arranque y parada de la bomba de circulación, en función de temperaturas existentes entre colector y almacenador.

4.5.1. Bomba de circulación

Las bombas utilizadas en circuitos hidráulicos de sistemas energéticos por lo general son bombas centrifugas, con la bomba se realiza la circulación de un determinado caudal del fluido a una cierta velocidad y altura de impulsión.

Las bombas centrifugas tienen aspas que giran creando remolinos en el fluido, este adquiere momento suficiente para descargar fuera del cuerpo de la bomba; su alimentación se hace a través de energía eléctrica, puede tener

establecido un equipo electrónico de control y medida de las temperaturas en el colector solar y el almacenador de energía.

Las especificaciones principales para este componente son las siguientes: potencia, tensión de alimentación, altura de elevación mínima, caudal y diámetros de conectores para tubos.

Si se requiere la distribución de ACS, se debe utilizar una bomba resistente a la corrosión, los materiales de fabricación deben ser compatibles con el fluido de circulación y deben ser resistentes a las agresiones calizas.

Las bombas se utilizan en varios circuitos del sistema energético termosolar; un sistema típico para calentar agua tendrá una bomba en el circuito del colector; dependiendo del tanque precalentador, la bomba estará situada en la línea del tanque a los colectores, o bien en la línea que va desde el intercambiador de calor hacia los colectores.

Cuando se usa intercambiador de calor externo entre el tanque precalentador y el almacenador de energía, se utilizará una bomba en este circuito secundario, ubicada en la línea que va desde el tanque hacia el intercambiador.

Para propósitos de bombeo, hay dos tipos básicos de circuitos o sistemas de tuberías, circuitos abiertos y circuitos cerrados; antes de elegir las bombas es necesario determinar la clase del circuito con el cual va a operar el sistema.

En los sistemas de circuito abierto, si el agua que contiene el sistema está en comunicación con la atmósfera en cualquier punto, se requiere una bomba en la cual todas las superficies húmedas están fabricadas de bronce o acero

inoxidable, para evitar corrosión. En los circuitos abiertos se requiere la potencia suficiente para superar la altura hasta el punto más alto del sistema; esta potencia además debe contrarrestar las pérdidas por fricción que se producen dentro del sistema.

Normalmente en un sistema abierto con desagüé, la bomba eleva el agua desde el intercambiador interno del tanque hasta el punto más alto de distribución en el sistema; cuando el agua ha llegado hasta este punto empieza a ser desalojada por gravedad hasta el intercambiador de calor; cuando la bomba se detiene, el agua retorna a través de la bomba y el ramal de bajada, quedando el fluido dentro del intercambiador de calor.

El diseño de la bomba debe corresponder apropiadamente a contrarrestar las pérdidas de fricción que se producen en el intercambiador de calor, en tuberías y en el colector.

Las bombas centrifugas solo funcionan con cierta elevación en la entrada de las mismas; las dimensiones del sistema deben corresponder a un volumen de agua contenido en el tanque mayor al contenido en el colector.

En los sistemas de circuito cerrado no están en contacto directo con la atmósfera, a través de estos sistemas circula el mismo líquido cada vez que se completa el ciclo. Estos sistemas pueden utilizar una bomba con cuerpo e impulsor de hierro; se puede esperar que la bomba dure mucho tiempo, cuando no se empleen fluidos de transferencia corrosivos.

Para los sistemas cerrados de bombeo que están compuestos por intercambiador de calor, colector y tuberías; el sistema se llena con el fluido de transferencia, luego se expulsa al aire. En el sistema cerrado no se toma en

cuenta la elevación máxima de distribución; el peso del líquido que contiene el ramal de bajada equilibra el peso del líquido que contiene el tubo elevador; se deben considerar las pérdidas de fricción de todo el sistema, incluido el ramal de bajada. En general la operación de los sistemas cerrados requiere menos potencia que los sistemas abiertos.

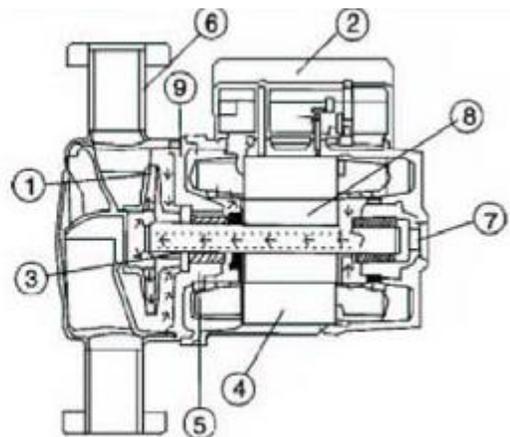
Pueden existir combinaciones de sistema abierto y cerrado, al iniciarse la operación el líquido es bombeado hasta la parte superior del colector, una vez en marcha el sistema opera como un circuito cerrado.

En los sistemas combinados se emplea la modalidad del desagüe como protección de climas extremos; se debe considerar que si el circuito queda abierto en cualquier momento y el tubo elevador no está balanceado por el líquido que contiene el ramal de bajada, existirá un sistema abierto para todo objetivo de diseño.

Figura 34. **Ejemplo de bomba de circulación utilizada en sistemas termosolares**

Sección Circulador SB

1. Rodete
2. Caja bornes con condensador y variador electrónico de seguridad
3. Microfiltro
4. Estator
5. Rotor
6. Cuerpo hidráulico de bronce (SB-100XL de acero inoxidable)
7. Tapón control giro y purga
8. Tope de retención cerámico
9. Soporte motor de bronce



Fuente: PERALES, Tomas. *Guía del instalador de energías renovables*. p. 177.

4.5.2. Materiales para ductos y tuberías

Los ductos o tuberías a utilizar en instalaciones termosolares deben elegirse considerando el caudal, presión máxima admisible, tipo de aislamiento, características de protección contra agentes contenidos en el líquido de trabajo, principalmente en distribución de ACS.

4.5.2.1. Tuberías con recubrimiento aislante

Para la distribución de ACS es recomendable la utilización de tuberías de cobre, acero o polímeros capaces de soportar la temperatura máxima del fluido; se debe contemplar un recubrimiento aislante para limitar pérdidas térmicas.

Las uniones de tuberías pueden ser roscadas, soldadas o embridadas, las tuberías deben además poseer una capa de pintura que provean protección anticorrosiva.

Los conductores deben ser de acero inoxidable o cobre en su totalidad para las instalaciones del tipo directo, siendo el fluido de circulación ACS; los conductores pueden ser de acero negro o galvanizado, cuando se utilicen en un circuito primario de una instalación tipo indirecto.

Lo más recomendable será lograr un dimensionamiento en el sistema de tuberías para tener una pérdida en carga unitaria, menor a 40mm columna de agua por cada metro lineal del recorrido.

4.5.2.2. Tubería cpvc

El uso mas frecuente de tubería cpvc en instalaciones termosolares ha sido en climatización de agua de piscinas; por lo general se utilizan diámetros más grandes que en otro tipo de instalación consiguiendo de esta manera un caudal mayor, además se limita la pérdida de carga y se evita la utilización de conductos de recubrimiento aislante.

4.5.3. Vaso de expansión

En los sistemas de energía termosolar existirán variaciones en la temperatura del fluido en el circuito primario, estas variaciones dan lugar a cambios en volumen y presión, afectando de esta manera la circulación del líquido.

El vaso de expansión es el componente que permitirá la regulación en el valor de presión manteniéndola constante; su función será básicamente absorber la dilatación producida por los cambios de temperatura.

Existen dos formas constructivas del vaso de expansión: vaso de expansión abierto y vaso de expansión cerrado.

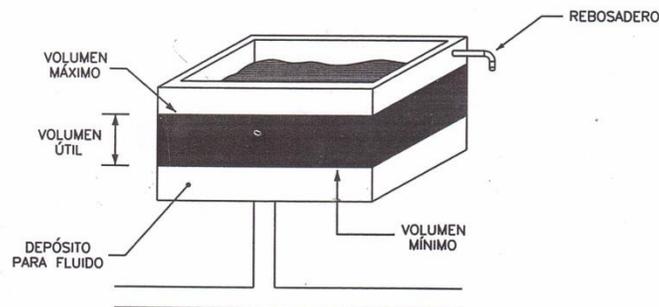
4.5.3.1. Vaso de expansión abierto

Este sistema contiene un recipiente o vaso abierto instalado en posición más elevada que la del fluido de circulación, absorbiendo de esta manera la expansión por la presión ejercida en este vaso. El volumen útil del vaso estará determinado para realizar esta acción de absorber la expansión entre

temperaturas externas; los cambios en la densidad dan lugar a variación en la masa, permitiendo su absorción.

Un vaso de expansión abierto realiza además una acción complementaria consistente en la alimentación del circuito y la purga; para el relleno se dispone una línea de alimentación automática a través de un flotador; debe contar además con una salida de rebosamiento, con diámetro mayor o igual al de la entrada de alimentación.

Figura 35. **Vaso de expansión abierto**



Fuente: PERALES, Tomas. *Guía del instalador de energías renovables*. p. 180.

4.5.3.2. **Vaso de expansión cerrado**

El vaso de expansión cerrado es un sistema absorbedor de los cambios en la presión y temperatura, está basado en una membrana o almohadilla de presión dispuesta en un recipiente cerrado.

En su parte inferior el recipiente estará ocupado por el fluido con densidad cambiante, estos cambios son absorbidos por la membrana, la parte de expansión está ocupada por aire o nitrógeno, teniendo una válvula de seguridad que limita la presión a un valor específico.

Figura 36. **Vaso de expansión cerrado**



Fuente: PERALES, Tomas. *Guía del instalador de energías renovables*. p. 181.

4.5.4. Componentes de control hidráulico

En las instalaciones termosolares el sistema hidráulico debe contar con un conjunto de válvulas para ejercer su control.

La válvula de purga debe ser tipo esfera o tipo macho, se emplea para extraer el aire atrapado en la conducción del fluido de trabajo; esta válvula se instala en lugares altos, como puede ser la salida del líquido caliente en el colector; este dispositivo puede ser de acción automática o manual.

La válvula de vacío y llenado se emplea para llenar o vaciar el fluido de trabajo en el circuito.

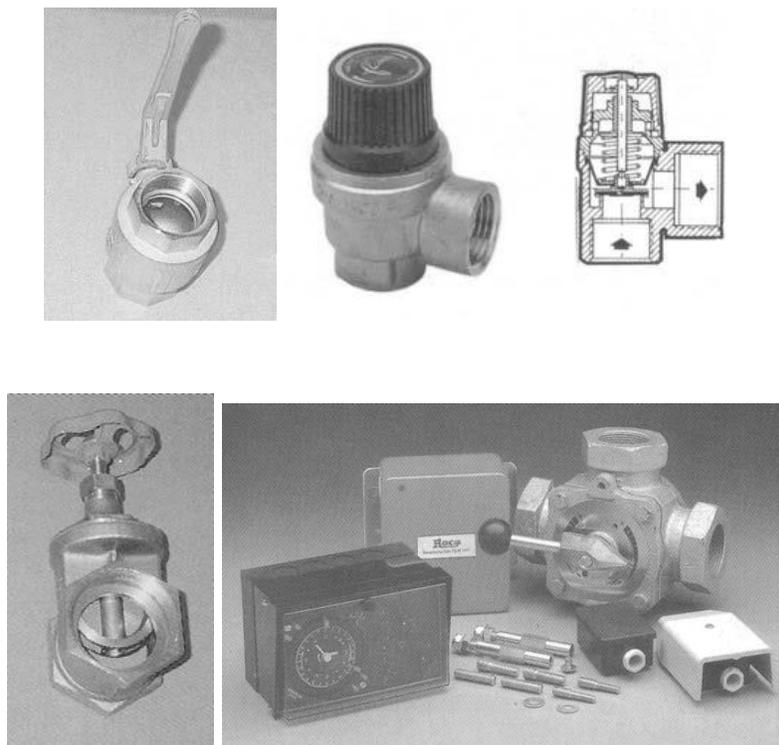
Se debe utilizar una válvula de aislamiento del tipo esfera o un tipo similar, esta se emplea para interrumpir el suministro de fluido en la entrada y salida de subsistemas, aislándolos durante operaciones de reparación y mantenimiento.

La válvula de antiretorno o retención, debe ser una válvula de disco o un tipo similar a esta, se emplea para evitar el retorno del fluido de trabajo, si la

temperatura del líquido del almacenador es superior a la temperatura del líquido en el colector, situación bastante normal en las horas con ausencia del Sol y bajas temperaturas.

En toda la extensión de las tuberías dentro del sistema termosolar es necesaria la instalación de válvulas de control con diversas funciones que pueden ser: purgado para eliminar aire atrapado, llenado y vaciado del fluido de trabajo, antiretorno en circuitos primarios.

Figura 37. **Ejemplos de válvulas utilizadas en instalaciones termosolares**



Fuente: PERALES, Tomas. *Guía del instalador de energías renovables*. p. 178.

Las condiciones para determinar las válvulas a utilizar y su relación con el circuito hidráulico son:

- Acabado superficial del asiento y obturador, debe asegurar estanqueidad y cierre, para el uso de las válvulas, estas superficies deben ser recambiables.
- El manejo de volantes y palancas deben permitir cierre y apertura sin necesidad de utilizar medios auxiliares.
- Se debe verificar la indicación en válvulas de presión nominal y el diámetro si este es menor a 25mm.
- Las válvulas de seguridad deben tener capacidad de derivar la potencia máxima del colector solar, aunque se produzca vapor, evitando se sobrepase el valor nominal del trabajo.
- Las válvulas de retención se ubicarán en tuberías de impulsión de la bomba.
- Los purgadores automáticos son constituidos por un cuerpo, una tapa de fundición de hierro o latón, flotador y asiento de acero inoxidable y obturador de goma sintética.

4.6. Instrumentos y aparatos de control en la instalación

A continuación se hace una descripción de los instrumentos utilizados, así como también los sistemas de control en una instalación.

4.6.1. Sistema de control de temperatura y presión

En instalaciones de sistemas termosolares con procedimiento de circulación forzada, es necesario incorporar un sistema de control denominado central de regulación, con el objetivo de controlar el arranque, paro y velocidad de la bomba incluida en el circuito primario; en función de diferencia de temperaturas de la salida del colector y almacenador.

Los sensores de temperatura instalados en conductos de los componentes, dan la información a la unidad de control; se puede incorporar otros sensores de temperatura que aporten al sistema de regulación los datos relativos a condiciones en la instalación, como son temperaturas promedio y registro de cantidad de calor.

4.6.1.1. Aparatos de regulación

La central de regulación es el medio electrónico utilizado para la regulación de temperatura del líquido almacenado para su consumo, las funciones asignadas a este componente son:

- Establecer el control en estados de arranque, paro y velocidad de la bomba de circulación en el circuito primario, en función del diferencial en las temperaturas de valor preestablecido entre la salida del colector y el almacenador; además se puede limitar la temperatura máxima alcanzada por el líquido del depósito de ACS.
- Accionar un sistema auxiliar de apoyo si la instalación termosolar no puede aportar la energía térmica necesaria para el consumo.

Este componente también es denominado termostato diferencial, debido a la acción controladora en dependencia del diferencial de temperaturas que puede ser programado.

Normalmente la central de regulación arranca la bomba de circulación, cuando la temperatura de salida del líquido de circuito primario del colector solar es superior a la temperatura del almacenador de energía, en un rango denominado diferencial de arranque comprendido de 4 a 6°C; y la interrumpe cuando se obtiene un rango de temperatura de 2 a 4°C, denominado este rango como histéresis.

Las centrales de regulación para el objetivo propuesto deben contar con un microcontrolador, además de una memoria interna o externa a ese componente, para contener los parámetros en su configuración inicial, como el valor del diferencial en las temperaturas y otros datos como las temperaturas de diversas localizaciones y tiempos, el cómputo energético promedio de la instalación.

La central de regulación básica está compuesta generalmente por cuatro secciones siendo estas:

- Teclado local, en donde se introducen parámetros como temperaturas de diferencial de arranque y diferencial de interrupción de la bomba.
- Pantalla de visualización local, puede estar formada por un conjunto de leds unitarios, por un LCD o dispositivo similar de una o dos filas de caracteres, o bien una combinación de ambos componentes.
- Entrada de tensión analógica procedente de termopares utilizados como sondas de temperatura; pueden ser dos o tres en las instalaciones de un

solo colector y un almacenador; mientras que puede contener cinco o más en instalaciones de varios colectores y almacenadores.

- Salida básica para ejercer control en la bomba de circulación, y salida complementaria para la activación del sistema auxiliar de apoyo.

Figura 38. **Ejemplo de central de regulación**



Fuente: SALVADOR ESCODA. S.A. *Manual técnico energía solar térmica*. p. 34.

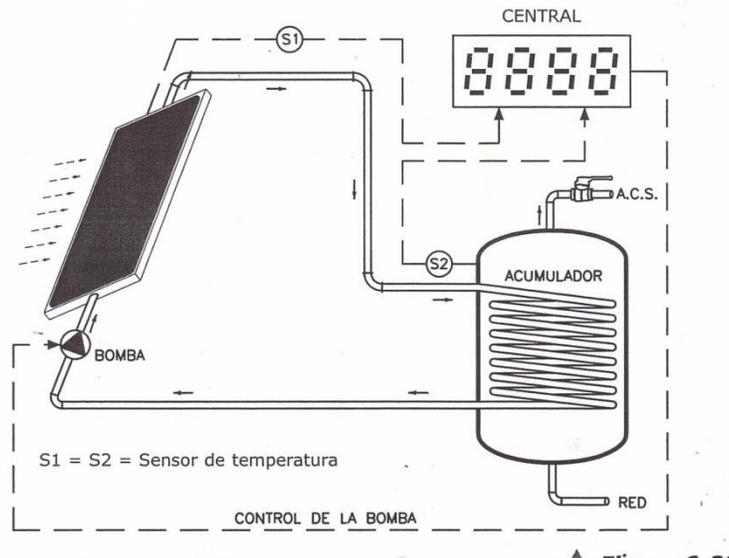
Las centrales de regulación de mayor complejidad, utilizadas en instalaciones grandes, están basadas en conjuntos de colectores y almacenadores; se puede incorporar la entrada especial de un sensor de radiación solar, este será empleado para control y comunicación con un sistema de información programado para monitorear datos de servicio, puede además introducirse parámetros de definición en condiciones de funcionamiento.

4.6.1.2. Sensores de temperatura

En las instalaciones termosolares, los sensores utilizados para el registro de temperatura normalmente son los termopares, se caracterizan por tener un recubrimiento de platino para inmersión del líquido a través de una vaina, proporcionando una tensión de nivel dependiente de la temperatura.

Estos componentes se conectan a la central de regulación a través de cables separados de los de la red, deben ser apantallados preferentemente, debido al reducido nivel de tensión proporcionado por los sensores con un rango situado en los milivoltios.

Figura 39. **Ubicación recomendada de sensores de temperatura**



Fuente: PERALES, Tomas. *Guía del instalador de energías renovables*. p. 168.

El sensor funciona por el principio de Seebeck, este es un efecto termoeléctrico, consiste en la conversión directa de la diferencia de temperatura a voltaje eléctrico y viceversa; un dispositivo termoeléctrico crea un voltaje cuando hay una diferencia de temperatura a cada lado, por el contrario cuando se le aplica un voltaje, crea una diferencia de temperatura.

Un sensor está formado por un termopar de cobre-constan, cromo-constan, hierro-constan u otros compuestos, deben estar inmersos en una capsula protectora con elementos de fijación, donde están dispuestas las dos conexiones eléctricas de salida.

4.6.1.3. Instrumentos unitarios de medida

La instalación termosolar debe disponer en puntos seleccionados del recorrido, en los que se considere necesario determinar el valor de temperatura existente a efectos de control manual.

Actualmente existe diversidad de instrumentos de medición de temperatura para inmersión con vaina, el más utilizado es el tipo capilar usado en tuberías; además se utilizan manómetros del mismo tipo en la medición de la presión del fluido.

Los rangos aconsejables en la selección de los instrumentos de medida de temperatura y presión para estas instalaciones son:

- Termómetro, 0 a 120°C, utilizado para la medición de la temperatura en colectores y almacenadores energéticos.
- Manómetro, 0 a 6 kg/cm², para medir la presión del fluido en el circuito cerrado, comprobando de esta manera el proceso de llenado y el funcionamiento del sistema de expansión.

5. PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS Y CÁLCULO PARA DETERMINAR FUNCIONAMIENTO Y EFICIENCIA DE LOS COMPONENTES A IMPLEMENTAR EN SISTEMAS ENERGÉTICOS TERMOSOLARES

5.1. Descripción del funcionamiento y proceso en los dispositivos, aparatos y accesorios en la instalación de sistemas energéticos termosolares

Las consideraciones planteadas en el diseño de sistemas de calentamiento de agua, se pueden ampliar a sistemas de calefacción y refrigeración solar; los elementos constructivos básicos de los calentadores de agua solares más corrientes son, el colector de placa plana y el depósito de almacenamiento.

Los colectores se conectan para cubrir una carga, estos generalmente disponen de energía auxiliar, y se tienen que incluir los medios para la circulación de agua y el control del sistema.

Un esquema práctico es un sistema de circulación natural; en este dispositivo el depósito está situado por encima del colector, y el agua circula por convección natural siempre que la energía solar en el colector aporte la suficiente energía al agua que asciende por el mismo, estableciéndose así un gradiente de densidades que provoca el movimiento del fluido por convección natural.

La energía auxiliar se aplica en la parte superior del depósito, y tiene como misión mantener el agua caliente en esta zona del depósito, a un nivel de temperatura mínimo, necesario y suficiente para cubrir las cargas y mantener la circulación.

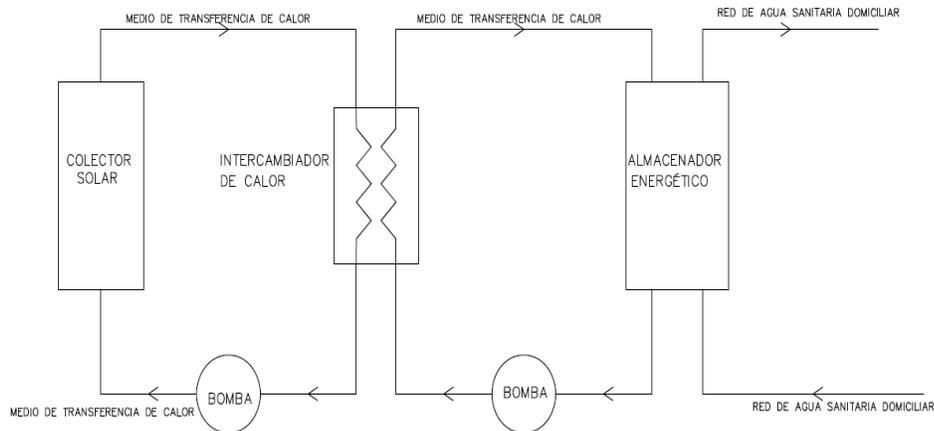
Existen otros esquemas, con agua en circulación forzada, en los que no es necesario colocar el depósito por encima del colector, aunque sí es necesaria una bomba, que generalmente va controlada por control diferencial que la acciona y pone en marcha cuando la temperatura detectada por un sensor colocado a la salida del colector, está varios grados por encima de la temperatura del agua en la parte inferior del depósito.

También es necesaria una válvula de retención para evitar que se produzca una circulación inversa durante los períodos de inactividad del colector, incluida la noche, y las correspondientes pérdidas térmicas nocturnas. En estos esquemas se muestra que la energía auxiliar se aporta al agua, entre la salida del depósito de almacenamiento y la carga.

Es recomendable utilizar un líquido para transferir calor al colector; comparados con los sistemas que utilizan aire como medio de transferencia, los que emplean líquido ofrecen más flexibilidad de uso.

Existen calentadores de diseño único, por lo que funcionan tanto en convección natural como forzada, mientras que los calentadores domésticos pequeños funcionan en régimen de circulación natural y los de mayor tamaño en régimen de circulación forzada.

Figura 40. **Diagrama de flujo de los componentes de un sistema energético termosolar**



Fuente: elaboración propia con AutoCAD 2012.

5.2. Análisis de propiedades termodinámicas para colectores solares

A continuación se presentan modelos matemáticos que sirven para el análisis de las propiedades termodinámicas para colectores solares.

5.2.1. Ecuaciones utilizadas para el balance energético

Mediante un balance energético se puede hallar la distribución de la energía solar incidente sobre un colector de placa plana, su transformación en energía útil y las pérdidas térmicas. Este balance energético se puede expresar en la siguiente forma:

- Ecuación 5.1. Balance energético del colector solar plano

$$A * I_o * t_s * \alpha_{sp} = Q_u + q_{p\acute{e}rdidas} + q_{almacenada} = A * k * I_s * \alpha_s$$

En la que:

A : es la superficie del colector, igual en la cubierta que en la placa absorbente.

k : es un factor de conversi3n de la radiaci3n tanto difusa como directa, que sirve para evaluar la energa solar incidente en el plano del colector.

t_s : es el factor de la transmitancia solar efectiva de la cubierta del colector.

α_{sp} : es la absortancia solar de la placa absorbente del colector.

Q_u : es el calor 3til que se transfiere al fluido refrigerante que circula por el colector solar, expresado mediante la siguiente ecuaci3n:

- Ecuaci3n 5.2. Cantidad de calor 3til

$$Q_u = G_F * c_{pF} (T_{salida} - T_{entrada}) = C_{col} (T_{salida} - T_{entrada})$$

G_F : consumo de fluido en un tiempo especificado

c_{pF} : calor espec3fico del fluido de trabajo

C_{col} : capacidad calor3fica del fluido del colector

$q_{p\acute{e}rdidas}$: es la cantidad de calor perdida desde la placa absorbente del colector al medio exterior, tanto por convección, como por conducción y radiación.

$q_{almacenada}$: se refiere a la cantidad de energía almacenada en el colector.

I_s : es la energía solar incidente I_s sobre la placa absorbente, viene dada por la siguiente expresión:

- Ecuación 5.3. Expresiones para calcular energía solar incidente

$$I_s = I_o * \tau_s$$

$$I_s * \alpha_s = I_o * (\tau * \alpha)_s$$

En la que $(\tau * \alpha)_s$ se calcula para la radiación directa con el ángulo real de incidencia, mientras que la radiación difusa se considera como si fuese directa, pero con un ángulo de incidencia promedio de 60°.

El rendimiento o eficiencia del colector " η_c " que proporciona una medida de su funcionamiento se define como:

- Ecuación 5.4. Eficiencia energética del colector solar plano

$$\eta_c = \frac{\text{Ganancia útil durante un período de tiempo}}{\text{Energía solar incidente en el mismo período}} = \frac{\int_{t_0}^{t_1} q_u dt}{\int_{t_0}^{t_1} (A * I_o) dt}$$

Para obtener un resultado representativo, en cuanto a medición del rendimiento se debe calcular un parámetro medio, por ejemplo todo un día de funcionamiento.

Se debe cuantificar el rendimiento óptimo del colector con un coste mínimo del mismo, lo que implica el tener que diseñar colectores con una eficiencia inferior a la tecnológicamente posible, que reduzca el costo de forma significativa.

Este método tiende a ser pesado y laborioso, por lo que generalmente se recurre a otra formulación en la que se consideran algunas simplificaciones, en régimen permanente.

Un balance de energía en los colectores planos, tiene como objetivo determinar el calor útil transmitido al agua para establecer la eficiencia del calentador solar. El calor útil $q_{\text{útil}}$, empleado para calentar el agua del depósito de almacenamiento, es una parte de la radiación global H_T incidente sobre el colector solar A_e ; la otra parte es calor disipado al ambiente: por el colector solar q_{cs} , por el depósito de almacenamiento q_{da} y por las conexiones q_{cx} . Este balance de energía se expresa analíticamente como:

- Ecuación 5.5. Balance energético del colector solar plano

$$H_T * A_e = q_{\text{util}} + q_{cs} + q_{da} + q_{cx}$$

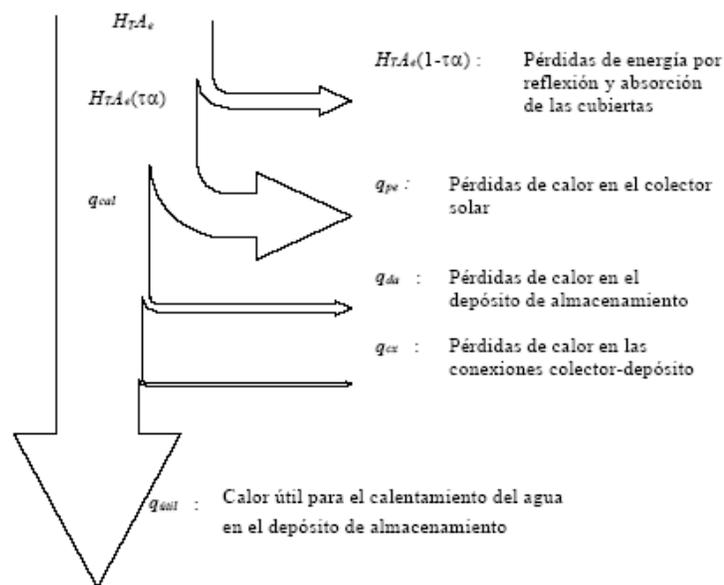
El calor útil introducido en la ecuación está representado por el flujo de agua m en el calentador y las temperaturas de entrada y salida del depósito de almacenamiento T_{fe} y T_{fs} respectivamente.

- Ecuación 5.6. Calor útil en el depósito de almacenamiento

$$q_{\text{útil}} = m \times C_p \times (T_{fe} - T_{fs})$$

El agua se considera un elemento útil, de bajo costo y fácilmente disponible para el almacenamiento de calor sensible, en forma de agua caliente sanitaria o agua para calefacción.

Figura 41. **Balance energético de un colector solar plano**



Fuente: FERNÁNDEZ DIEZ, Pedro. *Termodinámica técnica*. p. 1-2.

La energía térmica solar se aplica al caudal G que circula por el colector y se extrae mediante un flujo másico m de agua sanitaria o calefactora en la unidad de almacenamiento, en donde se produce el intercambio térmico entre dichos fluidos.

Si los sistemas están bien diseñados, los costos por bombeo son pequeños, de fácil cálculo, con operación sencilla; tanto las unidades de almacenamiento de agua, como el colector, pueden funcionar en circulación natural o forzada.

5.2.2. Pérdidas de calor en colectores

El valor de las pérdidas $q_{pérdidas}$ de calor se puede expresar en función del coeficiente global de transmisión de calor de las pérdidas de calor del colector U_c ; si se conoce U_c y si la placa del colector está a una temperatura media el valor de $q_{pérdidas}$ se puede utilizar, en la forma:

- Ecuación 5.7. Pérdidas en colectores solares planos

$$q_{pérdidas} = U_c * A(T_{promedio} - T_{ambiente})$$

Un modelo adecuado de análisis térmico de un colector de placa plana puede considerar las siguientes hipótesis:

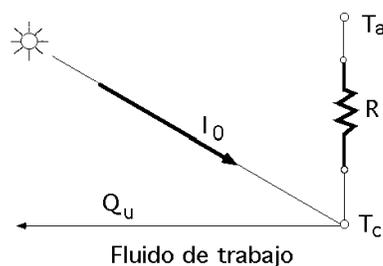
- El colector está térmicamente aislado en estado estacionario.
- La diferencia de temperatura entre la parte superior e inferior de la placa es despreciable.

- El flujo térmico se considerará monodimensional, tanto a través de las cubiertas, como de los aislamientos laterales.
- Los cabezales que conectan los tubos cubren solamente una pequeña superficie de la placa colectora y proporcionan un flujo térmico uniforme a los tubos.
- El cielo se puede considerar como una fuente térmica equivalente a un cuerpo negro, en lo que respecta a la radiación infrarroja, a una temperatura del cielo equivalente.

La radiación $I_s = I_o * t_s$, sobre la placa plana absorbente del colector se supone uniforme.

La distribución de temperaturas sobre el colector de placa plana se puede representar mediante el circuito térmico aproximado que se presenta en la figura, donde la placa colectora absorbe una energía incidente igual a $\alpha_s * I_s * k$.

Figura 42. **Distribución de energía solar incidente sobre colectores solares**



Fuente: FERNÁNDEZ DIEZ, Pedro. *Termodinámica técnica*. p. III-63.

5.2.3. Coeficientes de transferencia de calor por convección utilizados en colectores solares planos

El coeficiente de transferencia de calor entre placas planas paralelas es proporcional a la separación de estas elevadas a la potencia, $3n - 1$, siendo n el exponente de las ecuaciones de Nusselt siguientes:

Placas horizontales, con flujo de calor ascendente,

$$10E4 < Gr < 10E7; Nu = 0,152 (Gr)^{0,281}$$

Placas hasta 45° , con flujo de calor ascendente,

$$10E4 < Gr < 10E7; Nu = 0,093 (Gr)^{0,31}$$

Planos verticales,

$$1,5 \times 10^4 < Gr < 1,5 \cdot 10^5; Nu = 0,033 (Gr)^{0,381}$$

$$1,5 \times 10^5 < Gr < 10^7; Nu = 0,062 (Gr)^{0,327}$$

El exponente n es del orden de $1/3$ por lo que la dependencia del coeficiente U_{c1} hacia arriba, con la separación entre placa y cubiertas es muy pequeña. Por lo que respecta a la inclinación, se puede calcular el valor de U_c para una inclinación cualquiera y a partir del valor de U_c para una inclinación de 45° , φ siendo la inclinación del colector en grados y ε_p la emitancia de la placa., en la forma:

- Ecuación 5.8. Valor del coeficiente de transferencia U_c para colectores planos

$$\frac{U_c}{U_{c45^\circ}} = 1 - (\varphi - 45)(0.00259 - 0.00144 \varepsilon_p)$$

5.2.4. Distribución de temperaturas en los tubos

Si se considera la disposición de tubos que se indica en la siguiente figura, donde se encuentran separados una distancia L , con un espesor de placa e y anchura a unidad y diámetro exterior de los tubos d_e .

En lo anterior se ha denominado T_p a la temperatura de la placa que se ha supuesto constante; sin embargo, al introducir el sistema de tubos separados una distancia L se produce en la placa un flujo de calor desde la mitad de esa distancia hacia cada tubo que será captado por estos, lo que hace que a lo largo de la placa en tramos correspondientes a dos tubos consecutivos, la temperatura de la placa sea variable.

Como el material de la placa metálica es un buen conductor del calor, el gradiente de temperaturas a través de la misma será despreciable; si se conoce la temperatura T_b en la unión del tubo con la placa, la región entre la línea central que divide a la placa entre dos tubos por la mitad y la base de estos, se puede considerar como una aleta térmicamente aislada en su extremo libre. Para un elemento de aleta de superficie, $a * \Delta x$ la energía absorbida es:

- Ecuación 5.9. Energía absorbida en colectores planos

$$(I_s * \alpha_s) * a * \Delta x = E_{absorbida}$$

El flujo térmico se dirige de la placa hacia los tubos, y no a la inversa, como sucede en el estudio general de aletas, pudiéndose hacer el siguiente balance térmico, con $\Omega = a * e$, representando la sección transversal de la placa.

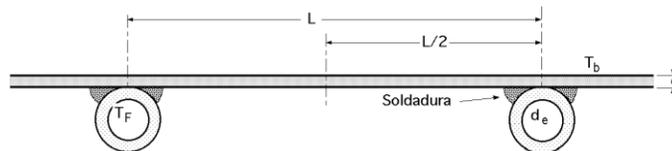
- Ecuación 5.10. Balance térmico en tubos del colector solar

$$Q = k * \Omega * \left(\frac{dT}{dx}\right) x$$

- Ecuación 5.11. Diferencial de flujo de calor obtenido del balance térmico

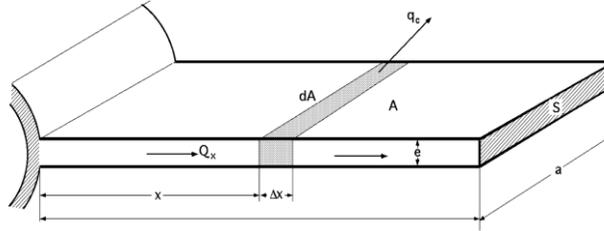
$$\left(\frac{dq}{dx}\right) \Delta x = k * \Omega * \left(\frac{d^2T}{dx^2}\right) \Delta x$$

Figura 43. Unión de los tubos a placa



Fuente: FERNÁNDEZ DIEZ, Pedro. *Termodinámica técnica*. p. III-64.

Figura 44. **Aleta de colector solar con sección transversal uniforme**



Fuente: FERNÁNDEZ DIEZ, Pedro. *Termodinámica técnica*. p. III-64.

Las pérdidas de calor transmitidas por convección al exterior, a través del elemento de superficie $a * \Delta x$, vienen dadas por:

- Ecuación 5.12 Pérdidas de calor transmitidas por convección al exterior

$$q_c = U_c * (a * \Delta x) * (T - T_a) = U_c * (\Delta x) * (T - T_a)$$

Siendo U_c la conductancia global a través de las cubiertas, entre la placa y el aire ambiente. El balance energético para, $a = 1$, es:

- Ecuación 5.13. Balance energético para $a = 1$

$$(I_s * \alpha_s) * \Delta x - U_c * (\Delta x) * (T - T_a) + k * \Omega * \left(\frac{d^2 T}{dx^2} \right) \Delta x = 0$$

$$\left(\frac{d^2 T}{dx^2} \right) \Delta x = \left(\frac{U_c}{k * \Omega} \right) * (T - T_a) - \left(\frac{I_s * \alpha_s}{k * \Omega} \right) = \left(\frac{U_c}{k * \Omega} \right) * (T - T_a) \left(\frac{I_s * \alpha_s}{U_c} \right)$$

Algunos valores típicos de los parámetros que determinan el factor de eficiencia del colector F, en el caso de un colector de placa plana utilizando el sistema internacional, son incluidos en la siguiente tabla:

Tabla VII. **Parámetros para determinar factor de eficiencia en colectores planos**

PARÁMETROS PARA DETERMINAR FACTOR DE EFICIENCIA EN COLECTORES PLANOS	
Uc usando dos cubiertas de vidrio	4 W/m ² °C
Uc usando una cubierta de vidrio	8 W/m ² °C
k (Placa de cobre de 1 mm de espesor)	0.4 W/°C
k (Placa de acero de 1 mm de espesor)	0.005 W/°C
hcF (Agua en flujo laminar, convección forzada)	300 W/m ² °C
hcF (Agua en flujo turbulento, convección forzada)	1500 W/m ² °C
hcF (Aire en convección forzada turbulenta)	100 W/m ² °C

Fuente: FERNÁNDEZ DIEZ, Pedro. *Termodinámica técnica*. p. III-72.

El factor de eficiencia F crece al aumentar el espesor de la placa y la conductividad térmica de la misma; decrece al aumentar la distancia entre los conductos de flujo. Un aumento de Uc hace que F disminuya.

Existe además el factor de evacuación de calor del colector FR, definido como el cociente de la velocidad real de transferencia de calor al fluido de trabajo y la velocidad de transferencia térmica a la máxima diferencia de temperaturas entre el fluido absorbente del colector y el medio ambiente, mediante la relación:

- Ecuación 5.14. Relación para obtener factor de evacuación de calor del colector FR

$$FR = \frac{\text{Ganancia energética útil del colector}}{\text{Ganancia energética útil si la superficie del colector con } T_{f1}}$$

El límite termodinámico del denominador corresponde a la condición de que el fluido de trabajo permanezca a la temperatura T_{f1} de entrada en todo el colector, valor al que se puede aproximar cuando la velocidad de entrada sea muy grande; la temperatura del fluido aumenta en la dirección del flujo a medida que se le va suministrando calor. El factor FR se obtiene mediante la siguiente ecuación:

- Ecuación 5.15. Factor de evacuación de calor del colector FR

$$FR = \frac{G_{fluido} * C_{pF} * (T_{f2} - T_{f1})}{(I_s * \alpha_s) - U_c * (T_{f1} - T_a)}$$

Siendo G_{fluido} el flujo másico por unidad de superficie y C_{pF} el calor específico del fluido; la ganancia total de energía útil del colector se expresa con la ecuación:

- Ecuación 5.16. Ganancia total de energía útil

$$Q_u = A_{col} * FR * [(I_s * \alpha_s) - U_c * (T_{f1} - T_a)]$$

Calculándose esta ganancia de energía útil en función de la temperatura T_{f1} de entrada del fluido, que normalmente es un dato. En general la eficiencia del colector se define en la forma:

- Ecuación 5.17. Eficiencia del colector plano

$$\eta = \frac{Q_u}{(A_{col} * I_s)}$$

$$\eta = FR \left[\alpha_s - \left(\frac{U_c * (T_{f1} - T_a)}{I_s} \right) \right]$$

5.2.5. Tipos de captadores y sus aplicaciones

Un captador queda definido por dos parámetros $FR \alpha_s$ y $FR U_c$, estando sus márgenes de variación comprendidos entre los valores que se indican a continuación, siempre que se cumpla que la capacidad calorífica del fluido, $(G \cdot cp) F > 50 \text{ Kcal/h m}^2\text{°C}$ y que la velocidad del viento sea menor de 2 m/seg.

Colectores sin caja, sin aislamiento y sin cubiertas, generalmente de plástico, $0,85 < FR \alpha_s < 0,90$; $16 < FR U_c < 20$, (W/°C cm^2) que se utiliza cuando, $DT = T_f - T_a < 15\text{°C}$, en el siguiente tipo de instalaciones:

- Calentamiento de piscinas abiertas; como fuente fría en una bomba de calor; en procesos industriales, etc.
- Colectores con caja, aislamiento y una cubierta transparente, $0,75 < FR \alpha_s < 0,85$; $7 < FR U_c < 9$, (W/°C cm^2)

- Colectores con caja, aislamiento, una cubierta transparente y superficie absorbente selectiva. $0,75 < FR_{Is} < 0,85$; $5 < FR_{UC} < 6$, ($W/^\circ C \text{ cm}^2$)
- Captadores con caja, aislamiento y dos cubiertas transparentes. $0,7 < FR_{Is} < 0,8$; $4 < FR_{UC} < 6$, ($W/^\circ C \text{ cm}^2$)

Los grupos II y III se utilizan cuando, $10 < DT < 40$ °C, en instalaciones de: agua caliente sanitaria, calefacción en climas templados, usos agrícolas, procesos industriales, etc.

Los Grupos III y IV se utilizan en instalaciones de, agua caliente sanitaria, calefacción en climas fríos, procesos industriales, etc.

5.2.6. Temperatura promedio en colectores

A continuación se presentarán las ecuaciones que determinan la temperatura promedio en colectores.

5.2.6.1. Temperatura promedio en régimen estacionario

Para poder evaluar el rendimiento del colector hay que conocer, que es función de la temperatura de la placa.

La temperatura media de la placa T_p siempre será superior a la temperatura media del fluido T_F . Esta diferencia de temperaturas es, generalmente pequeña, para sistemas de líquidos y significativa para sistemas de aire. Se pueden relacionar T_p y T_F mediante la ecuación:

- Ecuación 5.18. Temperatura media del colector

$$T_p = T_F + (q_u * R_{pF})$$

En la que R_{pF} es la resistencia a la transferencia de calor entre la placa y el fluido, que depende del coeficiente de transferencia de calor por convección.

Para un colector de tubos y aletas, esto supone que tanto la conductancia de la unión, como la eficiencia de la aleta, sean altas, para un líquido que circula por el interior de una tubería, el valor de la resistencia a la transferencia de calor entre la placa y el fluido R_{pF} tomando como n el número de tubos y a la longitud de los mismos, se calcula mediante la siguiente ecuación.

- Ecuación 5.19. Valor de resistencia a la transferencia del calor

$$R_{pF} = \frac{1}{h_{cF1} * \pi * d_i * n * a}$$

En un sistema de acondicionamiento de aire, el coeficiente R_{pF} es la inversa del coeficiente h_{cF1} de transferencia de calor de la placa al aire, multiplicada por la superficie lateral del colector:

- Ecuación 5.20. Resistencia a la transferencia del calor para un sistema de acondicionamiento de aire

$$R_{pF} = \frac{1}{h_{cF1} * A_{lat}}$$

La temperatura media del fluido se puede calcular a partir de la ecuación:

- Ecuación 5.21. Temperatura media del fluido

$$T_F = \frac{1}{L} \int_0^{\infty} T_{Fx} dx = T_{F1} + \frac{\left(\frac{Q_u}{A}\right)}{(U_c * F_R)} * \left(1 - \frac{F_R}{F}\right) = \frac{T_{F1} + T_{F2}}{2}$$

La temperatura media de la placa varía ligeramente a medida que Q_u se modifica a lo largo del día, siendo su influencia en U_c relativamente pequeña.

5.2.6.2. Temperatura promedio en régimen transitorio

El funcionamiento de la mayoría de los sistemas de energía solar es en régimen transitorio, debido a dos factores:

- A que el colector se calienta desde el amanecer hasta alcanzar una temperatura de funcionamiento, más o menos uniforme, a media tarde.
- A las variaciones de la radiación solar debidas a la meteorología y al viento. Para un colector de una sola cubierta y suponiendo que, I_s as, y T_a permanecen constantes en un período de tiempo, por ejemplo, $t = 1$ hora, la temperatura T_p de la placa se puede obtener a partir de la ecuación 5.18.

5.3. Determinación del rendimiento energético de los dispositivos captadores, almacenadores y distribuidores de energía termosolar

La ecuación utilizada para determinar la cantidad de calor en el depósito de almacenamiento es la siguiente:

- Ecuación 5.22. Cantidad de calor del depósito de almacenamiento

$$Q_{dep} = (m * C_p)_{dep} * (T_{dep} - T_{serv}) = C_{dep}(T_{dep} - T_{serv})$$

Siendo:

Q_{dep} la cantidad de calor producida por la diferencia de temperaturas entre el depósito.

$(T_{dep} - T_{serv})$ es la diferencia entre la temperatura de servicio a través de un flujo másico de agua de agua m y el respectivo valor de calor específico C_p .

El balance energético sobre el depósito de almacenamiento sirve para predecir la temperatura en función del tiempo; haciendo un balance energético sobre el depósito sin estratificar, la variación de energía interna del sistema tiene que ser igual a la suma de los calores y cargas que intervienen en el sistema, expresando el balance energético a través de la siguiente ecuación:

- Ecuación 5.23. Balance energético del depósito de almacenamiento

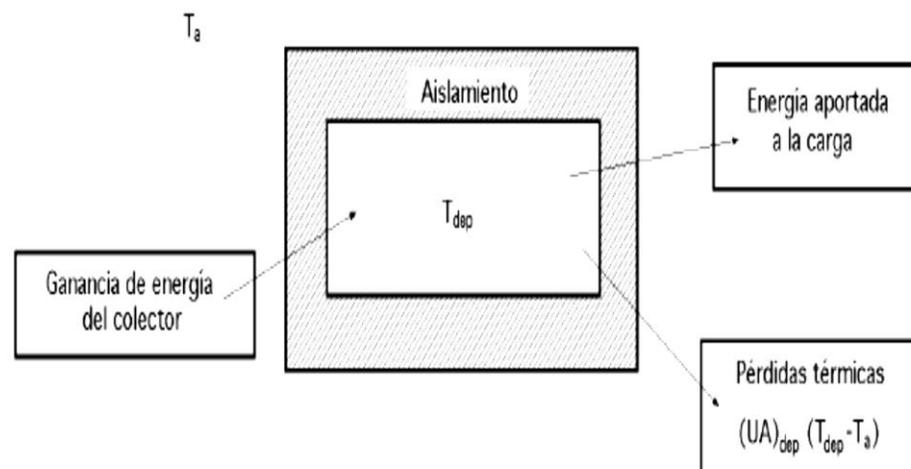
$$C_{dep} \left[\frac{dT_{dep}}{dt} \right] = Q_{col} - P - (U * A)_{dep} * (T_{dep} - T_a)$$

- Ecuación 5.24. Cantidad de calor del colector para el balance energético del depósito de almacenamiento

$$Q_{col} = C_{col}(T_{c2} - T_{dep})$$

Donde C_{col} es la capacidad calorífica del fluido que circula por el colector y T_{c2} es la temperatura del fluido caliente a la salida del mismo. El gasto másico G que circula por el colector puede ser accionado o no por una bomba.

Figura 45. **Balance energético en el depósito de almacenamiento**



Fuente: FERNÁNDEZ DIEZ, Pedro. *Termodinámica técnica*. p. I-2.

Si se supone que la tubería que conecta el colector con el depósito de almacenamiento está bien calorifugada, se puede despreciar la caída de temperatura del fluido a lo largo de ella. Con esta interpretación se puede considerar:

- Ecuación 5.25. Cantidad de calor del colector utilizando la función de control F

$$Q_{col} = F * C_{col}(T_{c2} - T_{dep})$$

En la que F es una función de control, cuyo valor oscila entre 1 cuando la bomba está funcionando y 0 en otras circunstancias. La función de control F proporciona las posiciones de marcha o parada del sistema de control de la bomba, que la acciona cuando $TC2$ es mayor que T_{dep} , es decir, cuando se puede aplicar energía a la unidad de almacenamiento; en estas circunstancias, la velocidad de flujo másico en cualquier momento es, $F G$.

Para una carga determinada se pueden presentar relaciones en donde los resultados conforman un sistema de ecuaciones, de forma que Q_{dep} viene determinado por la ecuación del rendimiento del colector y P por las exigencias de la carga. Estas ecuaciones se resuelven para obtener tanto la temperatura T_{dep} como las variaciones de energía en función del tiempo; también se puede incluir la energía auxiliar añadiéndola al depósito o al caudal que sale del mismo hacia la carga.

Los depósitos de agua pueden funcionar también con diversos grados de estratificación, es decir, cuando el agua no está a una temperatura uniforme, lo que origina densidades distintas estratificadas; esto hace que según el agua vaya entrando busque su propio nivel de densidad, siempre que entre a baja velocidad. Si se considera un depósito de dos secciones, para la superior se puede hacer el siguiente balance energético:

- Ecuación 5.26. Balance energético en la primera sección de almacenamiento (depósito 1)

$$\frac{dT_{dep1}}{dt} = \frac{F_1 * C_{col}(T_{c2} - T_{dep1}) + C_L(T_{dep2} - T_{dep1}) - (U * A)_{dep1} * (T_{dep1} - T_a)}{C_{dep1}}$$

El primer sumando, colocado entre paréntesis representa ganancia del colector, multiplicada por una función de control F1 que:

Es 1 cuando T_{c2} es superior a T_{dep1}

Es 0 cuando T_{dep1} es mayor que T_{c2} y esta mayor que T_{dep2}

El segundo sumando representa la carga suministrada por la sección superior del depósito; el retorno de la carga para este sistema de almacenamiento, siempre se hará a la sección inferior. La carga total esta expresada por la ecuación 5.27.

- Ecuación 5.27. Carga total del depósito de almacenamiento 1

$$(m * C_p)_L * (T_{dep1} - T_{Lret}) = C_L(T_{dep1} - T_{Lret})$$

Como se está suponiendo, un depósito de almacenamiento seccionado o estratificado las ecuaciones para determinar la carga suministrada se expresa mediante las siguientes ecuaciones:

- Ecuación 5.28. Carga suministrada parte superior del depósito

$$(m * C_p)_L * (T_{dep1} - T_{dep2}) = C_L(T_{dep1} - T_{dep2})$$

- Ecuación 5.29. Carga suministrada parte inferior del depósito

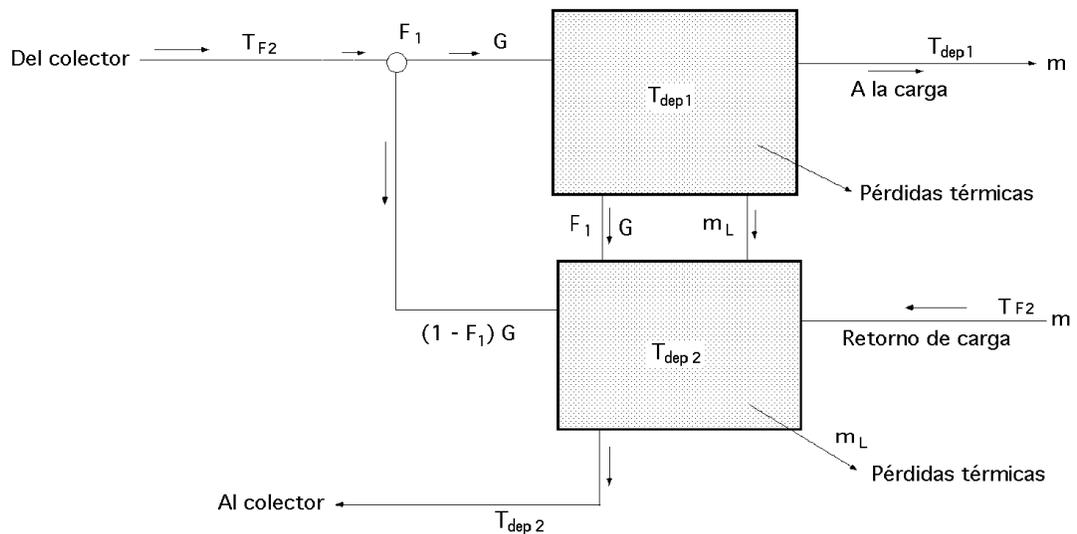
$$(m * C_p)_L * (T_{dep2} - T_{Lret}) = C_L(T_{dep2} - T_{Lret})$$

El balance energético en la segunda sección del tanque se expresa mediante la siguiente ecuación:

- Ecuación 5.30. Balance energético del depósito 2

$$\frac{dT_{dep2}}{dt} = \frac{F_1 * C_{col}(T_{dep1} - T_{dep2}) + (1 - F_1)C_{col}(T_{c2} - T_{dep2}) - (U * A)_{dep2} * (T_{dep2} - T_a)}{(m * C_p)_{dep2}}$$

Figura 46. Diagrama sistema termosolar con 2 depósitos de almacenamiento



Fuente: FERNÁNDEZ DIEZ, Pedro. *Termodinámica técnica*. p. V-118.

Lo anteriormente descrito se puede generalizar para un almacenamiento de n secciones, si se definen dos funciones de control, una para el lado del colector y otra para el lado de la carga.

La eficiencia del intercambiador de calor se define como la relación entre la transferencia real de calor y el valor máximo teórico que se logra con un intercambiador de tamaño infinitamente grande. La eficiencia se expresa mediante la ecuación:

- Ecuación 5.31. Eficiencia del intercambiador de calor.

$$\frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_3} = E$$

Siendo:

E Eficiencia del intercambiador de calor expresada en valor fraccionario

T_1 temperatura de alimentación a la entrada del intercambiador

T_2 temperatura de alimentación a la salida del intercambiador

T_3 temperatura secundaria a la entrada del intercambiador

En un intercambiador de calor de contraflujo, en el que el intercambiador es lo suficientemente grande para que $T_2 = T_3$, la eficiencia será igual a 1; lo que puede expresarse en relación porcentual con valor de $E = 100$. Este tipo de intercambiador de calor no debe tener resistencia al flujo de calor; en la realidad un intercambiador con tales características no puede construirse, las paredes del intercambiador provocan resistencia en el flujo de calor.

Para una configuración del intercambiador distinta a la de contraflujo o la de serpentín en el tanque, T_3 nunca podrá aproximarse a T_2 ; en un intercambiador de flujo mixto T_2 tiene que ser un promedio de T_3 y T_4 ; en un intercambiador de flujo paralelo el valor de T_2 no puede ser en ningún caso inferior a la temperatura más alta de la sustancia secundaria.

La eficiencia con la cual funciona el colector la determina la temperatura de entrada al colector en el caso de la configuración dada T_2 , la eficiencia disminuye si esta temperatura aumenta, lo más recomendable es que la temperatura T_2 se mantenga lo más próxima a T_3 .

Cuando se utiliza el diseño del circuito de colector a depósito es aplicable la relación establecida en la ecuación descrita para la eficiencia del intercambiador de calor.

Para el diseño de intercambiador de colector a depósito el intercambiador de contraflujo ofrece eficiencia excelente; un intercambiador de flujo mixto será menos eficiente, mientras que el intercambiador de flujo paralelo será el menos eficiente.

La diferencia de temperatura a través del colector se puede comparar con la diferencia que existe entre la entrada del colector y la salida del tanque de almacenamiento; esto genera una relación llamada Factor de elevación del colector.

El factor de elevación del colector FEC describe la elevación de temperatura entre la entrada del colector y la salida del tanque de almacenamiento, en relación con la elevación de temperatura que tiene lugar a través del colector. La ecuación que expresa el factor de elevación del colector es la siguiente:

- Ecuación 5.32. Factor de elevación del colector

$$FEC = \frac{T_2 - T_3}{T_1 - T_2}$$

Para determinar dimensiones del intercambiador de calor en el diseño del circuito de depósito a carga, se deben determinar primero ciertas condiciones de operación y características del serpentín; las condiciones de operación las determinan las necesidades del edificio y la temperatura de diseño del sistema

terminal o de distribución. La eficiencia del intercambiador de calor de carga se calcula mediante una ecuación similar a la que se utiliza para la unidad del colector:

- Ecuación 5.33. Eficiencia del intercambiador de calor de carga

$$\frac{T_4 - T_3}{T_1 - T_3} = E$$

5.3.1. Factores de eficiencia y rendimiento usados en colectores y placas absorbentes

A continuación se hace una descripción de los factores de eficiencia y rendimiento utilizados en colectores solares y placas absorbentes.

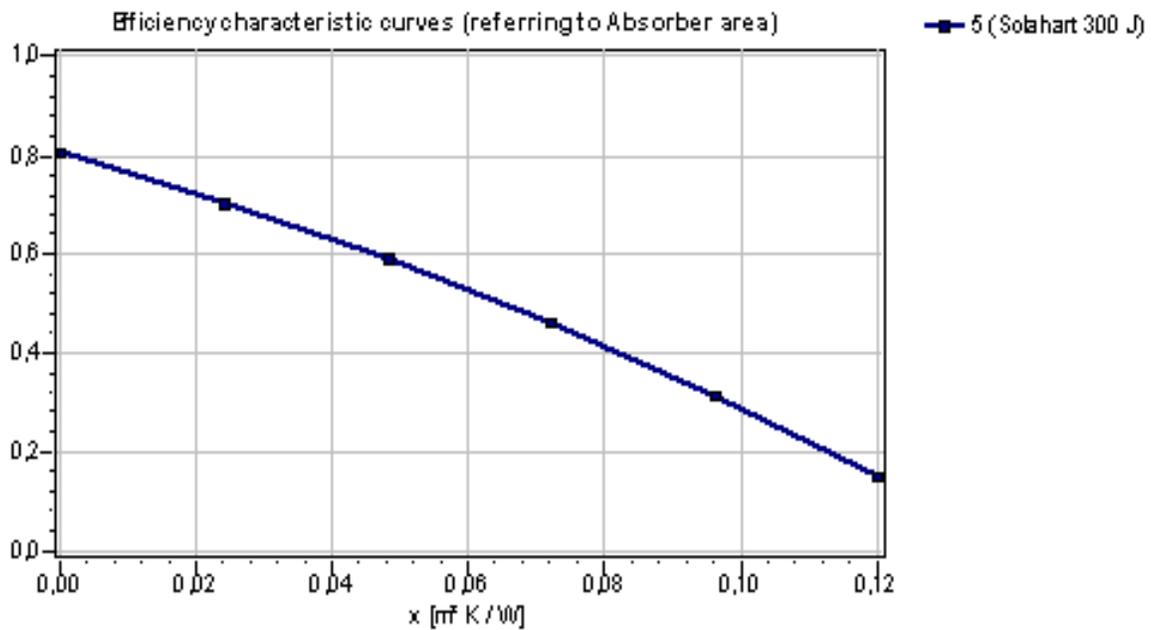
5.3.1.1. Curvas de rendimiento

La capacidad de los colectores se determina a partir de la curva de eficiencia o rendimiento, la cual indicará proporción de luz incidente transformada en calor, al circular el fluido de transferencia en los tubos en conjunto con la placa absorbedora. Las curvas de rendimiento normalmente serán definidas por tres parámetros térmicos:

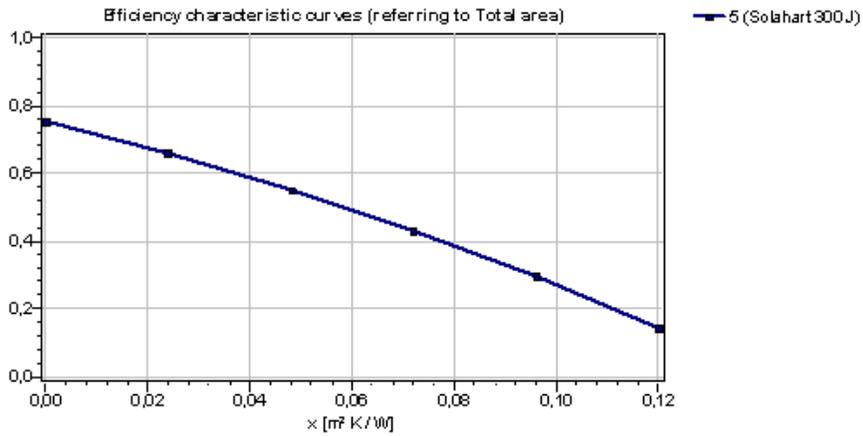
- Diferencia de temperaturas ΔT , comprendida esta diferencia de temperaturas entre la media del fluido por el interior del colector y la ambiental. A partir de esto se supone que no existen pérdidas energéticas si la temperatura del fluido del colector y la temperatura ambiental son iguales.

- Coeficiente de pérdidas lineales α_0 , representado por las pérdidas térmicas lineales del colector, referidas a la superficie y la diferencia de temperaturas.
- Coeficiente de pérdidas cuadráticas α_1 , representado por pérdidas de térmicas de componente cuadrático, estas se suman a las anteriores para lograr construir la curva de rendimiento representativa.

Figura 47. **Curvas de rendimiento para el colector solar plano**

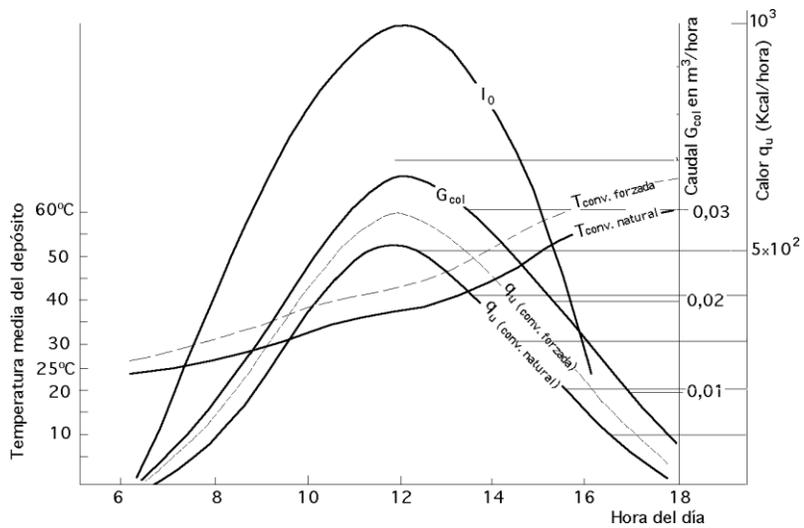


Continuación de la figura 48.



Fuente: FERNÁNDEZ DIEZ, Pedro. *Termodinámica técnica*. p. III-73.

Figura 48. **Gráfica transcurso del tiempo durante un día respecto a temperatura del depósito de almacenamiento**



Fuente: FERNÁNDEZ DIEZ, Pedro. *Termodinámica técnica*. p. III-73.

6. DETERMINACIÓN DE LAS DIMENSIONES, DESCRIPCIÓN GRÁFICA Y ESPECIFICACIONES DE LOS COMPONENTES DE INSTALACIÓN EN UN SISTEMA DE TRANSFERENCIA ENERGÉTICA TERMOSOLAR

6.1. Procedimiento de cálculo para determinar dimensiones de los componentes propuestos

Las instalaciones energéticas termosolares pueden tener diversas configuraciones para adaptarse a muchas aplicaciones. Las aplicaciones pueden considerarse desde una instalación simple, basada en un termosifón para proporcionar agua caliente sanitaria a.c.s., en viviendas de áreas urbanas y rurales teniendo estas dimensiones reducidas, como puede tratarse de instalaciones en hoteles, industrias y comercios.

En los proyectos termosolares para obtener agua caliente sanitaria, climatización o usos similares, se hace necesario de consideraciones previas a realizar la instalación, para que esta cumpla con los objetivos fundamentales, conseguir el máximo rendimiento energético la integración con elementos arquitectónicos y constructivos del inmueble.

Acerca de los colectores solares se debe tomar en cuenta la integración arquitectónica, anteriormente se recomendó como ideal la orientación de paneles opuesta al hemisferio en el que se encuentra la instalación; para el hemisferio norte orientados hacia el sur, y para el hemisferio sur orientados hacia el norte.

Lo anterior puede hacerse difícil y se debe calcular la pérdida de energía que se tendrá por la desviación angular en donde se ubique finalmente el colector seleccionado. Se debe determinar el tipo de colector a utilizar y su emplazamiento más adecuado con criterios de integración y rendimiento.

Existen colectores con diversos y múltiples accesorios para su fijación y soporte, de tal manera que pueden colocarse sobre cubiertas, losas, o fachadas de la edificación donde se prestara servicio.

Hay que considerar la distancia entre el colector solar y el sistema de acumulación, siendo las pérdidas energéticas proporcionales a la longitud de las tuberías que conectan ambos dispositivos.

Es necesario determinar si se construirá una instalación tipo centralizado, individual y su respectivo medio de apoyo, emplear cuando la utilización de este se haga necesaria; otra de las consideraciones es acerca del tipo de instalación estacionaria o permanente.

Se debe prever la accesibilidad a todos los componentes del sistema para la realización de tareas de verificación de funcionamiento, mantenimiento y reparaciones. Además hay que contar con medios de seguridad, señalización para tuberías, accesorios e instrumentos así como normativa vigente a nivel nacional si existe, datos de cambios temperatura y radiación solar.

Respecto a la demanda de energía que requieren los usuarios para determinar dimensiones de los dispositivos de captación y de acumulación se deben tener los siguientes datos:

- Consumo total del fluido servicio en un período especificado

- Temperatura deseada para el uso
- Temperatura media en un período especificado de líquido que ingresa para la alimentación del sistema.

En el diseño del sistema de la acumulación los factores necesarios para determinar capacidad y dimensiones son:

- Volumen de consumo necesario para el propósito de la instalación.
- Condiciones de instalación de los componentes para cumplir requisitos y normativas legales.
- Conexión entre dispositivos de acumulación, cuando se requiere de varios depósitos para cumplir la capacidad de acumulación.
- Relación del acumulador energético con el sistema de apoyo.

Para los usos de agua caliente sanitaria se consideran valores promedio de consumo de acuerdo al consumo tradicional, la temperatura propuesta de servicio y características de la red de suministro de agua fría.

Tabla VIII. **Consumo de agua caliente sanitaria para diversos usos**

CONSUMO RESIDENCIAL INDIVIDUAL	
Consumo bajo	40 litros/persona/día
Consumo medio	60 litros/persona/día
Consumo alto	80 litros/persona/día
CONSUMO EN DIVERSAS APLICACIONES	
Hoteles	80 litros/persona/día
Hospitales	80 litros/cama/día
Residencias universitarias	80 litros/cama/día
Duchas colectivas	20 litros/persona/día
Escuelas	5 litros/persona/día

Continuación de la tabla VIII.

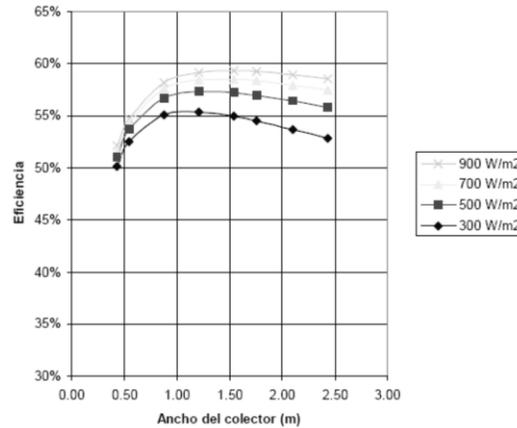
Restaurantes	8 a 15 litros/comida
Fábricas / Talleres	20 litros/persona/día
Oficinas	10 litros/persona/día

Fuente: PERALES BENITO, Tomás. *Guía del instalador de energías renovables*. p. 203.

A continuación se expone un método para el dimensionamiento óptimo de los colectores solares planos desarrollado por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Área de Desarrollo Sostenible y Salud Ambiental de la Organización Panamericana de la Salud (OPS).

La eficiencia del colector se incrementa significativamente hasta que el ancho del colector se aproxime a 1 m. Sin embargo, para valores mayores a 1,5 m la eficiencia empieza a decrecer paulatinamente, se debe anotar que el ancho del colector depende también del número de tubos.

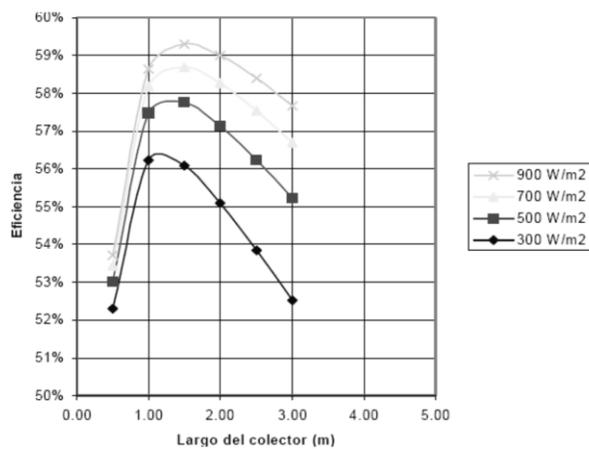
Figura 49. **Gráfica ancho de colector vs. eficiencia del colector**



Fuente: GUEVARA VÁSQUEZ, Sixto. *UNATSABAR – OPS/CEPIS*. p. 4.

En la figura 50, se muestra la eficiencia del colector, se incrementa rápidamente hasta que el largo del colector se aproxime a un valor de 1 m. La selección de 2 m para el largo está en un rango óptimo, por cuanto a menor longitud aumentan los costos de construcción.

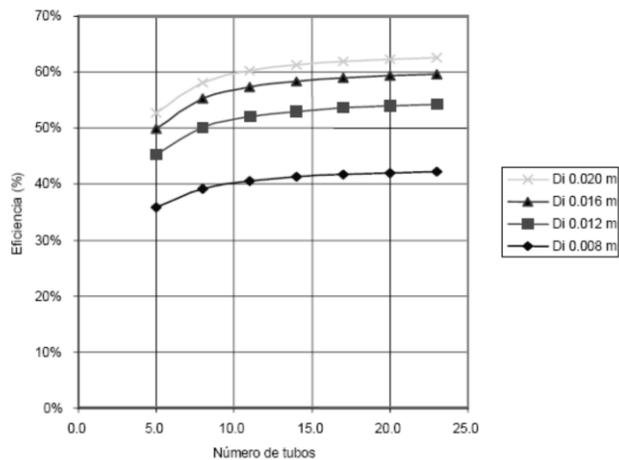
Figura 50. **Gráfica largo del colector vs. eficiencia del colector**



Fuente: GUEVARA VÁSQUEZ, Sixto. *UNATSABAR – OPS/CEPIS*. p. 4.

La tendencia de la eficiencia del colector en función del diámetro interno de los tubos para distintos números de ellos, se muestra en la figura 51. A partir de este gráfico puede seleccionarse un diámetro interior y económico.

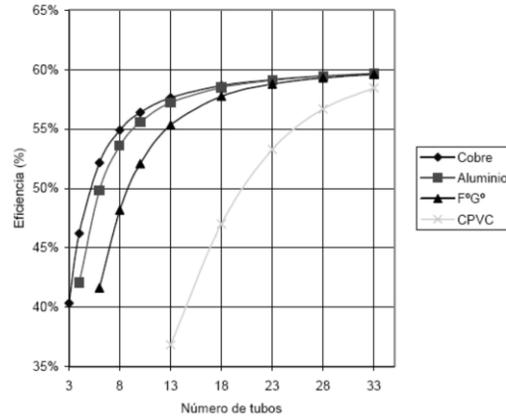
Figura 51. **Gráfica número y diámetro de tubos vs. Eficiencia del colector**



Fuente: GUEVARA VÁSQUEZ, Sixto. *UNATSABAR – OPS/CEPIS*. p. 5.

La relación del número de tubos respecto a la eficiencia es uno de los parámetros más importantes. En la figura 52 se muestra una relación entre la eficiencia y el material del tubo. A partir de este gráfico se observa que tanto con ocho tubos de cobre, como con trece tubos de hierro galvanizado se obtienen una eficiencia aceptable; estos materiales son los más comerciales; los tubos de aluminio tienen buenas características de conductividad térmica pero su alta corrosividad limita su aplicación.

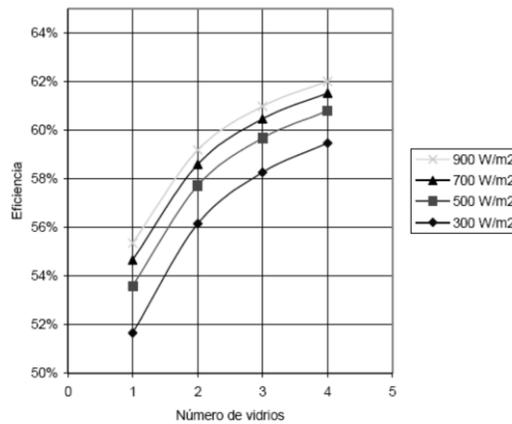
Figura 52. **Gráfica número y material de tubos vs. eficiencia**



Fuente: GUEVARA VÁSQUEZ, Sixto. *UNATSABAR – OPS/CEPIS*. p. 5.

Los resultados mostrados en el gráfico de la figura 53 indican que la colocación de dos vidrios es una buena elección, a pesar que con un mayor número se obtienen mejores eficiencias, el mayor número de vidrios hace más difícil su construcción incrementando, además, su costo.

Figura 53. **Gráfica número de vidrios respecto a eficiencia**



Fuente: GUEVARA VÁSQUEZ, Sixto. *UNATSABAR – OPS/CEPIS*. p. 5.

El tipo de colectores de placa más comúnmente utilizado los tubos captadores, en cuyo interior circula el agua a calentar, están dispuestos paralelamente y tienen diámetros comprendidos entre 1,2 cm y 1,5 cm con una separación variable, quedan soldados o embutidos tanto a la placa colectora como a los tubos colectores distribuidores, que tienen un diámetro de 2,5 cm aproximadamente.

Las placas colectoras se construyen generalmente de cobre, aunque existen sistemas que utilizan placas colectoras de hierro galvanizado; las placas de absorción se montan en una caja de metal, o de cemento, con un aislamiento de 5 a 10 cm de espesor en la cara posterior de la placa y con una o dos cubiertas de cristal, de forma que para la cámara de aire se deje una separación entre las mismas del orden de 2,5 cm.

El parámetro más importante a determinar es el área de la placa de absorción, y el punto de partida para la evaluación de esta, es la carga térmica anual y la radiación promedio del lugar, de acuerdo con la siguiente expresión, al despejar la ecuación 6.1.

- Ecuación 6.1. Área del colector solar plano

$$A_c = \frac{Q_U + Q_T}{\eta * H_T}$$

Dónde:

A_c : Área de la placa de absorción m^2

Q_U : Cantidad de calor requerido para calentar el líquido Joules

Q_T : Pérdidas totales en Joules

η : Eficiencia estimada del colector plano

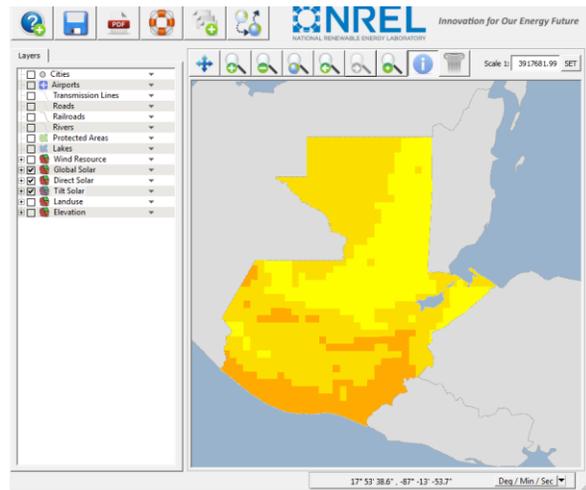
H_T : Radiación global promedio anual en la superficie inclinada $Kwh/(m^2\text{-día})$

Para la evaluación de los términos de la ecuación anterior, se deben hacer las siguientes apreciaciones:

- Se realizan los cálculos tomando en cuenta el promedio anual de la radiación solar, debido a la poca diferencia que se presenta entre cada uno de los meses.
- El sistema termosolar estará ubicado en la ciudad de Guatemala.
- La inclinación del colector con respecto a la horizontal, es de 15° , debido al sitio en el cual se hará el montaje teniendo de esta manera la radiación incidente mayor.

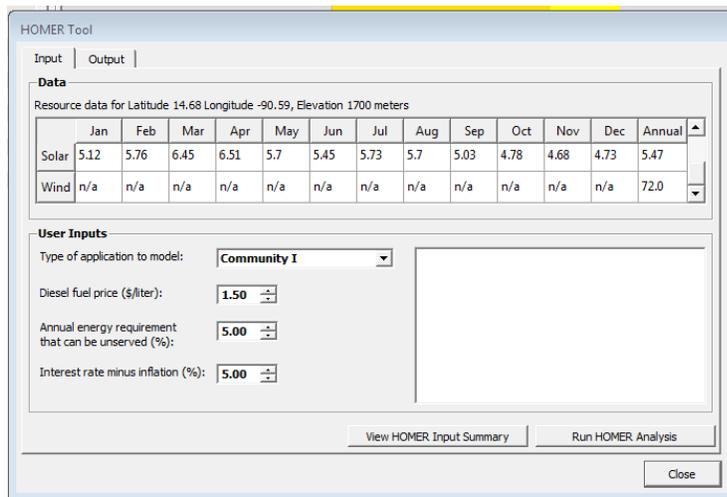
Para la radiación global promedio mensual sobre la superficie, se tomará como base, los datos registrados en la herramienta Geoespacial Toolkit para la ubicación de la ciudad de Guatemala, que para el caso de este trabajo, debido a la inclinación del colector, se toma como el valor de H_T , el valor de la radiación global sobre la superficie del colector.

Figura 54. **Datos de radiación solar determinados por un software especializado**



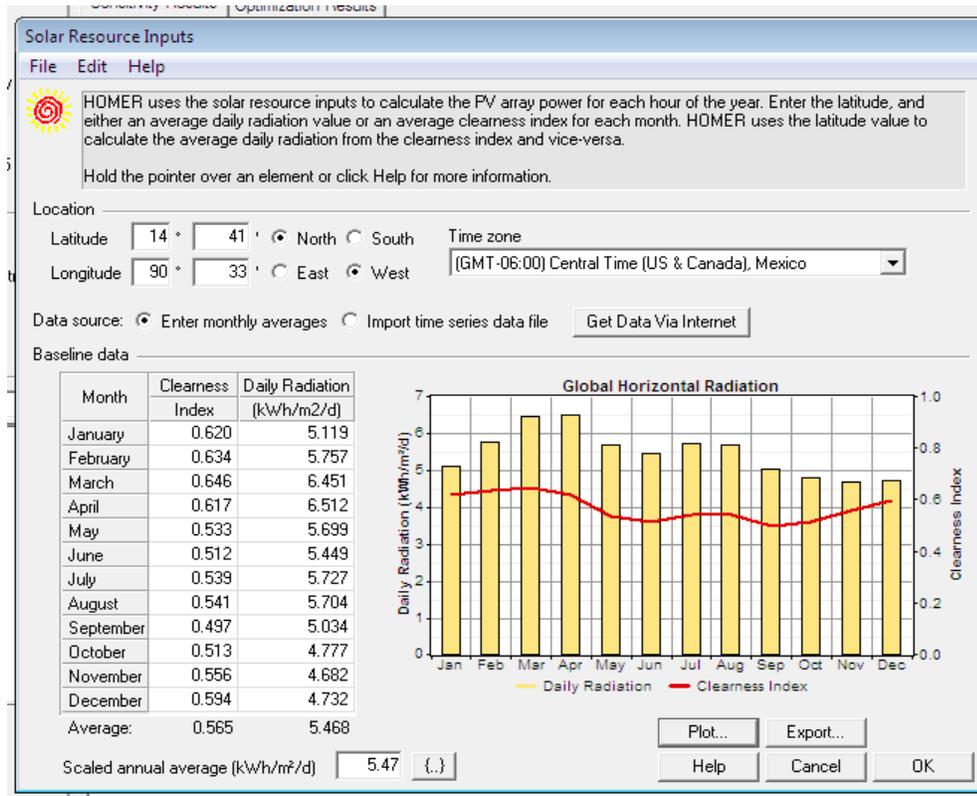
Fuente: NREL, software Geoespacial Toolkit.

Figura 55. **Histograma de radiación solar mediante software especializado**



Fuente: NREL, software Geoespacial Toolkit.

Figura 56. Radiación solar promedio para Guatemala mediante software especializado



Fuente: NREL, software Geoespacial Toolkit

La radiación solar promedio según la tabla generada desde Toolkit es 5,47 kwh/(m²día), para una radiación solar mínima el valor es de 4,68 kwh/(m²día) durante noviembre; si se diseña para el valor promedio algunos valores quedarán por debajo de este, lo que implica la falta de eficiencia y como consecuencia la no utilización del colector durante algunas épocas del año; por lo que es más confiable usar el valor mínimo de radiación solar para el diseño del colector, el valor equivalente de los 4,68 kwh/(m²día) corresponde a 16 848,000 J/(m²día).

En el proceso de dimensionamiento del colector y del tanque es necesario calcular la carga térmica, la cual está conformada por el calor necesario para obtener el gasto máximo tabulado en ochenta litros diarios de agua a 40°C, y las pérdidas en el tanque acumulador, de acuerdo con las siguientes expresiones.

$$Q_U = m * C_p * (T_f - T_o) \quad \text{Ecuación 5.6.}$$

$$Q_T = (UA)_T * (T_f - T_a) \quad \text{Ecuación 5.7.}$$

En un principio se supone que las pérdidas en el tanque son despreciables para el cálculo del área del colector, por lo cual solo se necesita conocer la carga para el calentamiento del agua, a continuación se hace el cálculo para la carga energética diaria.

$$Q_U = 80 \frac{Kg}{persona * día} * 5 personas * 4190 \frac{J}{Kg * °C} * (40°C - 10°C)$$

$$Q_U = 5,028E7 \frac{J}{día}$$

Se requieren entonces 50 280 000 Joules diarios para satisfacer las necesidades de agua caliente de la vivienda, sin tener en cuenta las pérdidas presentadas en el tanque. Para la determinación del área de la placa de absorción se tiene que de acuerdo con los datos obtenidos anteriormente, y suponiendo una eficiencia media del cincuenta por ciento en el colector, temperatura mínima ambiental de 10°C factor solar FS de 0,3 para una temporada del año con poca incidencia de radiación solar se obtiene:

$$\text{Área}_{colector} = \frac{5,028E7 \frac{J}{\text{día}} * 0,3}{1,6848E7 \frac{J}{\text{m}^2 * \text{día}} * 0,5}$$

$$\text{Área}_{colector} = 1,79 \text{ m}^2$$

Se requiere entonces un colector con placa de absorción que sea alrededor de 1,80 m² para calentar el agua, teniendo en cuenta que aún no se han calculado las pérdidas en el tanque; lo cual se realiza utilizando la ecuación 5.7.

Para el tanque del almacenador, se toma en cuenta una relación de valores comprendidos entre el 60 y el 100 % del valor empleado en el cálculo de gasto de agua de carga diaria, se utiliza la siguiente ecuación:

- Ecuación 6.2. Volumen del tanque almacenador de energía

$$0,6 < \frac{V_{tanque}}{G_f} < 1$$

Despejando para ambos valores extremos se obtiene

$$V_{tanque} = 0,6 * 80 \frac{\text{litros}}{\text{diarios}} * 5 \text{ personas}$$

$$V_{tanque} = 240 \frac{\text{litros}}{\text{diarios}}$$

$$V_{tanque} = 80 \frac{\text{litros}}{\text{diarios}} * 5 \text{ personas}$$

$$V_{tanque} = 400 \frac{\text{litros}}{\text{diarios}}$$

Si se utiliza el volumen de 400 litros de carga diaria para el consumo, se tiene un máximo de 0,4 metros cúbicos del tanque almacenador energético, utilizando un diámetro de 0,60 metros es posible calcular la altura necesaria para el tanque si este es de forma cilíndrica.

- Ecuación 6.3. Volumen del tanque cilíndrico

$$V_T = A_{bT} * H_T$$

$$V_T = \frac{\pi * D_t^2}{2} * H_T$$

$$0.4m^3 = \frac{\pi * (0,60 \text{ m})^2}{2} * H_T$$

$$H_{tanque} = \frac{0,4m^3 * 2}{\pi * (0,60 \text{ m})^2} = 0,707$$

Es recomendable usar un valor que supere el calculado para evitar el tanque inundado, puede utilizarse una altura de 0,8 m. El área superficial exterior, entonces es:

$$A_{sT} = \frac{\pi * D^2}{2} + \pi * D * h$$

$$A_{sT} = \frac{\pi * (0,60)^2}{2} + (\pi * 0,6 * 0,8) = 2,07m^2$$

Conociendo el volumen del tanque y sus dimensiones, se puede entrar a calcular las pérdidas de calor que se producen en el mismo, para recalculer así el área del colector.

$$Q_c = U_c * A_{st} * (T - T_a)$$

$$Q_c = 8 \frac{W}{m^2 * ^\circ C} * 2.07m^2 * (40^\circ C - 10^\circ C)$$

$$Q_c = 496,8W = 0,497 \frac{J}{s} * \frac{3600s}{1h} * \frac{24h}{1día} = 42\,940,8 \frac{J}{día} *$$

Entonces se procede a efectuar el cálculo del área del colector, incluyendo las pérdidas en el colector.

$$\text{Área}_{colector} = \frac{(5,028E7 \frac{J}{día} * 0.3) + 42\,940,8 \frac{J}{día}}{1,6848E7 \frac{J}{m^2 * día} * 0,5}$$

$$\text{Área}_{colector} = 1,7957 m^2$$

Es recomendable utilizar como área de la placa de absorción, la encontrada en inicialmente de 1,80 m², ya que la diferencia no es significativa.

Otros componentes en los que son requeridos algunos cálculos para el dimensionamiento apropiado son los intercambiadores de calor, tuberías, bombas de circulación y vaso de expansión.

Para los intercambiadores de calor la característica principal en su dimensionamiento es la potencia térmica máxima expresada en watts, es recomendable que se cumpla con la condición expresada a continuación.

- Ecuación 6.4. Potencia térmica del intercambiador de calor

$$P_T \geq 600 * A_{cap}$$

Dónde:

P_T Es la potencia térmica del intercambiador de calor en watts

A_{cap} Área de captación de energía solar en m^2

$$P_T \geq 600 * 1,80 m^2$$

$$P_T \geq 1080 w$$

Esta es la potencia térmica que corresponde al circuito primario de acuerdo a requerimientos del área de colector solar.

El diámetro de las tuberías depende del caudal de consumo, además del material utilizado en las mismas, el diámetro de las tuberías se calcula usando la siguiente expresión.

- Ecuación 6.5. Diámetro de tuberías para la instalación termosolar

$$D = N * C^{0.35}$$

Dónde:

N es un factor constante del material utilizado en las tuberías

C es el caudal del fluido expresado en m³/hora

Si la instalación incorpora varios colectores solares conectados en paralelos, el valor de caudal necesario por cada colector debe ser multiplicado por el total de colectores en la instalación.

Las condiciones que se deben cumplir para establecer el diámetro requerido a través de esta ecuación son:

- La pérdida de carga por metro lineal no exceda 40 milímetros columna de agua
- La velocidad del líquido no debe superar 1,5 m/s

Para mantener la presión estable en el circuito primario de la instalación termosolar se requiere el vaso de expansión, como se explicó en el capítulo 4 el vaso de expansión puede ser cerrado o abierto, para el vaso de expansión cerrado el volumen se calcula con la siguiente ecuación:

- Ecuación 6.6. Volumen del vaso de expansión

$$V_{vec} = V_{CP}(0.2 + 0.01 * \Delta H_{CS})$$

Dónde:

V_{vec} Volumen del vaso de expansión cerrado

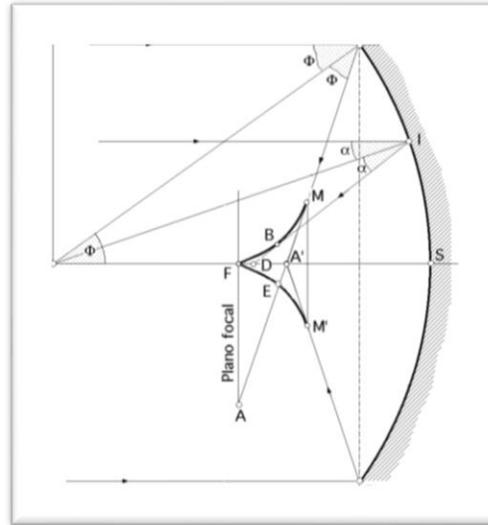
V_{CP} Capacidad volumétrica total del circuito primario

ΔH_{CS} Diferencia de altura entre el punto más alto del colector solar y el vaso de expansión

Para el cálculo de la ecuación anterior, se necesita conocer el volumen del líquido en el circuito primario, el cual corresponde a la sumatoria del volumen contenido en el colector solar, totalidad del volumen que circula en las tuberías del circuito primario, volumen contenido en intercambiadores de calor internos y externos.

En una superficie reflectante esférica, los rayos solares reflejados son tangentes a una superficie de revolución que se conoce como cáustica. Si se supone un rayo luminoso que incide sobre el espejo esférico de centro C en el punto P, el rayo reflejado es tangente a la cáustica en el punto M y corta a la línea (CS) en el punto A' y al plano focal en A.

Figura 57. **Características de la superficie reflectante esférica**



Fuente: FERNÁNDEZ DIEZ, Pedro. *Termodinámica técnica*. p. IV-85.

Las distancias (FA') y (FA) caracterizan, respectivamente, las variaciones longitudinal y transversal de la aberración esférica. Para calcular (FA') y (FA) se define un ángulo F que es el ángulo de apertura del espejo; teniendo en cuenta las leyes de la reflexión, el triángulo (CPA') es isósceles, por lo que:

- Ecuación 6.7. Cálculo de distancia CA' en colectores cilíndricos

$$(CA') = \frac{R}{2 * \cos(\theta)}$$

- Ecuación 6.8. Cálculo de distancia FA' en colectores cilíndricos

$$(FA') = \left(\frac{R}{2}\right) \left(\frac{1}{\cos(\theta)} - 1\right)$$

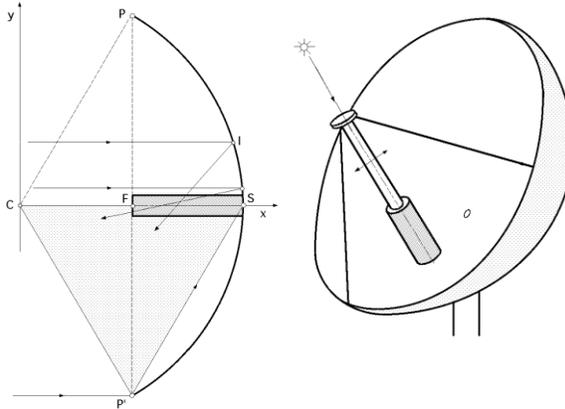
Con el ángulo CPA' con valor 2θ dando como resultado la siguiente expresión:

$$(FA) = \left(\frac{R}{2}\right) \left(\frac{1}{\cos(\theta)} - 1\right) * \tan(2\theta)$$

Utilizando un ángulo de 45° , lo significa que para esta situación, la imagen se extendería indefinidamente sobre el plano focal.

El sistema SRTA consiste en un reflector esférico fijo y un colector o receptor cilíndrico móvil, centrado y orientado en todo momento en la dirección del Sol. Teniendo en cuenta la siguiente figura, hay que determinar la abertura a dar al espejo de forma que todos los rayos incidentes al mediodía, paralelos al eje principal, le corten después de una sola reflexión.

Figura 58. **Sistema SRTA para colectores cilíndricos móviles**



Fuente: FERNÁNDEZ DIEZ, Pedro. *Termodinámica técnica*. p. IV-89.

El rayo extremo reflejado pasa por el punto S y si P' es el punto de incidencia, el triángulo (CSP') es isósceles; para un ángulo de incidencia máximo, se transforma en un triángulo equilátero y el radio de abertura correspondiente vale:

- Ecuación 6.9. Radio de abertura para ángulo de referencia

$$\frac{R\sqrt{3}}{2} = \text{radio de abertura}$$

Los rayos incidentes paralelos al eje principal y exteriores al círculo de máxima abertura experimentan dos reflexiones antes de alcanzar al colector.

Si los rayos solares no son paralelos al eje principal por estar a otras horas distintas de las del mediodía, algunos de ellos alcanzarán dos reflexiones y otro pequeño número no cortan más al eje, por lo que hay unas pérdidas de energía del orden del 1 %; la longitud del colector cilíndrico es $R/2$.

Para fijar las dimensiones del reflector hay que conocer el valor de la superficie de la imagen solar reflejada sobre el eje principal, que es variable, por cuanto la distancia desde los puntos de incidencia al eje es variable, siendo más grande cerca del reflector, que cerca del foco.

Un paraboloide es el conjunto de puntos situados a igual distancia de una recta fija llamada directriz y de un punto fijo F llamado foco; la intersección de la parábola y su eje es el vértice S ; si se elige este vértice como origen de coordenadas, la ecuación de la parábola se puede expresar de esta forma:

- Ecuación 6.10. Definición de la parábola típica

$$y^2 = 4 f (x)$$

En la que f es la distancia focal (SF). En coordenadas polares de polo F , la ecuación de la parábola es:

- Ecuación 6.11. Definición de la parábola en coordenadas polares

$$\rho = \frac{f}{\cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right)}$$

Los depósitos de almacenamiento tienen que estar aislados térmicamente; por regla general se puede utilizar un aislamiento de lana mineral en los costados, en la parte superior, y en la inferior, de unos 20 cm de espesor; también hay que aislar térmicamente las tuberías que van desde el colector al depósito.

Para reducir al mínimo las pérdidas de carga y las caídas de presión; en unidades domésticas se utilizan normalmente tuberías de 2,5 cm de diámetro o más, con tramos de longitud tan corta como sea posible.

Es necesario que la estratificación se pueda mantener en los depósitos de almacenamiento dentro de unos límites, por lo que su situación y posición, como el diseño de las conexiones de los depósitos es muy importante.

6.2. Proyección gráfica y especificaciones de la instalación

La siguiente tabla contiene los parámetros considerados como principales para determinar los componentes de la instalación de un sistema energético termosolar, de acuerdo a la recopilación de este trabajo.

Tabla IX. **Parámetros para determinar componentes de la instalación termosolar**

Dotación de agua caliente	l/día
Temperatura de agua caliente de servicio	°C
Temperatura de agua de abastecimiento	°C
Medición de estación más próxima o medición por software	
Porcentaje recibido de energía solar	
Dimensiones de superficie conjunto de colector	m ²
Fluido para transferencia energética en el colector	
Gasto del colector	(gpm) (m ³ /hora)
Tipo de intercambiador de calor	
Cantidad máxima de energía obtenida en el colector	(kw ó hp)
Gasto del tanque de almacenamiento	
Carga de bombeo en el circuito del colector	mca
Carga de bombeo en el circuito de almacenamiento	mca
Capacidad del tanque de precalentamiento de agua	litros
Volumen disponible del líquido de transferencia	litros
Capacidad del vaso de expansión	

Fuente: MONTGOMERY, Richard. *Energía solar: selección del equipo, instalación y aprovechamiento*. p. 11-19.

6.2.1. Dispositivo de captación y distribución energética

Las siguientes tablas agrupan las especificaciones de parámetros y características para la fabricación o adquisición de los colectores utilizados en instalaciones termosolares.

Tabla X. **Especificaciones para colectores solares planos**

ESPECIFICACIONES PARA COLECTORES SOLARES	
Diseñador y/o fabricante del colector	
Número del modelo	
Numero de cubiertas	
Fr ta	
Fr UI	
Pruebas realizadas	
Periodo de garantía	
Velocidad máxima en tubería	m/s
Límites de temperatura de operación	°C
Caída de presión a velocidad máxima	(psi) (KPa) (bar)
Vida útil estimada	
Material para el vidriado	
Material de juntas	
Material para el aislante	
Material para placa de absorción	
Líquido de transferencia	
Dimensiones generales para el modulo del colector	
Dimensiones netas de abertura	

Fuente: MONTGOMERY, Richard. *Energía solar: selección del equipo, instalación y aprovechamiento*. p. 11-19.

Tabla XI. **Parámetros y características de intercambiadores de calor, lado del colector y lado del almacenador**

ESPECIFICACIONES PARA INTERCAMBIADORES DE CALOR	
Diseñador y/o fabricante del intercambiador de calor	
Número del modelo	
Configuración de flujo	
Pared doble o sencilla	
Medio de transferencia primario	
Medio de transferencia secundario	
Garantía	
Vida útil estimada	
Material de fabricación	
Dimensiones físicas (incluir planos, esquemas y diagramas si es necesario)	
CONDICIONES DE OPERACIÓN PARA EL LADO DEL COLECTOR	
Proporción de consumo	p m
Calor máximo de suministro al intercambiador	w
Porcentaje de efectividad esperado	
Caída de presión a flujo normal	
Límites de temperaturas de operación	C
Rango medio de temperatura de operación	C
Factor de elevación del colector	
CONDICIONES DE OPERACIÓN PARA EL LADO DEL ALMACENADOR	
Proporción de consumo	pm
Límites de temperatura de operación	C
Rango medio de temperatura de operación	C

Continuación de la tabla XI.

Caída de presión a flujo normal	
Costo estimado	

Fuente: MONTGOMERY, Richard. *Energía solar: selección del equipo, instalación y aprovechamiento*. p. 11-19.

6.2.2. Dispositivo de almacenamiento energético

Las siguientes tablas agrupan las especificaciones de parámetros y características para la fabricación o adquisición de los tanques de almacenamiento energético.

Tabla XII. **Especificaciones para tanques de almacenamiento energético**

ESPECIFICACIONES PARA TANQUES DE ALMACENAMIENTO	
Fabricante o diseñador del tanque	
Límites de temperatura del ciclo	°C
Medio de almacenamiento	
Tipo de acondicionamiento	
Material del forro del tanque	
Tipo de sistema	
Presión máxima de trabajo	psi
Material de fabricación	
Dimensiones físicas	
Capacidad del tanque	litros
Válvula de drenaje	
Tanque de expansión	
Acceso provisto de junta	
Requerimientos para actividades de plomería	
Límites de carga viva	

Continuación de la tabla XII.

Carga muerta	
Tipo de aislamiento	
Costo estimado	Q.

Fuente: MONTGOMERY, Richard. *Energía solar: selección del equipo, instalación y aprovechamiento*. p. 11-19.

6.2.3. Instalación del circuito hidráulico

A continuación se muestran las especificaciones para la instalación del circuito hidráulico.

Tabla XIII. **Especificaciones para bombas en el circuito del colector solar**

ESPECIFICACIONES PARA BOMBAS DEL CIRCUITO DEL COLECTOR	
Fabricante o distribuidor de la bomba	
Modelo de la bomba	
Acoplamiento del motor	
Sello mecánico	
Garantía	
Vida útil estimada	
Material del cuerpo de la bomba	
Material del impulsor de la bomba	
Disponibilidad según curvas de operación	
Voltaje de operación del motor	Voltios
Corriente de arranque	Amperios
Velocidad de operación y control del motor	
Conexiones de reborde	
CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA BOMBA	
Rendimiento volumétrico	gpm

Continuación de la tabla XIII.

Caída de presión de carga	mca
Tipo de sistema	
Límites de temperatura de operación	°C
Rango medio de temperatura de operación	
Fluido de trabajo de la bomba	
Costo estimado	Q

Fuente: MONTGOMERY, Richard. *Energía solar: selección del equipo, instalación y aprovechamiento*. p. 11-19.

Tabla XIV. **Especificaciones para bombas en el circuito del almacenador energético**

ESPECIFICACIONES DE BOMBAS EN CIRCUITO DE ALMACENAMIENTO	
Fabricante o distribuidor de la bomba	
Modelo de la bomba	
Acoplamiento del motor	
Sello mecánico	
Garantía	
Vida útil estimada	
Material del cuerpo de la bomba	
Material del impulsor de la bomba	
Disponibilidad según curvas de operación	
Voltaje de operación del motor	Voltios
Corriente de arranque	Amperios
Velocidad de operación y control del motor	
Conexiones de reborde	
CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA BOMBA	
Rendimiento volumétrico	gpm
Caída de presión de carga	mca
Tipo de sistema	

Continuación de la tabla XIV.

Límites de temperatura de operación	°C
Rango medio de temperatura de operación	
Fluido de trabajo de la bomba	
Costo estimado	Q

Fuente: MONTGOMERY, Richard. *Energía solar. Selección del equipo, instalación y aprovechamiento*. p. 11-19

Tabla XV. **Especificaciones para bombas en el circuito de distribución del fluido**

ESPECIFICACIONES PARA BOMBAS DEL CIRCUITO DE DISTRIBUCIÓN	
Fabricante o distribuidor de la bomba	
Modelo de la bomba	
Acoplamiento del motor	
Sello mecánico	
Garantía	
Vida útil estimada	
Material del cuerpo de la bomba	
Material del impulsor de la bomba	
Disponibilidad según curvas de operación	
Voltaje de operación del motor	Voltios
Corriente de arranque	Amperios
Velocidad de operación y control del motor	
Conexiones de reborde	
CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA BOMBA	
Rendimiento volumétrico	gpm
Caída de presión de carga	mca
Tipo de sistema	
Límites de temperatura de operación	°C
Rango medio de temperatura de operación	

Continuación de la tabla XV.

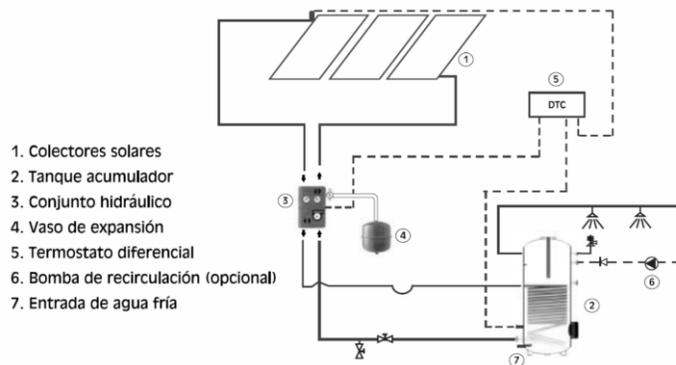
Fluido de trabajo de la bomba	
Costo estimado	Q

Fuente: MONTGOMERY, Richard. *Energía solar: selección del equipo, instalación y aprovechamiento*. p. 11-19.

6.2.4. Ubicación del equipo de mando y control del sistema

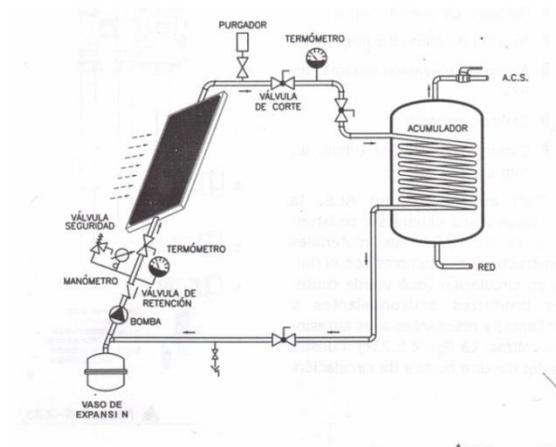
A continuación se expone gráficamente la ubicación recomendada del equipo y accesorios de control y mando de sistemas energéticos termosolares.

Figura 59. **Ubicación de equipos y accesorios en sistema termosolar con varios colectores**



Fuente: SALVADOR ESCODA S.A. *Manual técnico energía solar térmica*. p. 39.

Figura 60. **Ubicación recomendada de equipo y accesorios en un sistema termosolar típico de un colector solar plano y un almacenador energético con intercambiador de calor simple**

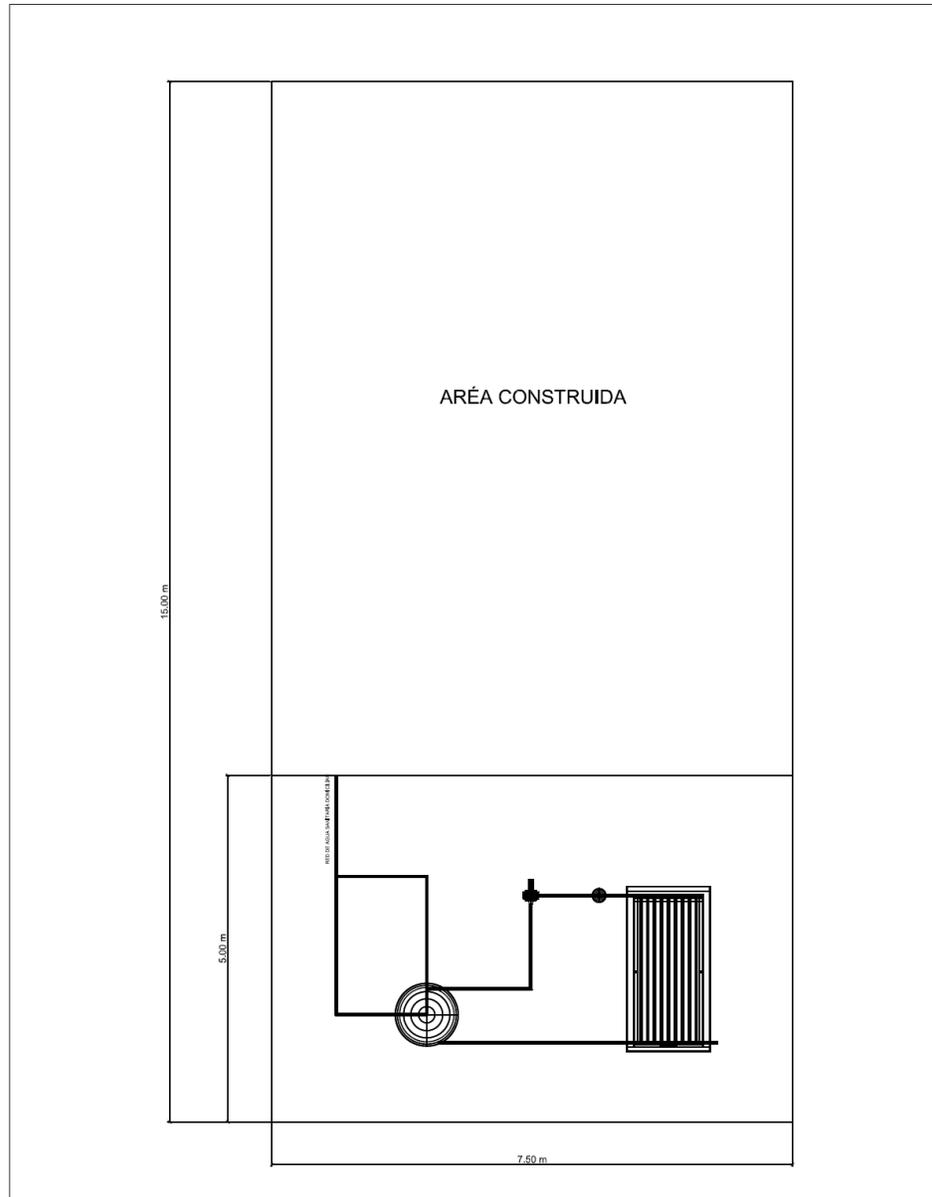


Fuente: PERALES, Tomas. *Guía del instalador de energías renovables*. p. 178.

6.3. Proyección en conjunto del sistema propuesto

A continuación se muestra la planta de distribución del sistema termosolar y la proyección isométrica de la estación termosolar residencial.

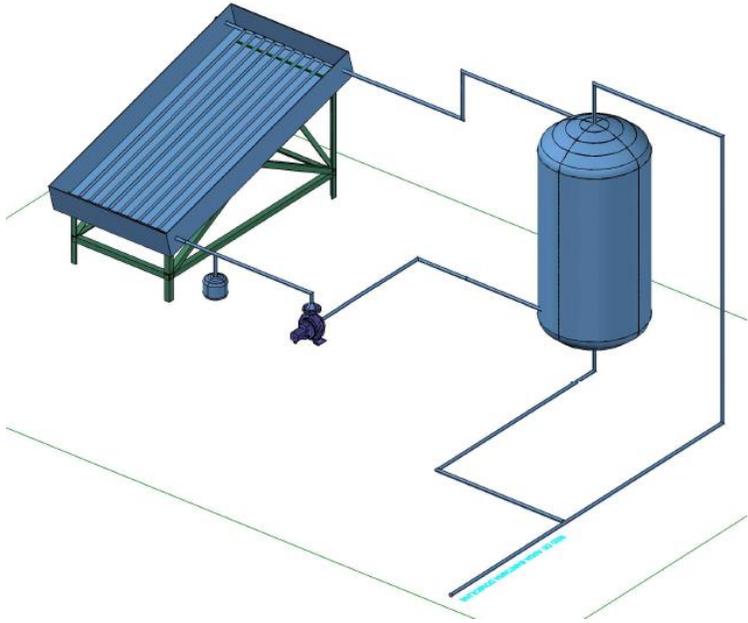
Figura 61. **Planta de distribución del sistema termosolar**



PLANTA DE DISTRIBUCIÓN DEL SISTEMA TERMOSOLAR DENTRO DEL TERRENO
RIN ESCALA A

Fuente: elaboración propia, con AutoCAD 2012.

Figura 62. **Proyección isométrica de la instalación termosolar residencial**



Fuente: elaboración propia con AutoCAD 2012.

7. COMPARACIONES DE FUNCIONAMIENTO Y EFICIENCIA EN LAS DIVERSAS CONFIGURACIONES DE DISPOSITIVOS EN LA INSTALACIÓN DE SISTEMAS ENERGÉTICOS TERMOSOLARES APLICADOS AL CALENTAMIENTO DE AGUA SANITARIA

7.1. Diferentes tipos de circulación en el sistema

Las instalaciones de sistemas energéticos termosolares, pueden ser clasificadas según el principio de circulación del fluido procedente del colector solar; el sistema de acumulación estará dando una diferencia respecto a las instalaciones. La circulación puede hacerse por medio de un termosifón, conocido este procedimiento como circulación natural, o puede ser a través de una bomba de funcionamiento eléctrico siendo este segundo procedimiento conocido como circulación forzada.

7.1.1. Circulación natural

En el procedimiento por circulación natural o termosifón, el movimiento del fluido procedente del colector solar se produce por el cambio de densidad experimentado al producirse un gradiente de temperatura.

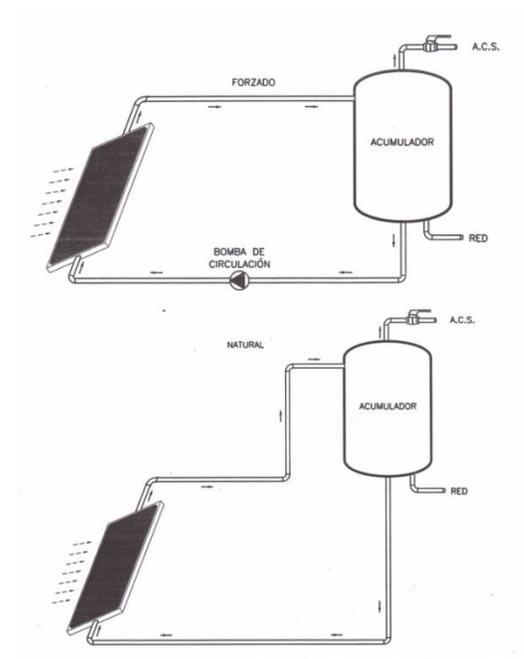
Cuando el fluido se calienta en el colector por acción energética solar, el mismo disminuye la densidad, teniendo un ascenso al pesar menos; contrariamente el fluido se desplaza a la parte baja, dándose así una circulación natural que puede mantenerse al existir el gradiente de temperatura.

7.1.2. Circulación forzada

En el procedimiento por bombeo o circulación forzada, el desplazamiento del fluido lo provocado por la bomba eléctrica, siendo esta controlada por un termostato diferencial básico, o a través de la instalación de una central para el control. El procedimiento de circulación forzada tiene algunas ventajas respecto al de circulación siendo estas:

Mayor caudal circulando en las tuberías o ductos de la instalación
Capacidad de regulación del caudal de forma manual o automatizada, a través de la implementación de un termostato diferencial con sondas captadoras de temperatura.

Figura 63. **Comparación entre fluido en circulación natural y fluido en circulación forzada**



Fuente: PERALES, Tomas. *Guía del instalador de energías renovables*. p. 211.

7.2. Diferencias en tipo de conexiones al utilizar varios captadores o colectores solares

La superficie de captación y el rendimiento energético de los colectores elegidos para utilizar en una instalación termosolar deben corresponder a la demanda energética estimada y prevista con anterioridad. A partir del análisis y cálculos realizados se obtiene la superficie de colectores a utilizar, debiendo requerirse de acuerdo a temperatura de servicio y caudal a suministrar.

Por capacidad energética o por distribución del edificio, la instalación puede necesitar el empleo de varios colectores, la conexión de estos puede realizarse en paralelo, en serie, o una combinación de ambos serie-paralelo.

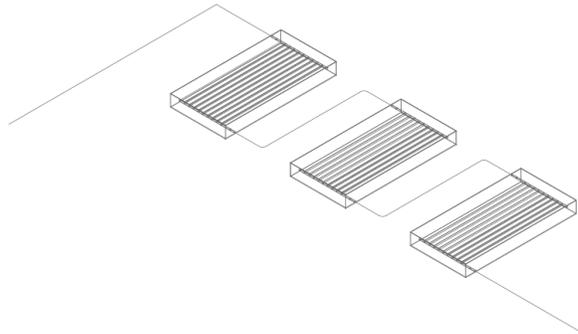
7.2.1. Conexión en serie

Esta configuración debe utilizarse si se requiere temperaturas más altas, con la desventaja de la reducción de eficiencia térmica.

En la conexión en serie, el caudal permanece constante, pero se genera un salto térmico, debido al aumento progresivo de la temperatura, afectando así el rendimiento térmico conforme aumenta el número de colectores conectados.

Para el montaje de colectores en serie la temperatura se multiplica por cada colector, se puede percibir rendimiento más bajo desde el segundo colector de la conexión.

Figura 64. **Proyección isométrica conexión de colectores en serie**

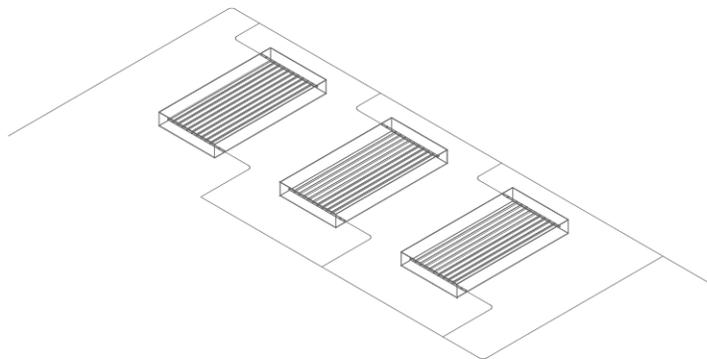


Fuente: elaboración propia con AutoCAD 2012.

7.2.2. **Conexión en paralelo**

Este tipo de configuración limita el número de colectores de acuerdo a su diseño y fabricación. En esta configuración todos los colectores conectados deben funcionar con un flujo equilibrado, disponiendo de un montaje hidráulico con retorno invertido, logrando de esta manera mayor caudal.

Figura 65. **Proyección isométrica conexión de colectores en paralelo**



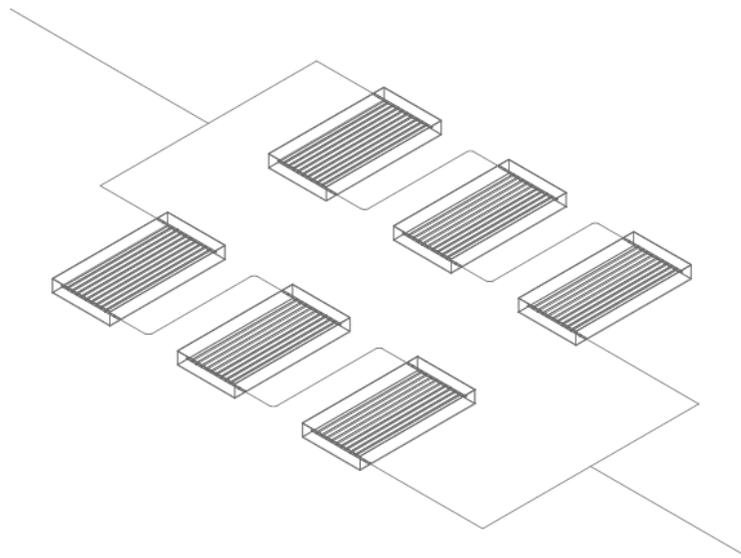
Fuente: elaboración propia con AutoCAD 2012.

7.2.3. Conexión combinada serie y paralelo

La configuración serie paralelo contiene características de las dos configuraciones antes descritas; los colectores se disponen en filas, de preferencia esta filas con un mismo número de colectores, procediendo a conectarlos de una manera definida por razones arquitectónicas principalmente.

En esta configuración se intercalan entradas y salidas de cada batería de los colectores las válvulas de cierre; además entre las bombas de circulación que intervengan para poder aislar los circuitos formados al realizarse tareas de mantenimiento.

Figura 66. **Proyección isométrica conexión de colectores combinada en serie y paralelo**



Fuente: elaboración propia con AutoCAD 2012.

7.3. Diversos tipos de transferencia térmica

El principio de diferenciación térmica se refiere a los procedimientos empleados en la transferencia de energía captada desde el colector, percibiéndose a través del diferencial de temperatura con la elevación de la misma, desde el fluido interno del colector hacia el almacenador de energía. Se puede considerar la transferencia directa y la transferencia con intercambiador de calor en el almacenador de energía.

7.3.1. Transferencia directa

En este procedimiento se considera que el fluido de servicio para el consumo final es el mismo que el de circulación por el colector solar, no se debe agregar sustancias anticongelantes ni otras que afectan la composición del fluido.

Para la transferencia directa no se requiere el uso del intercambiador de calor, este procedimiento se utilizará mucho en aplicaciones industriales, donde no se requiere características y condiciones sanitarias necesarias para el consumo humano.

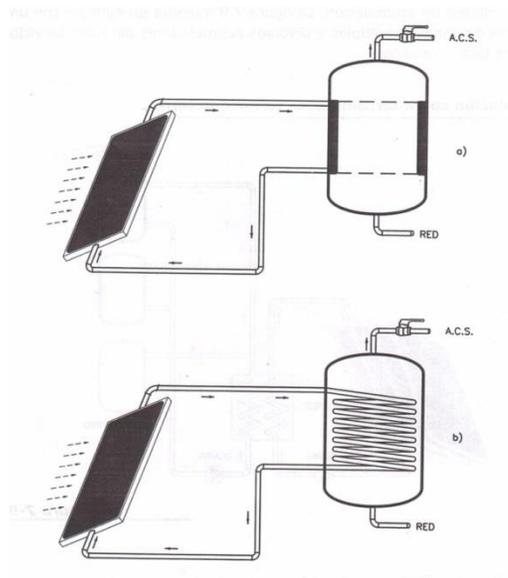
7.3.2. Transferencia con intercambiador y almacenador

Este es el procedimiento más empleado, contiene dos circuitos aislados en la circulación de fluidos; un circuito primario con el líquido de trabajo del colector solar y un líquido secundario con el fluido de servicio para el consumo. Entre los dos circuitos se encuentra el intercambiador de calor que puede tener dos configuraciones distintas:

- Un serpentín sumergido en el depósito del almacenador energético; en el cual circula el líquido caliente del circuito primario con el cual se eleva la temperatura del líquido de consumo que se encuentra en el exterior del serpentín, rodeando a este.
- Un sistema de almacenamiento con doble envolvente, en el cual la transferencia se produce a través de las paredes entre ambos compartimentos.

Dentro de estos procedimientos se debe tener un intercambiador externo, que forma los circuitos primario y secundario, teniendo un almacenador convencional. Este procedimiento se utiliza en instalaciones de tamaño medio o grande, se emplea de acuerdo a necesidades en caudal o distribución energética en el circuito formado por el o los colectores y los almacenadores de energía.

Figura 67. **Transferencia térmica con acumulador de doble envolvente y acumulador con serpentín**



Fuente: PERALES, Tomas. *Guía del instalador de energías renovables*. p. 213.

7.4. Diversos sistemas de expansión

Existen dos procedimientos empleados para mantener la presión del fluido en el circuito primario, siendo estos el sistema abierto y el sistema cerrado.

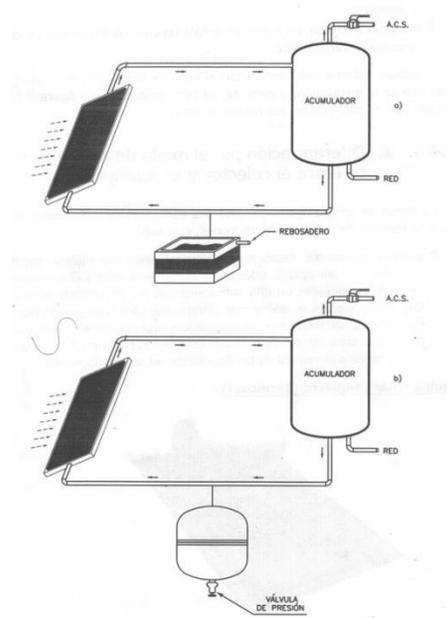
7.4.1. Sistema abierto

En el sistema abierto la expansión se enlaza directamente con la atmósfera, en este sistema se coloca el vaso de expansión en el punto más alto posible de la instalación, este sistema es poco empleado.

7.4.2. Sistema cerrado

En el sistema cerrado se instala un vaso de expansión cerrado descrito con anterioridad.

Figura 68. Diferencia en el sistema de expansión



Fuente: PERALES, Tomas. *Guía del instalador de energías renovables*. p. 215.

7.5. Tipos de acoplamiento entre colector y almacenador de energía

Los componentes de captación y almacenamiento de energía pueden acoplarse en tres formas: equipo compacto, equipo partido, equipo integrado.

7.5.1. Equipo compacto

El equipo compacto se refiere a la forma de montaje de los componentes principales del sistema energético termosolar como el colector y el

almacenador, estando estos montados en una misma estructura, dándoles unidad.

La configuración más usada de este sistema es la disposición del almacenador en posición horizontal, ubicado en la parte superior fijado a la estructura del colector solar. Este tipo de sistema se utiliza en instalaciones termosolares de tamaño reducido por lo general viviendas unifamiliares, con bajo consumo de agua caliente.

Figura 69. **Equipo termosolar compacto Termosol**

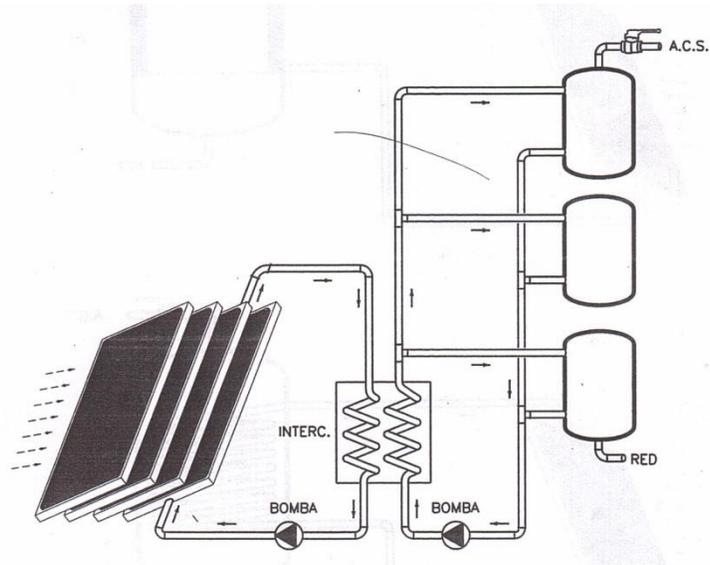


Fuente: PERALES, Tomas. *Guía del instalador de energías renovables*. p. 216.

7.5.2. Equipo separado

El sistema de equipo separado corresponde a una separación de los componentes del sistema termosolar ubicados a cierta distancia, debiendo instalar tuberías o ductos para la unión del colector solar y el almacenador energético, existiendo en el sistema un intercambiador de calor interno o bien un intercambiador externo.

Figura 70. **Equipo separado**



Fuente: PERALES, Tomas. *Guía del instalador de energías renovables*. p. 214.

7.5.3. **Equipo integrado**

El sistema con equipo integrado está constituido por el colector solar y el almacenador energético en una sola pieza, por lo general el almacenador se encontrará integrado en la parte superior del colector. Se utiliza esta configuración en sistemas termosolares con bajo consumo de agua caliente sanitaria, considerando mucha facilidad para su instalación.

Figura 71. **Equipo integrado**



Fuente: PERALES, Tomas. *Guía del instalador de energías renovables*. p. 150.

7.6. Formas de disposición de los componentes

A continuación se presentan las formas de disposiciones en que pueden utilizarse los componentes de la estación termosolar.

7.6.1. Colectores en sentido horizontal

La disposición de los colectores en sentido horizontal dependerá del espacio y la estética en la instalación.

Figura 72. **Colector en sentido horizontal**

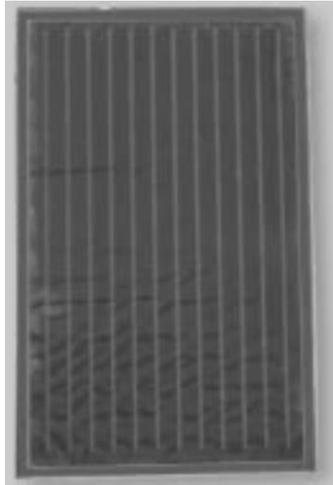


Fuente: SALVADOR ESCODA S.A. *Manual técnico energía solar térmica*. p. 9.

7.6.2. Colectores en sentido vertical

La ubicación y disposición de los colectores en sentido vertical, tendrá una importante característica relevante; ya que si se dispone de un sistema por termosifón, el captador energético en sentido vertical provee una mayor circulación del fluido.

Figura 73. **Colector en sentido vertical**

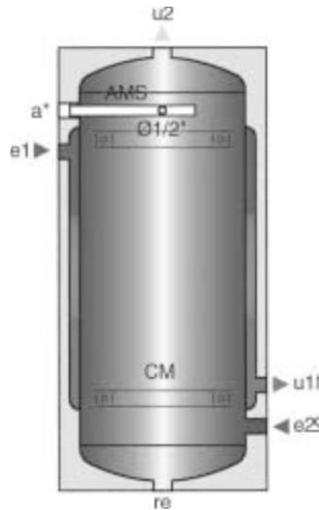


Fuente: SALVADOR ESCODA S.A. *Manual técnico energía solar térmica*. p. 9.

7.6.3. Almacenador de energía en posición vertical

Para determinar la posición de los almacenadores energéticos será con base en el aprovechamiento energético, aumentando este notablemente a través de la estratificación del fluido caliente en su interior; la forma más apropiada para tener buena relación de estratificación de temperaturas, es mediante el uso de acumuladores esbeltos colocados verticalmente, presentando estos mayor capacidad de distribución por la densidad del fluido.

Figura 74. **Almacenador energético en posición vertical**

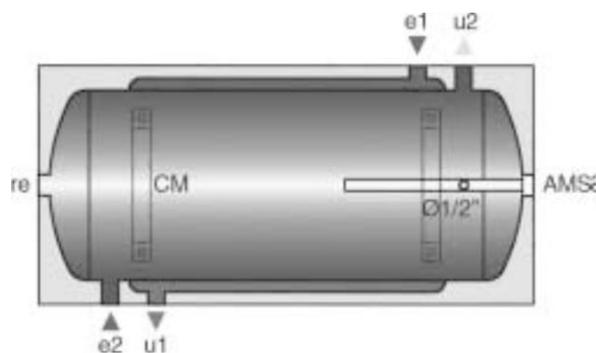


Fuente: SALVADOR ESCODA S.A. *Manual técnico energía solar térmica*. p. 21.

7.6.4. **Almacenador de energía en posición horizontal**

Los almacenadores de energía colocados en posición horizontal tendrán mayor ventaja en la facilidad de su acoplamiento mecánico, a través del uso de los colectores energéticos en sistemas compactos.

Figura 75. **Almacenador energético en posición horizontal**



Fuente: SALVADOR ESCODA S.A. *Manual técnico energía solar térmica*. p. 21.

CONCLUSIONES

1. Es posible el desarrollo de proyectos que aplican la energía termosolar en Guatemala, a través del uso apropiado de herramientas tecnológicas aptas para el diseño, fabricación, instalación y operación de equipos y accesorios de este tipo de instalaciones.
2. Los aspectos necesarios para la implementación de la tecnología apropiada en instalaciones de sistemas energéticos termosolares, están expuestos en forma general para la elaboración de una instalación, la aplicación más recomendable en Guatemala es el calentamiento de agua sanitaria.
3. A través del contenido recopilado es posible el planteamiento de proyectos y usos específicos de la energía termosolar, existiendo la documentación necesaria para definir aspectos climáticos, ambientales económicos y sociales para el aprovechamiento de esta fuente energética en diversas regiones del país.

RECOMENDACIONES

1. A los docentes de la Escuela de Ingeniería Mecánica, profundizar el estudio y la investigación de los recursos energéticos renovables dentro del pensum de la carrera a su cargo.
2. A las instituciones del Estado encargadas de la temática energética, se recomienda que cumplan el papel que les corresponde en el desarrollo de proyectos energéticos renovables, tomando en cuenta todos los aspectos económicos, sociales y ambientales para beneficio de la población guatemalteca en general.
4. Es necesaria y de carácter urgente la implementación de políticas estructurales que conlleven al desarrollo de proyectos de energía renovable, a través de la legislación adecuada y específica que promueva y permita la participación de profesionales y personal operativo guatemalteco en todas las etapas de desarrollo de dichos proyectos.

BIBLIOGRAFÍA

1. CENGEL, Yunus; BOLES, Michael. *Termodinámica*. 7a ed. México: McGraw-Hill, 2012. 1040 p.
2. FERNÁNDEZ DÍEZ, Pedro. *Energías alternativas, procesos termosolares en alta, baja y mediana temperatura*. España: Universidad de Cantabria. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética 2007. 264 p.
3. GARCÍA PRADO, Romel Alaric. *Caracterización energética de Guatemala*. Trabajo de graduación de Maestría en Ciencia y Tecnología del Medio Ambiente, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Estudios de Postgrado, 2008. 143 p.
4. Guatemala. Ministerio de Energía y Minas MEM, <<http://www.mem.gob.gt>>[en línea] [Consulta: 22 de julio 2013].
5. HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto; FERNÁNDEZ COLLADO, Carlos; BAPTISTA LUCIO; María del Pilar. *Metodología de la Investigación*. 5a ed. México: McGraw-Hill, 2010. 656 p.
6. Instituto para la diversificación y ahorro de la energía. *Energía solar térmica*. España: IDAE, 2006, 148 p.

7. MONTGOMERY, Richard. *Energía solar: selección del equipo, instalación y aprovechamiento*. México: Limusa, 1986. 510 p.
8. PERALES BENITO, Tomás. *Guía del instalador de energías renovables*. México: Limusa, 2007. 254 p.
9. RIBOT, Jaume. *Curso de energía solar*. 3a ed. Barcelona: Centro de Tecnología Educativa, 1994. 79 p.