

## MANUAL DEL CURSO DE SISTEMAS DE CALENTAMIENTO SOLAR DE AGUA (SCSA) PARA PROFESORES

SOLAR WATER HEATING SYSTEMS (SWHS) TRAINING COURSES MANUAL FOR PROFESSORS





## CAPÍTULO 1

SITUACIÓN ACTUAL DEL SECTOR Y NORMATIVA APLICABLE .....	4
1.1 Cambio Climático y Gases de Efecto Invernadero .....	6
1.2 Estrategias y Políticas Energéticas de Países Industrializados [7] .....	11
1.3 Usos y Aplicaciones de Calentadores Solares de Agua (CSA) [9] .....	18
1.3.1 Contexto Mundial .....	18
1.3.2 Otras Tecnologías Termosolares Existentes [9] .....	23
1.4 Desarrollo y Evolución de la Energía Solar Térmica en Panamá .....	25
1.5 Aspectos Regulatorios y Técnicos sobre CSA .....	26
1.5.1 Norma Energía Solar – Definiciones y Terminología (basada en la ISO 31-6: 1992 y la ISO-9488-1999) [11] [12] .....	26
1.5.2 Norma Internacional para Captadores Solares Térmicos (ISO9806:2017) [13] .....	26
1.5.2.1 Pruebas de Rendimiento Térmico [13] .....	27
1.5.2.2 Pruebas de Integridad [13] .....	31
1.5.3 Normas Internacionales para Sistemas termosifónicos (UNE 12976) [14] .....	36
1.5.4 Normas de Requerimientos Mínimos para la Instalación de Sistemas Solares Térmicos, para Calentamiento de Agua (basada en la NMX-ES-003-NORMEX-2008) [16] .....	39

## CAPÍTULO 2

IDENTIFICACIÓN Y CÁLCULO DE RECURSO SOLAR, POTENCIAL ENERGÉTICO Y SOMBRAS .....	42
2.1 El Sol [17] .....	43
2.2 Sistema Sol-Tierra [17] .....	44
2.3 Atmósfera [17] .....	46
2.4 Conceptos Generales .....	47
2.5 Instrumentos de Medición .....	48
2.6 Estimación Teórica y Bases de Datos Climatológicas .....	50
2.7 Cálculo del Potencial Energético (Solar) .....	52
2.8 Cálculo de Sombras .....	53

## CAPÍTULO 3

DIMENSIÓN Y SELECCIÓN DE EQUIPOS PRINCIPALES PARA CALENTAMIENTO SOLAR DE AGUA .....	56
3.1 Principios de Conversión Fototérmica [27] .....	56
3.2 Equipos Principales y Accesorios (Dispositivos Conversores Termosolares de Baja Temperatura) .....	58
3.3 Principios de Operación de un Sistema CSA [27] .....	58
3.3.1 Aplicaciones de los Sistemas CSA en el Sector Residencial [27] .....	59
3.3.2 Aplicaciones de los Sistemas CSA en el Sector Servicios [27] .....	59
3.3.3 Aplicaciones de los Sistemas CSA en el Sector Industrial [27] .....	64
3.4 Criterios de Diseño de un Sistema y Sus Componentes .....	70
3.5 Cálculos de Demanda y Fracción Solar .....	73

## **CAPÍTULO 4**

CONOCIMIENTO DE PRINCIPIOS BÁSICOS DE INSTALACIÓN Y MANTENIMIENTO.....	<b>83</b>
4.1 Montaje de Equipos y Componentes .....	<b>83</b>
4.1.1 Interconexión .....	<b>83</b>
4.2 Lectura de Planos, Instrucciones y Manuales .....	<b>88</b>
4.3 Criterios para el Correcto Montaje del Sistema Hidráulico .....	<b>89</b>
4.4 Principios de Operación.....	<b>90</b>
4.5 Tareas de Mantenimiento Preventivo y Correctivo.....	<b>92</b>

## **CAPÍTULO 5**

ANÁLISIS DE COSTOS Y AHORROS .....	<b>96</b>
5.1 Costos de Equipos, Montaje y Mantenimiento .....	<b>96</b>
5.2 Análisis Financiero y Ambiental.....	<b>96</b>
5.2.1 Análisis Técnico-Económico de Sistemas Termosifónicos en Vivienda .....	<b>98</b>
5.2.2 Análisis Técnico-Económico de Sistemas de calentamiento de Agua en Convección Forzada (F-chart) .....	<b>99</b>
5.2.3 Análisis Técnico-Económico de Sistemas de Calentamiento de Agua en Convección Forzada para Piscinas .....	<b>99</b>
5.3 Herramientas de Financiación (préstamo, ESCO) .....	<b>100</b>

## **CAPÍTULO 6**

MEDIDAS RELACIONADAS CON EDIFICIOS VERDES Y SUS MECANISMOS DE EVALUACIÓN .....	<b>102</b>
6.1 Modernización Eficiente con CSA .....	<b>102</b>
6.2 Guía de Construcción Sostenible para el Ahorro de Energía en Edificaciones.....	<b>102</b>
6.3 La Certificación LEED.....	<b>104</b>

## **CAPÍTULO 7**

PRÁCTICAS DE SISTEMA DE CSA.....	<b>108</b>
7.1 Práctica para la Obtención de la Curva de Rendimiento Térmico de Captadores Solares Planos (ISO9806:2017).....	<b>108</b>

## CAPÍTULO 1

# SITUACIÓN ACTUAL DEL SECTOR Y NORMATIVA APLICABLE

Crédito: E3 Energy · País: Sudáfrica · Sector: Industrial (cuero) · Tipo: Colector solar de placa plana.

## INTRODUCCIÓN

La seguridad de abastecimiento de energía y la protección del medio ambiente han adquirido una gran importancia los últimos años. En particular, la firma del Protocolo de Kioto de 1997 sobre el cambio climático reforzó la importancia de la dimensión medioambiental y del desarrollo sostenible en la política energética mundial y comunitaria.

El acuerdo de París dentro del marco de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático establece medidas para la reducción de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) a través de la mitigación, adaptación y resiliencia de los ecosistemas a efectos del Calentamiento Global, entrará en vigor para el año 2020, cuando finaliza la vigencia del Protocolo de Kioto. El acuerdo fue negociado durante la XXI Conferencia sobre Cambio

Climático (COP 21) por los 195 países miembros, adoptado el 12 de diciembre de 2015 y abierto para firma el 22 de abril de 2016 para celebrar el Día de la Tierra. Conforme al propio texto del instrumento internacional, tal como se enumera en su Artículo 2, el acuerdo tiene como objetivo “reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, en el contexto del desarrollo sostenible y de los esfuerzos por erradicar la pobreza” para lo cual determina tres acciones concretas que solo se pueden lograr con la activa participación del sector energía a nivel mundial:

a) Mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1.5 °C con respecto a los niveles preindustriales, reconociendo que ello reduciría considerablemente los riesgos y los efectos del cambio climático.

b) Aumentar la capacidad de adaptación a los efectos adversos del cambio climático y promover la resiliencia al clima y un desarrollo con bajas emisiones de gases de efecto invernadero, de un modo que no comprometa la producción de alimentos.

c) Elevar el flujo financiero a un nivel compatible con una trayectoria que conduzca a un desarrollo resiliente al clima y con bajas emisiones de gases de efecto invernadero.

Las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero y otros contaminantes pueden reducirse significativamente sustituyendo los combustibles fósiles por energías renovables. Además, las fuentes renovables tienen un carácter autóctono que permite ayudar a diversificar la balanza energética nacional y contribuye a mejorar la seguridad de suministro energético.

Son renovables aquellas fuentes de energía que se renuevan de forma continua en contraposición con los combustibles fósiles como el petróleo, carbón, leña, gas natural, gas Licuado del Petróleo (LP) y uranio, de los que existen unas determinadas disponibilidades agotables en un plazo de tiempo que puede ser más o menos largo. Constituyen una fuente de energía inagotable, ya que en su

origen proceden en su mayoría del sol (con la excepción de la geotérmica). Por ello tienen un carácter limpio y de bajo impacto ambiental.

Si bien se trata de fuentes energéticas y tecnologías muy heterogéneas, hay algunos elementos comunes que constituyen su sello de identidad:

- Contribuyen a la diversificación energética
- Incrementan el nivel de autoabastecimiento
- Son fuertemente creadoras de empleo local
- Tecnología accesible en la mayoría de los casos
- Son la mejor opción desde el punto de vista medioambiental.

El recurso existente de energía solar es inmenso. La cantidad de energía solar interceptada por la Tierra es más de tres órdenes de magnitud que la demanda energética mundial. Junto a la referida abundancia de algunas fuentes renovables, cabe también reseñar su buena distribución geográfica que contrasta con la de los combustibles habituales.

La energía obtenida a partir de las fuentes de energía renovables desempeña una función capital en la diversificación y la sostenibilidad de las fuentes de energía y en la lucha contra el cambio climático.



Photo by Sachin C Nair from Pexels

## 1.1 CAMBIO CLIMÁTICO Y GASES DE EFECTO INVERNADERO

El cambio climático es una variación del clima del planeta Tierra generada por la acción del ser humano y sus consecuencias pueden ser devastadoras si no reducimos drásticamente la dependencia de los combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero. De hecho, los impactos del cambio climático ya son perceptibles y quedan puestos en evidencia por datos como:

- El aumento de la temperatura global en 2016 fue de 1.1 °C, el mayor de la historia de la humanidad.
- Incremento del nivel del mar.
- El progresivo deshielo de las masas glaciares, como el Ártico.

Pero hoy también estamos viendo los impactos económicos y sociales, que serán cada vez más graves, como:

- Daños en las cosechas y en la producción alimentaria.
- Las sequías.
- Los riesgos en la salud.

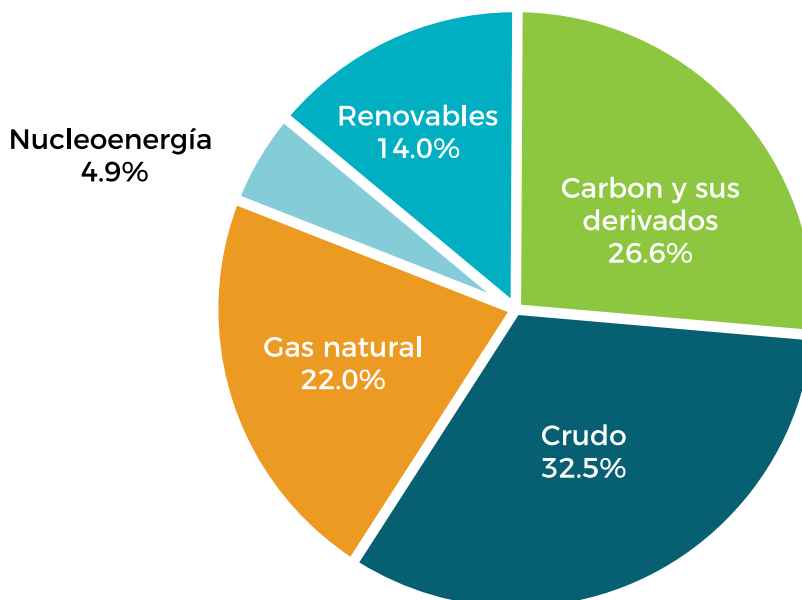
- Los fenómenos meteorológicos extremos, como tormentas y huracanes.
- Mega-incendios.

En los peores escenarios probables que los expertos reflejan, el aumento de temperatura podría llegar a los 4.8 °C para final de siglo. El cambio climático es un problema global que alcanza una perspectiva ambiental, política, económica y social en la que las peores previsiones también implican enormes pérdidas económicas. Y es que cuanto más tardemos en actuar, mucho más elevadas serán las inversiones para la adaptación al aumento de la temperatura. [1]

De acuerdo a los datos del reporte de la Agencia Internacional de Energía del 2018.[2] Todavía en 2016, el 85% de la energía usada (energía primaria) a nivel mundial provenía de combustibles fósiles o energía nuclear (ver Figura 1.1). Unas 90 empresas son responsables de casi las dos terceras partes de las emisiones mundiales.

En la Figura 1.2. se ejemplifica el efecto invernadero (calentamiento normal de la Tierra) y el calentamiento global. Algunas evidencias claras del cambio climático lo podemos observar en la Figura 1.3 y 1.4.

Fig. 1.1. Producción mundial de energía primaria en 2016. [2]



Fuente: World Energy Balances, IEA, edición 2018.

Fig 1.2 Efecto invernadero. [3]

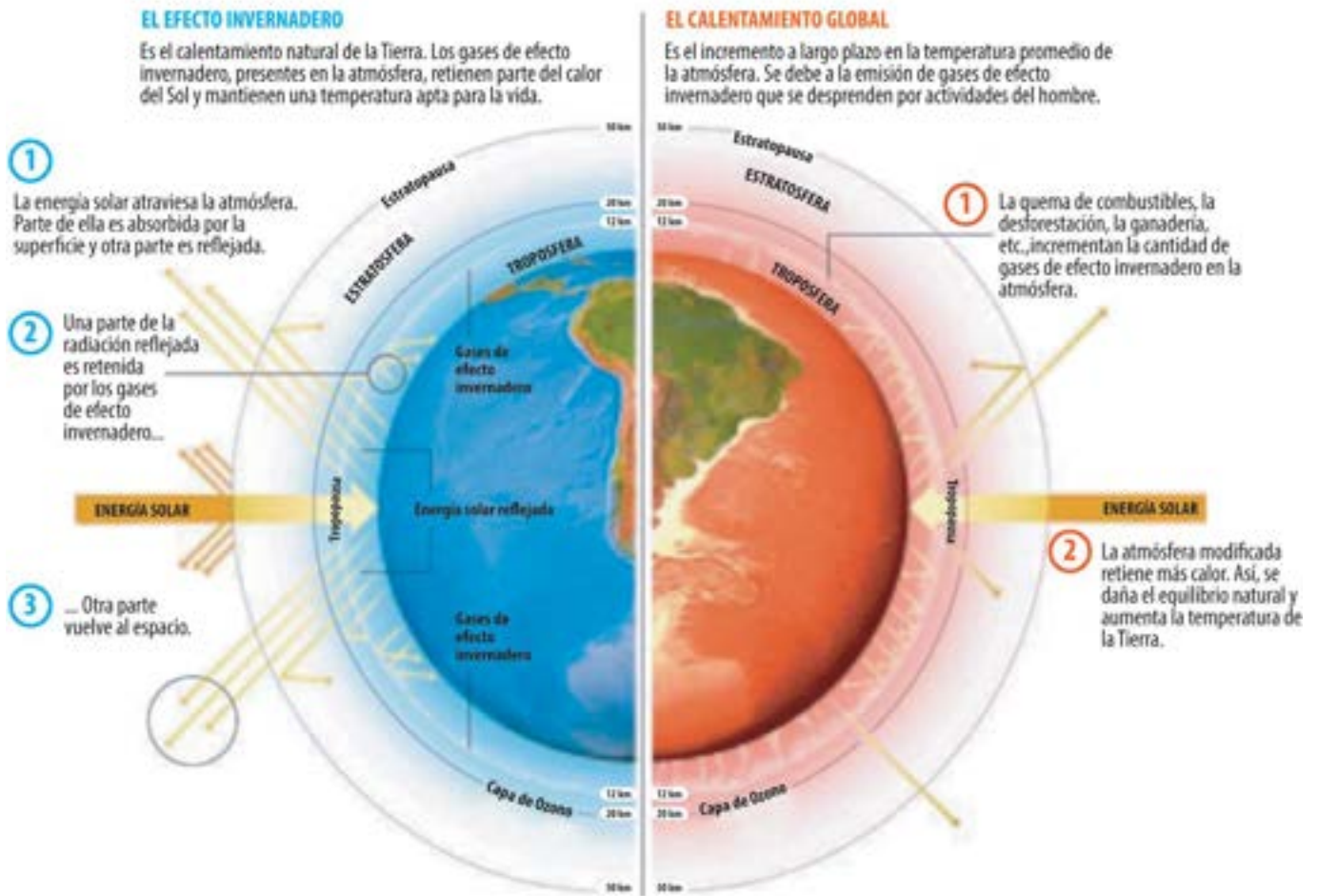
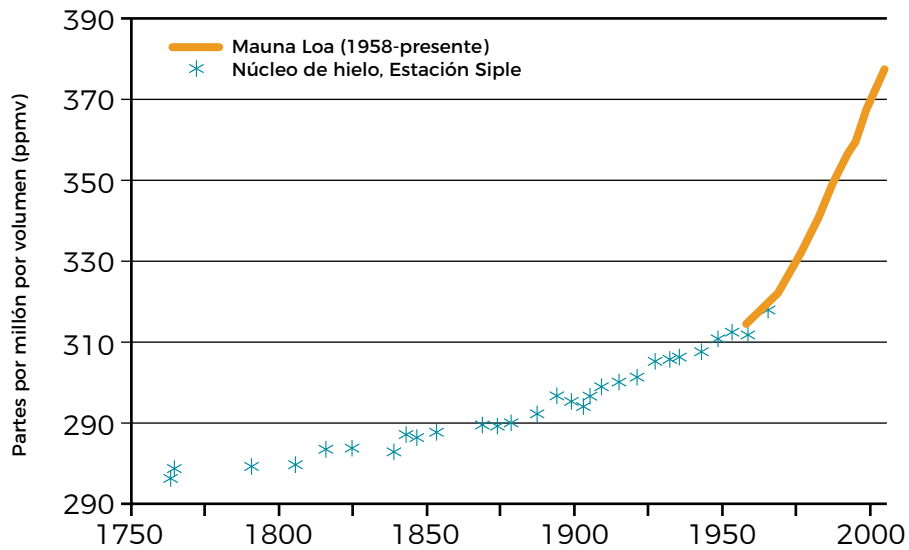
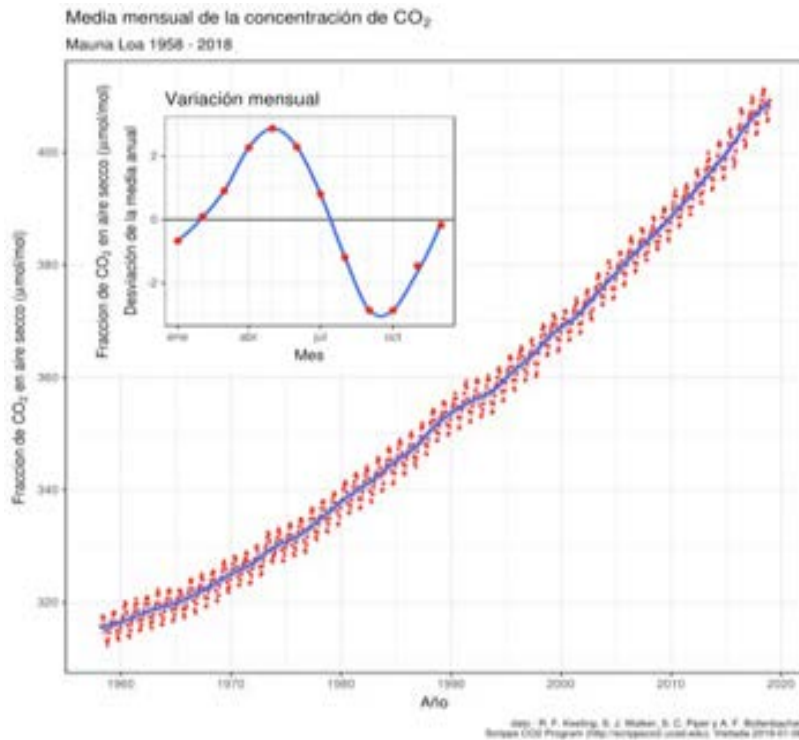


Fig 1.3 Concentración de dióxido de carbón en la atmósfera de 1750 a 2004. [4]



Fuente: Curva de Keeling

Fig 1.4 Concentración de dióxido de carbono en la atmósfera de 1750 a 2004. [4]



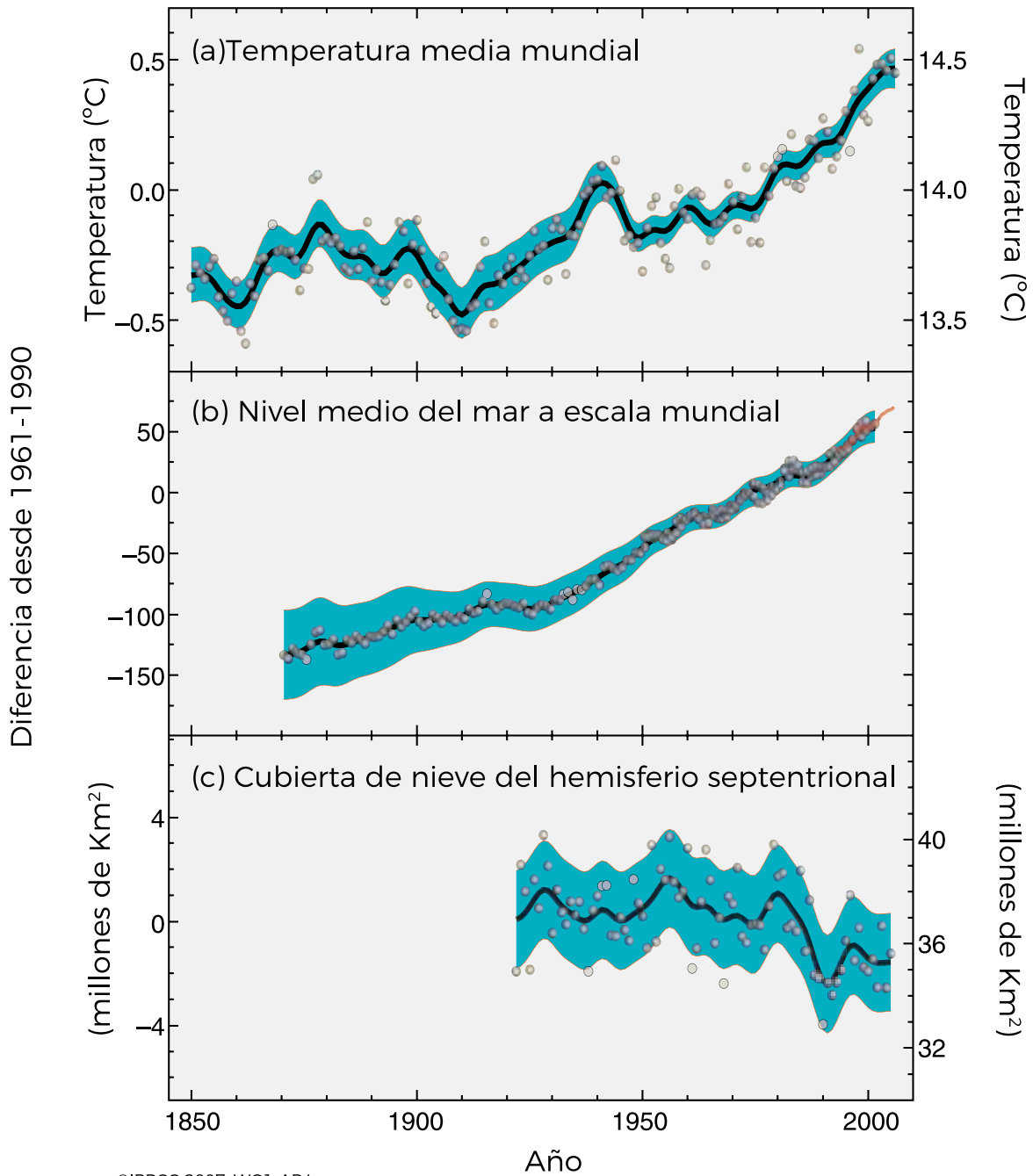
Según los datos del Observatorio del Mauna Loa en Hawái (Figura 1.4), la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera es actualmente de 415.26 partes por millón (ppm)[4], mucho más que en cualquier otro punto de los últimos 800,000 años, desde antes de la evolución del homo sapiens. La última vez que en la Tierra su superaron las 400 ppm, había árboles en el Polo Sur, destaca Science Alert.





Otros datos son los cambios en la temperatura media global, el nivel del mar y la cantidad de hielo en el hemisferio norte [5] (Figura 1.5). El conjunto de los últimos cinco años ha sido el más cálido a nivel global de la historia moderna desde 1880, de acuerdo a esos datos, el año más caluroso registrado fue 2016, seguido de 2017, 2015, 2018 y 2014, según la clasificación de la NASA.

**Fig 1.5 Cambios en la temperatura media global, el nivel del mar y la cantidad de hielo en el hemisferio norte [5].**



©IPCC 2007: WG1-AR4

## Los gases de efecto invernadero [6]

Se denominan gases de efecto invernadero (GEI) a los gases que forman parte de la atmósfera natural y antropogénica (emitidos por la actividad humana), cuya presencia contribuyen al efecto invernadero. Los gases principales implicados son:

**Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>):** principal responsable del efecto invernadero. La concentración en la atmósfera es debido al uso de combustibles fósiles para procesos industriales y medios de transporte. Su emisión procede de todo tipo de procesos de combustión: petróleo, carbón, madera o bien por las erupciones volcánicas.

**Metano (CH<sub>4</sub>):** su origen se encuentra en las fermentaciones producidas por bacterias anaerobias especializadas que se encuentran en zonas pantanosas, cultivos como el arroz y en las emisiones desde el tracto intestinal del ganado. También se produce por los escapes de depósitos naturales y conducciones industriales.

**Óxido nitroso (N<sub>2</sub>O):** Gas invernadero que se produce principalmente a través del uso masivo de fertilizantes nitrogenados en la agricultura intensiva. También lo producen otras fuentes

como las centrales térmicas, tubos de escape de automóviles y motores de aviones, quema de biomasa y fabricación de nylon y ácido nítrico.

**Los clorofluorocarbonos (CFC):** Son compuestos químicos artificiales que se encuentran presentes en pequeñas concentraciones en la atmósfera, pero tiene un potencial de calentamiento global mucho mayor que el Dióxido de Carbono. Tienen múltiples usos industriales en sistemas de refrigeración, como componentes de aerosoles, producción de aluminio y aislantes eléctricos entre otros.

**El ozono troposférico (O<sub>3</sub>):** también originado por la quema de fuentes de energía contaminantes.

**Vapor de agua:** consecuencia de la evaporación. La cantidad de vapor de agua en la atmósfera depende de la temperatura de la superficie del océano. La mayor parte se origina como resultado de la evaporación natural, en la que no se interviene la acción del hombre. Cabe destacar que el potencial de calentamiento y duración en la atmósfera del vapor de agua es mucho menor que todos los anteriores, y por ello no se ha regulado su concentración en el Acuerdo de París.





Crédito: Casolar · País: México · Sector: Industrial (comidas y bebidas) · Tipo: Colector solar de placa plana.

## 1.2 ESTRATEGIAS Y POLÍTICAS ENERGÉTICAS DE PAÍSES INDUSTRIALIZADOS [7]

De acuerdo al informe redactado por IRENA (International Renewable Energy Agency) [7], se están produciendo cambios fundamentales en el sistema energético mundial que afectarán a casi todos los países y tendrá amplias consecuencias geopolíticas. Las energías renovables se han trasladado al centro del panorama energético global. Los avances tecnológicos y la caída de los costos han hecho crecer más rápidamente las energías renovables que cualquier otra fuente de energía. Muchas tecnologías renovables son ahora competitivas en costos con combustibles fósiles en el sector energético, incluso antes de tener en cuenta sus contribuciones a las batallas contra la contaminación del aire y el cambio climático.

Estas tendencias están creando un impulso irreversible para una transformación global de la energía. Mientras que el aumento en la energía eólica, solar y otras energías renovables ha tomado lugar principalmente en el sector eléctrico, las nuevas tecnologías están permitiendo esta transformación en otros sectores. Los vehículos eléctricos y las bombas de calor están extendiendo el despliegue de las energías renovables en el transporte, la industria y los edificios. Innovaciones en digitalización y almacenamiento de energía están ampliando el potencial de las energías renovables para florecer de maneras inimaginables hace apenas una década.

El acelerado despliegue de energías renovables ha puesto en marcha una transformación global de la energía que tendrá profundas consecuencias geopolíticas. Tal como los combustibles fósiles han dado forma al mapa geopolítico en los últimos dos siglos, la transformación energética alterará la distribución global del poder, las relaciones entre los Estados, el riesgo de conflicto, y el desarrollo social, económico y ambiental.

Tres aspectos principales van a caracterizar y apuntalar la transición: la eficiencia energética, el crecimiento de las energías renovables, y la electrificación.

**Eficiencia energética** [7]. La eficiencia energética permite el crecimiento económico con menores insumos de energía. En el siglo XX, la tasa de crecimiento promedio de la demanda de energía fue del 3%, casi igual a la tasa de crecimiento del PIB mundial. En las últimas décadas, las mejoras en la eficiencia energética han roto este vínculo. Se pronostica que la demanda de energía primaria crecerá un 1% anual en el período hasta 2040.

**Crecimiento de las energías renovables** [7]. Las energías renovables se han convertido en la fuente de energía de más rápido crecimiento. Las principales fuentes de energía renovable son bioenergía, geotérmica, hidroeléctrica, oceánica, solar y eólica. Entre estos, la energía solar y la energía eólica están experimentando un crecimiento muy rápido, mientras que los otros están creciendo más gradualmente. La energía solar y eólica comparten una característica que es

en gran medida única para ellos: la cantidad de energía que generan varía con el clima y la hora del día. Es por esto que se denominan fuentes de energía renovables variables.

El impacto del crecimiento extraordinario de las energías renovables se ha sentido principalmente en el sector eléctrico. Desde 2012, las energías renovables han agregado más capacidad de generación de energía nueva que las fuentes de energía convencionales. La energía solar agregó más capacidad nueva en 2017 que las plantas de carbón, gas y nucleares combinadas. La energía eólica y solar ahora proporcionan el 6% de la generación eléctrica en todo el mundo, frente al 0.2% en 2000. En conjunto, las energías renovables representan alrededor de un cuarto de la generación eléctrica mundial. Países como Dinamarca ya generan más de la mitad de su electricidad a partir de fuentes de energía renovables variables. En 2017, la electricidad de Costa Rica se generó en su totalidad a partir de energía renovable durante 300 días. Durante varios días del año pasado, los sistemas de energía de Alemania, Portugal y Dinamarca pudieron funcionar completamente con energías renovables.

**Electrificación** [7]. La electricidad representa el 19% del consumo total de energía final, pero se espera que su participación crezca a medida que se produce una mayor electrificación de los sectores de uso final. El despliegue de bombas de calor y vehículos eléctricos, por ejemplo, permite que la electricidad se utilice para calefacción,

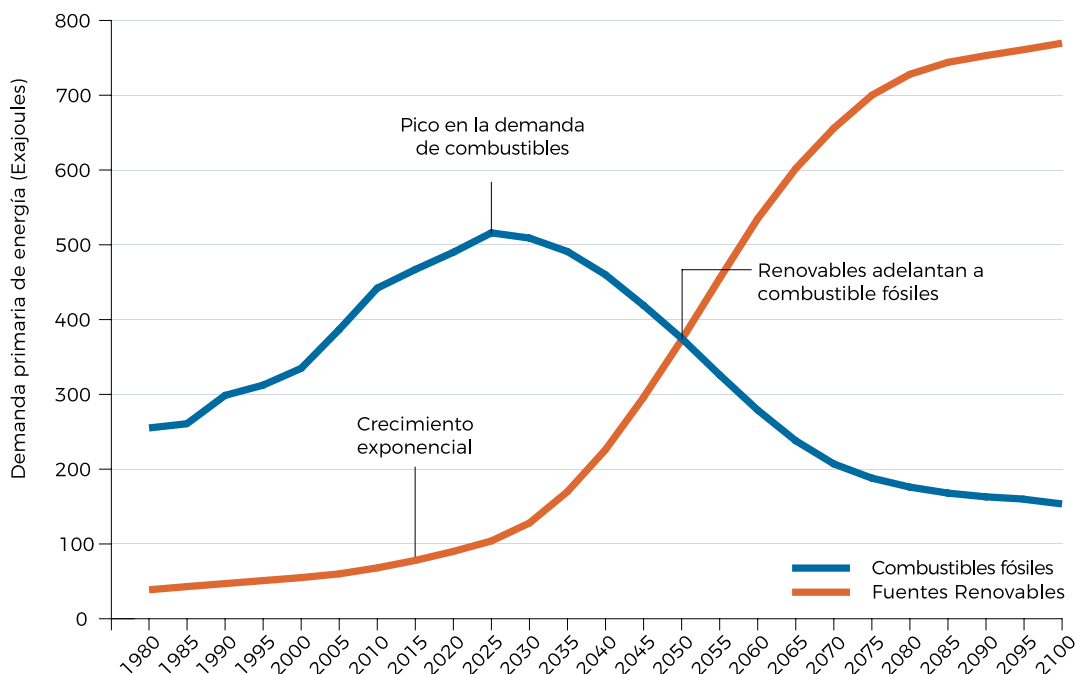
refrigeración y transporte. La electricidad ha sido el segmento de mayor crecimiento de la demanda de energía final, con un crecimiento de dos tercios más rápido que el consumo de energía en general desde 2000. Se espera que esta tendencia continúe. Desde 2016, el sector eléctrico ha atraído más inversiones que los sectores de petróleo y gas que tradicionalmente han dominado las inversiones en energía, otro reflejo de la actual electrificación de la economía mundial. La velocidad de la transformación de la energía es incierta. Debido a la complejidad de los sistemas de energía, existen tantos escenarios sobre el futuro de la energía como los pronosticadores. Sin embargo, los escenarios que modelan un futuro energético compatible con los objetivos del Acuerdo de París tienen una estructura similar: un pico a corto plazo en la demanda de combustibles fósiles, una rápida transición hacia las energías renovables y un largo descenso en la demanda de combustibles fósiles.

La figura 1.6 ilustra estas dinámicas. No es una predicción, pero muestra una posible vía que asume que el mundo es capaz de lograr el objetivo del Acuerdo de París para limitar el aumento de la temperatura por debajo de 2 °C.

Aunque la energía nuclear es una tecnología baja en carbono, las perspectivas de crecimiento de la energía nuclear parecen limitadas. Después de una rápida expansión en los años 1970 y 1980, el crecimiento de la energía nuclear se ha ralentizado en las últimas tres décadas. La participación de la generación nuclear en electricidad disminuyó del 17% en 2000 al 10% en 2017. Alrededor de



Fig 1.6 Marco de transición energética [7].



dos tercios de las centrales nucleares de hoy en día en las economías avanzadas tienen más de 30 años y se cerrarán en un futuro previsible a menos que se extiendan sus vidas. Algunos países están construyendo nuevas centrales nucleares eléctricas, especialmente China, India, Rusia y los Emiratos Árabes Unidos. En otros, los gobiernos están planeando eliminar la energía nuclear, como en Alemania, Suiza, España y Corea del Sur. Las seis fuerzas impulsoras para el rápido crecimiento de las energías renovables son:

**Costo decreciente de las mismas** [7]. A medida que los costos de las tecnologías de energía renovable han disminuido, el comercio de la energía renovable se ha convertido en un importante motor de cambio. Las tecnologías maduras de energía renovable, incluidas la energía hidroeléctrica y la energía geotérmica, han sido competitivas en cuanto a costos durante su vida útil. Sin embargo, tecnologías como la solar y la eólica también han ganado una ventaja competitiva como resultado de los avances tecnológicos y el aumento de la inversión. La fuerte caída en los costos de energía renovable y almacenamiento de energía ha sorprendido

incluso a los observadores más optimistas. La energía solar y eólica ahora pueden superar a las tecnologías de generación convencionales en costo en muchos de los principales mercados del mundo, incluso sin subsidios.

Desde 2010, el costo promedio de la electricidad de la energía solar fotovoltaica y eólica ha disminuido en un 73% y un 22% respectivamente. Los precios de las subastas sugieren que para 2020 el costo promedio de la electricidad generada por fuentes solares y eólicas estará en el extremo inferior de la electricidad de combustibles fósiles. Se espera que la disminución significativa de los costos continúe a lo largo de la próxima década.

**Contaminación y cambio climático** [7]. Los problemas causados por los combustibles fósiles, incluida la contaminación generalizada del aire y el cambio climático, han llevado a los gobiernos, las empresas, los inversores y el público a reconocer la necesidad de descarbonizar la economía mundial. La contaminación, causada principalmente por la quema de petróleo y carbón, hace que el aire sea peligroso para respirar en muchas ciudades. La Organización Mundial de la Salud estima que 9

de cada 10 personas en el mundo respiran aire contaminado que es peligroso para la salud y el bienestar, y que la contaminación del aire mata a 7 millones de personas cada año, lo que la convierte en la cuarta causa de muerte.

El cambio climático plantea una amenaza existencial para la humanidad y los ecosistemas de la Tierra. A menos que se tomen medidas urgentes para descarbonizar el sector energético, el mundo no logrará el objetivo del Acuerdo de París de mantener “el aumento de la temperatura promedio mundial muy por debajo de 2 °C por encima de los niveles preindustriales y de continuar los esfuerzos para limitar el aumento de la temperatura a 1.5 °C por encima de los niveles preindustriales”. Un informe reciente del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático presenta evidencias científicas cada vez más persuasivas de la necesidad de limitar el aumento de la temperatura a un máximo de 1.5 °C para evitar cambios duraderos o irreversibles, incluida la pérdida de ecosistemas vitales. Si se sigue la tendencia actual en relación con los niveles preindustriales, se aumentará las temperaturas globales en al menos 3 °C para finales de siglo.

La mayoría de los caminos hacia una economía baja en carbono requerirían un rápido despliegue de energía renovable y una duplicación de la eficiencia energética, dado que el sector energético representa dos tercios de las emisiones globales. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) [8], adoptados por los líderes mundiales

en las Naciones Unidas en septiembre de 2015, contienen un objetivo específico en materia de energía, cuyo objetivo es proporcionar acceso universal a los servicios energéticos modernos, duplicar la tasa de mejora de la eficiencia energética y aumentar sustancialmente la participación de las energías renovables en el mix energético mundial para 2030.

**Objetivos de energías renovables** [7]. Influenciados por el éxito comercial de las energías renovables y la necesidad de descarbonizar el sector energético, numerosos gobiernos han aumentado sus ambiciones y han tomado medidas para acelerar su despliegue de energía renovable. Hasta el momento, 57 países han desarrollado planes para descarbonizar completamente su sector eléctrico y 179 han establecido objetivos nacionales o estatales de energía renovable. Los gobiernos inicialmente apoyaron las energías renovables a través de subsidios y mandatos, pero se están moviendo cada vez más a subastas competitivas que están entregando precios bajos.

Muchos países están cambiando a las energías renovables porque carecen de reservas de petróleo y gas y desean ser menos dependientes de las importaciones de energía. India, por ejemplo, depende cada vez más de las costosas importaciones de energía, a menos que cambie de rumbo. Esta es una de las razones por las que ha adoptado al igual que otros países ambiciosos objetivos de energía renovable. Un país petrolero



Crédito: E3 Energy · País: Sudáfrica · Sector: Industrial (comidas y bebidas) · Tipo: Colector solar de placa plana.

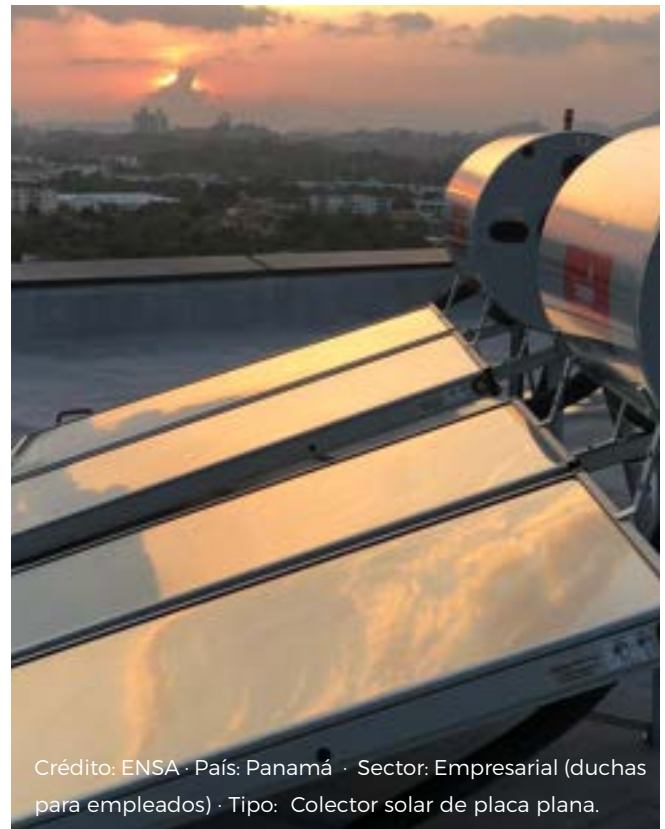
como los Emiratos Árabes Unidos, por ejemplo, establece un objetivo de 44% de las energías renovables en su suministro de energía y una reducción del 70% en sus emisiones de carbono para 2050. Rusia subastó 2 GW de fuentes renovables en 2017 y planea subastar otras 1 GW en 2018. En ciertos países, donde los gobiernos centrales han tardado en establecer objetivos de energía renovable, los gobiernos locales y los municipios han actuado en su lugar.

**Innovación tecnológica** [7]. Las innovaciones tecnológicas han desempeñado un papel importante en la aceleración del despliegue de energías renovables en los diferentes sectores. Las tasas de patentes sugieren que ha habido más innovación tecnológica en el campo de las tecnologías de energía limpia que en los campos de energía tradicionales, como los combustibles fósiles y la energía nuclear. A largo plazo, los biocombustibles de próxima generación y el hidrógeno renovable generado por la electrólisis pueden permitir que las energías renovables se extiendan a una creciente gama de sectores difíciles de electrificar, como la aviación, el transporte marítimo e industria pesada.

Las innovaciones en la digitalización y el almacenamiento de energía también están abriendo nuevas fronteras. Las nuevas tecnologías digitales, como las redes inteligentes, el internet de las cosas, el big data y la inteligencia artificial, se están aplicando en la industria de la energía, lo que ayuda a aumentar su eficiencia y acelerar el uso de energía renovable en los sistemas emergentes de generación y distribución inteligentes. También se están desarrollando nuevas tecnologías de energía para el almacenamiento de energía, vitales para las energías renovables variables, como la eólica y la solar.

**Acciones corporativas e inversionistas** [7]. Las acciones de las corporaciones también están impulsando el cambio. En la conferencia sobre el clima de diciembre de 2018 en Polonia, conocida como "COP24", un grupo de 415 inversionistas, que representan más de 32 billones de dólares, reafirmó su pleno apoyo al Acuerdo de París y se comprometió a mejorar la información financiera relacionada con el clima. Hicieron un llamado a los

gobiernos para que pongan un precio al carbono, eliminen los subsidios a los combustibles fósiles y eliminen gradualmente la producción de energía con carbón. El fondo de riqueza soberano de Noruega está tomando medidas para deshacerse del carbón, al igual que algunos bancos privados, incluido HSBC. Algunos de los principales bancos multilaterales de desarrollo, como el Banco Mundial, ya no financian la inversión en tecnología que utilice carbón. Compañías de seguros globales como Allianz y AXA han anunciado que eliminarán gradualmente la cobertura de seguros para proyectos de carbón en particular. Además, algunas de las principales compañías del mundo se están moviendo para obtener toda su electricidad de fuentes renovables y alentando a sus cadenas de suministro a hacer lo mismo. Tanto Apple como Microsoft anunciaron recientemente que sus instalaciones están completamente alimentadas por energía renovable. Muchas otras compañías, incluidas IKEA, Tata Motors y Wal-Mart, se han comprometido a obtener el 100% de su consumo de electricidad de fuentes renovables. Shell estableció un plan para reducir su huella de carbono neta, incluidas las emisiones de sus consumidores, en alrededor de un 20% para 2035.



Crédito: ENSA · País: Panamá · Sector: Empresarial (duchas para empleados) · Tipo: Colector solar de placa plana.

**Opinión pública** [7]. En la mayoría de los países de todo el mundo, los consumidores prefieren cada vez más comprar productos y servicios que tienen una menor huella de carbono, y los movimientos de la sociedad civil están ejerciendo presión sobre los gobiernos y las empresas para reducir la contaminación del aire y las emisiones de carbono. Los líderes religiosos se están sumando a los argumentos morales para actuar sobre el cambio climático. El Papa Francisco, por ejemplo, ha respaldado la eliminación gradual de los combustibles fósiles en la encíclica Laudato Si. Se han realizado manifestaciones contra la contaminación del aire en numerosas ciudades, desde Pekín hasta Londres. El litigio también está en aumento. Un tribunal de La Haya ordenó al gobierno holandés que redujera las emisiones de gases de efecto invernadero de los Países Bajos en al menos un 25% para 2020 en comparación con los niveles de 1990. Algunas de las principales compañías de petróleo y gas del mundo están envueltas en disputas legales con ciudades, estados e incluso niños por el papel de la industria en el calentamiento global.

## ¿Por qué las energías renovables transformarán la geopolítica? [7]

La historia principal de la transición energética es el aumento de las energías renovables, especialmente la energía solar y eólica, y la futura disminución de los combustibles fósiles. Las energías renovables difieren en muchos aspectos de los combustibles fósiles, y estas diferencias tendrán consecuencias geopolíticas: 1) los recursos de energía renovable están disponibles de una forma u otra en la mayoría de los países, a diferencia de los combustibles fósiles que se concentran en ubicaciones geográficas específicas. Esto reduce la importancia de los puntos de choque de energía actuales, como los estrechos canales en rutas marítimas ampliamente utilizadas que son fundamentales para el suministro mundial de petróleo; 2) la mayoría de las energías renovables toman la forma de flujos, mientras que los combustibles fósiles son existencias. Las reservas de energía se pueden almacenar, lo que es útil; pero solo se pueden usar una vez. En contraste, los flujos de energía no se agotan y son más difíciles





de interrumpir; 3) las fuentes de energía renovable se pueden desplegar en casi cualquier escala y se prestan mejor a formas descentralizadas de producción y consumo de energía. Esto se suma a los efectos democratizadores de la energía renovable; 4) las fuentes de energía renovable tienen costos marginales casi nulos, y algunas de ellas, como la solar y la eólica, disfrutaron de reducciones de costos de casi el 20% por cada duplicación de capacidad. Esto mejora su capacidad para impulsar el cambio, pero requiere soluciones regulatorias para garantizar la estabilidad y la rentabilidad.

La transformación de energía será uno de los elementos principales que reformarán la geopolítica en el siglo XXI, junto con las tendencias demográficas, de desigualdad, urbanización, tecnología, sostenibilidad ambiental, capacidad militar y política doméstica en los principales Estados.

La transición generará considerables beneficios y oportunidades. Fortalecerá la seguridad energética y la independencia energética de la mayoría de los países; promoverá la prosperidad y la creación de empleo; mejorará la seguridad alimentaria y del agua así como la sostenibilidad y la equidad. Es probable que disminuya la cantidad de conflictos relacionados con la energía. Al mismo tiempo, la transformación energética generará nuevos retos. Los países exportadores de combustibles fósiles pueden enfrentar inestabilidad si no se reinventan para una nueva era energética; un rápido alejamiento de los combustibles fósiles podría crear un choque financiero con consecuencias significativas para la economía mundial; los trabajadores y las comunidades que dependen de los combustibles fósiles pueden verse afectados negativamente; y pueden surgir riesgos con respecto a la ciberseguridad y nuevas dependencias de ciertos minerales. A pesar de las dificultades, la transformación de la energía finalmente llevará al mundo en la dirección correcta al abordar el cambio climático, combatir la contaminación y promover la prosperidad y el desarrollo sostenible. A medida que el mundo se prepara para las consecuencias geopolíticas de la transformación energética.



Granja eólica Sierra de los Caracoles en Uruguay

## 1.3 USOS Y APLICACIONES DE CALENTADORES SOLARES DE AGUA (CSA) [9]

### 1.3.1 Contexto Mundial

La radiación solar se transforma en energía térmica, ya sea en forma de agua caliente, aire caliente, etc., por medio de los llamados captadores solares térmicos (el principio fundamental de funcionamiento de un captador solar se basa en el aprovechamiento de la propiedad que posee una superficie revestida de negro o de una sustancia de material selectivo, de absorber la radiación solar en una alta proporción), que pueden clasificarse en los siguientes tipos:

**Captador solar plano.** También llamado panel solar térmico, está formado por lo general por una superficie plana a la que se adhiere una serie de tubos por los que circula un fluido que se

calienta a su paso por el panel. Todo el conjunto está revestido de una superficie negra absorbente selectiva. Pueden ser, a su vez:

**Captador plano descubierto** (fig. 1.7a). Sistema más económico y de alto rendimiento, cuando se operan a temperaturas de uso de más de 40°C, utilizado esencialmente para el calentamiento de agua en piscinas.

**Captador plano protegido** (fig. 1.7b). Para evitar las pérdidas de calor por convección (pérdidas térmicas), y además proteger al conjunto de las condiciones atmosféricas, se coloca una cubierta transparente (vidrio, policarbonato, etc.) entre la superficie de absorción y el medio ambiente. Para evitar la pérdida de calor por conducción, el conjunto lleva en su parte posterior y en algunos casos en los laterales una capa de material aislante térmico que puede ser de poliuretano expandido, fibra de vidrio, etc. Finalmente cuenta con un marco o caja para darle rigidez al captador.

Figura 1.7. Captador solar plano: (a) captador plano descubierto; (b) captador plano protegido [9].

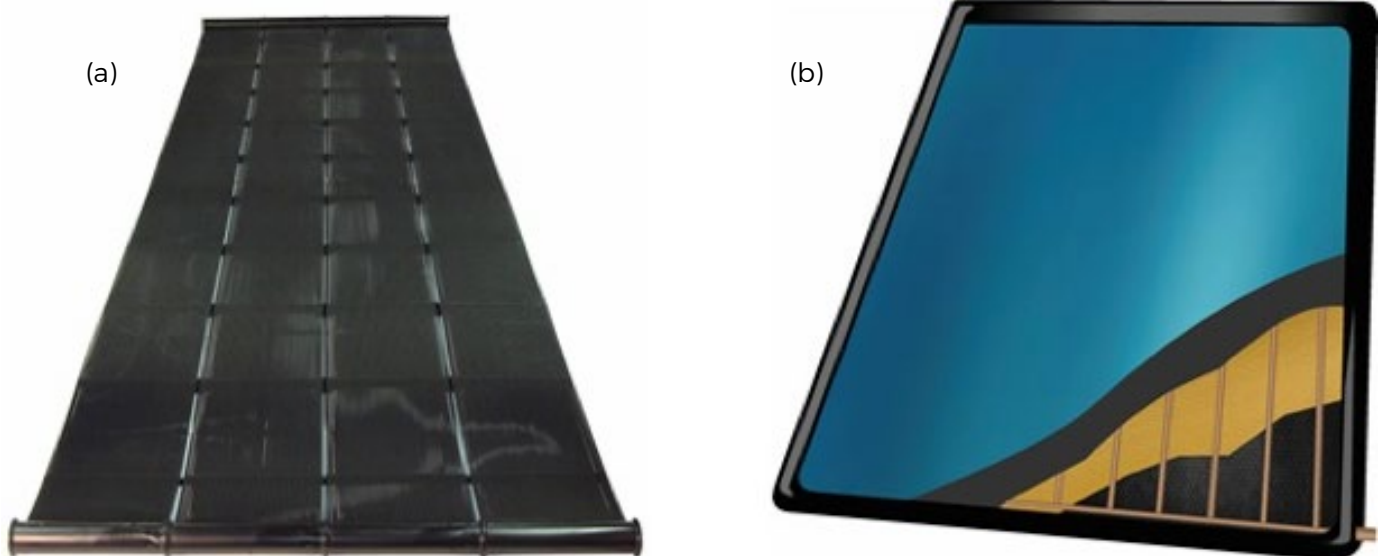
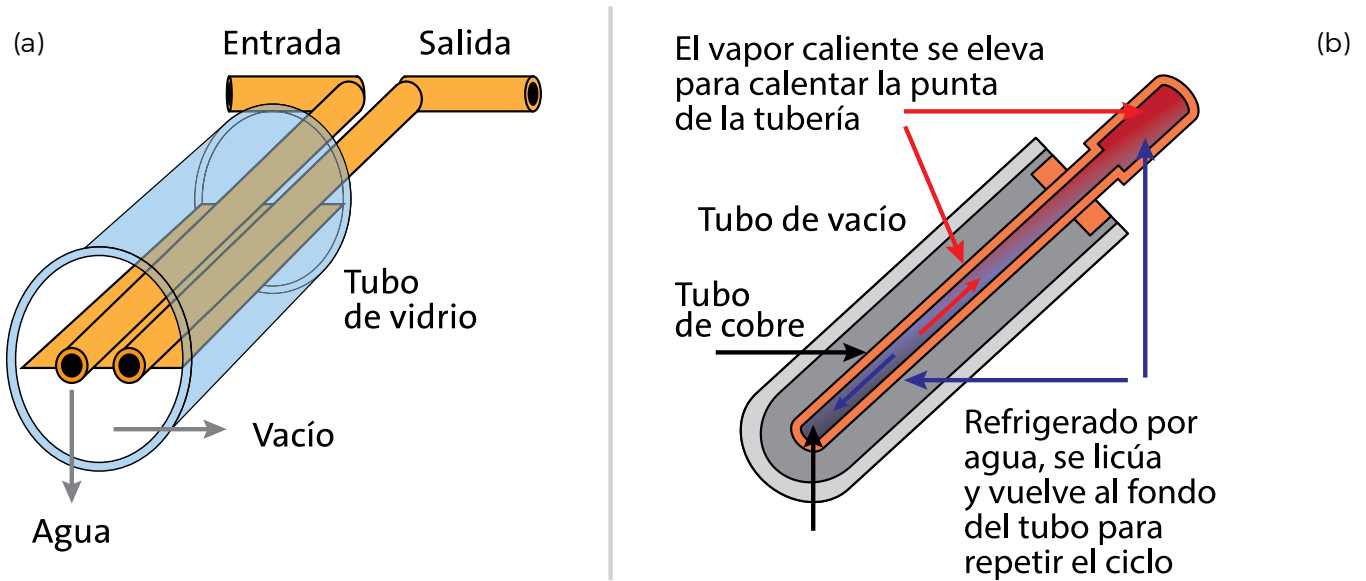


Figura 1.8. Captador de tubos de vacío: (a) flujo directo, (b) flujo indirecto [9].



**Captador de tubos de vacío.** La superficie captadora está aislada del exterior por uno o un doble tubo de vidrio que crea una cámara al vacío. Existen dos tipos:

- **Flujo directo** (fig. 1.8a). El fluido circula por los tubos, como en los captadores planos.
- **Flujo indirecto o heat pipe** (fig. 1.8b). El calor evapora un fluido en el tubo (tubo de calor), y éste transmite su energía al condensarse en el extremo.

De acuerdo con su funcionamiento los captadores solares se clasifican en dos tipos:



- **Activos.** Cuentan con una bomba o algún tipo de energía externa para mover el agua o fluido dentro de su circuito.
- **Pasivos.** No requieren energía externa para funcionar. Mueven el agua o fluido dentro del sistema por virtud del principio de convección natural (sistemas termosifónicos).

Los calentadores solares más comunes para calentamiento de agua en vivienda son los sistemas termosifónicos que integran un tanque de acumulación del agua caliente en la parte superior del captador solar. El agua en el captador

se calienta debido a la radiación solar y, por diferencia de densidades, el agua caliente de la parte superior del captador fluye hacia el tanque de almacenamiento localizado por encima del captador, mientras que el agua menos caliente y con mayor densidad localizada en la parte inferior del tanque de almacenamiento sale hacia la parte inferior del captador para completar el ciclo. Las diferencias en los sistemas termosifónicos más utilizados se muestran en la Tabla 1.1.

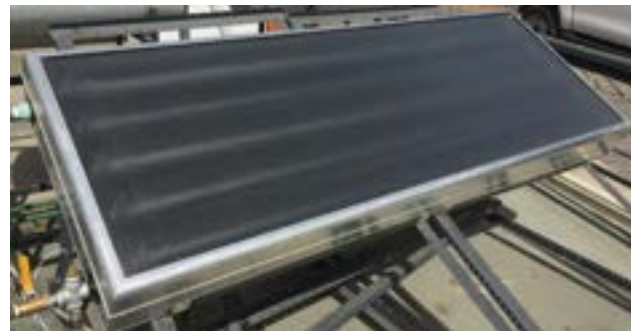
Además de los sistemas termosifónicos que existen en el mercado, sobre todo para regiones cálidas, los sistemas autocontenidos (fig. 1.9). Son los calentadores solares más simples que se pueden concebir, ya que consisten simplemente en un recipiente (uno grande o varios pequeños, etc.) dispuesto de tal manera que presente su mayor área de exposición al Sol. Esta superficie se pinta de negro o se cubre con una superficie selectiva y hace las veces de captador solar. El recipiente se llena con agua, que se calienta directamente por contacto con la cara expuesta al Sol. Por los lados y el fondo se aísla térmicamente para evitar las pérdidas de calor. La eficiencia térmica de este tipo de calentadores es relativamente alta, del orden de 45%, si se evalúa únicamente para el período diurno. Esta eficiencia cae drásticamente en general si se toma en cuenta la pérdida nocturna.

**Tabla 1.1 Sistemas termosifónicos [9].**

	<b>Sistema con captador solar plano</b>	<b>Sistema con tubo al vacío de flujo directo</b>	<b>Sistema con tubo al vacío de flujo indirecto (heat pipe)</b>
	 <p>Imagen [9]</p>	 <p>Imagen [9]</p>	 <p>Imagen [9]</p>
<b>Países de fabricación</b>	<p>México, EUA, Alemania, España, Israel, Grecia, China, Brasil, Turquía, etc.</p>	<p>Prácticamente sólo en China; existen fábricas en otros países que hacen los tanques pero importan los tubos de vacío.</p>	<p>China, Alemania, Austria, Australia, Inglaterra, etc.</p>
<b>¿Resisten presión?</b>	<p>Sí. Pueden conectarse a tanques elevados, hidroneumático o presión municipal sin ningún riesgo.</p>	<p>No. Sólo pueden operarse a presión atmosférica. Hay proveedores que le adicionan un tanque flotador que rompe la presión, pudiendo ocasionar un desbalance en la red hidráulica del domicilio donde se instale.</p>	<p>Sí. Pueden conectarse a tanques elevados, hidroneumático o presión municipal sin ningún riesgo.</p>
<b>¿Pueden quedarse sin agua o llenarse cuando están calientes por causa de la radiación solar?</b>	<p>Sí. No hay ningún riesgo si falta el agua en el sistema y resisten choques térmicos sin problemas.</p>	<p>No. Pierden su garantía y los sellos se dañan. Los tubos pueden romperse ya que no son tubos pyrex que resisten choques térmicos.</p>	<p>Sí. No hay ningún riesgo si falta el agua en el sistema y resisten choques térmicos sin problemas.</p>
<b>¿Resisten granizo?</b>	<p>Sí. Los equipos que cuentan con vidrio templado son resistentes a impactos severos, granizo, pedradas y vandalismo.</p>	<p>En general puede resistir granizo de hasta 25 mm, pero una granizada fuerte rompe los tubos. No son vidrios templados.</p>	<p>En general puede resistir granizo de hasta 25 mm, pero una granizada fuerte rompe los tubos. No son vidrios templados.</p>
<b>¿Son fáciles de instalar?</b>	<p>Tan sencillo como colocar el tanque sobre la base, colocar dos conexiones y conectar entrada y salida de agua fría y caliente.</p>	<p>Requieren una gran cantidad de uniones, una por cada tubo al vacío que contenga el equipo, lo que incrementa la posibilidad de fugas o daños.</p>	<p>Requieren una gran cantidad de uniones, una por cada tubo al vacío que contenga el equipo.</p>
<b>Espesor de la cubierta exterior</b>	<p>Existen equipos con vidrio y policarbonato. En el caso del vidrio, éste debe ser templado y de al menos 3.2 mm. En el caso del policarbonato, éste suele ser de 6 mm.</p>	<p>El espesor de la pared de los tubos suele ser de vidrio de 1.6 mm no templado, lo que los hace de frágil manejo. Hay equipos más resistentes con espesores de 2 y hasta 3 mm.</p>	<p>El espesor de la pared de los tubos suele ser vidrio de 1.6 mm no templado, lo que los hace de frágil manejo. Hay equipos más resistentes con espesores de 2 y hasta 3 mm.</p>

	<b>Sistema con captador solar plano</b>	<b>Sistema con tubo al vacío de flujo directo</b>	<b>Sistema con tubo al vacío de flujo indirecto (heat pipe)</b>
	 Imagen [9]	 Imagen [9]	 Imagen [9]
<b>Conexión entre tanque y captador</b>	Conexiones roscadas o soldadas muy seguras.	Vidrio contra empaque de silicón. Si se rompe un sello se vacía el sistema.	Conexiones roscadas o a presión de cobre insertadas al tanque. Muy seguras.
<b>Tanque termo</b>	De acero fabricado en placa robusta con acabado vidriado anticorrosivo. Para operar a presión.	De acero inoxidable fabricado en lámina de espesores bajos, en varios casos inferiores a 0.5 mm.	De acero inoxidable fabricado en placa que les permite operar a presión.
<b>Temperatura que entrega el sistema en un día soleado estándar (19 MJ/m<sup>2</sup> día y 25 °C)</b>	Dependiendo del fabricante entre 50-60 °C. Ningún riesgo de daño en tuberías o quemaduras.	Dependiendo del fabricante entre 50-70 °C. Riesgo de quemaduras y daños en tuberías si no son las adecuadas.	Dependiendo del fabricante entre 50-70 °C. Riesgo de quemaduras y daños en tuberías si no son las adecuadas.

Figura 1.9. Sistemas solares autocontenidos [9].



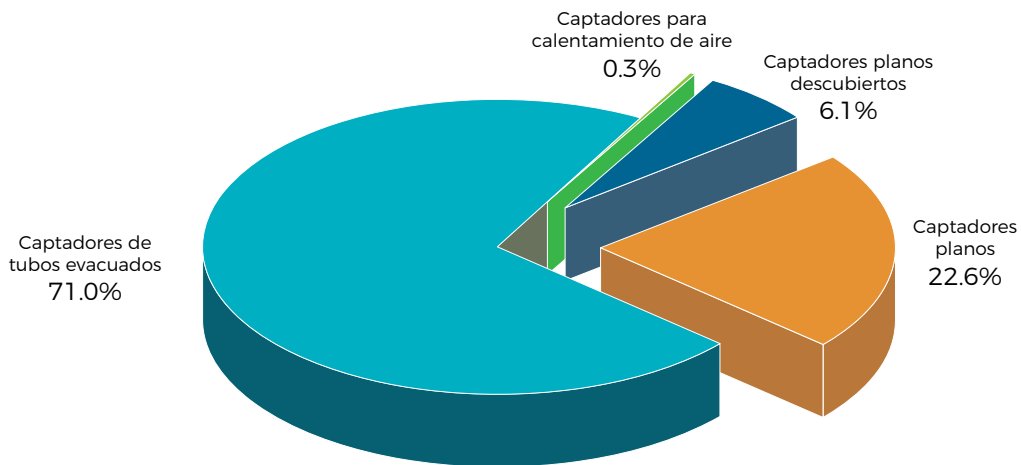
## Situación de la tecnología [10]

En 2017 la superficie mundial de captadores solares de agua en operación fue de 678,829,894 m<sup>2</sup>, distribuidos de la siguiente manera (fig. 1.10): captadores planos descubiertos (6.05%), captadores planos cubiertos (22.63%), captadores de tubos de vacío (71.05%) y captadores para calentamiento de aire (0.26%). China tiene instalados el 70.61% de todos los captadores existentes en el mundo y de la superficie de captadores de tubos de vacío en operación en el mundo, China tiene el 90.5% del total.

De los sistemas instalados hasta 2017, los sistemas termosifónicos de agua caliente a nivel mundial representan el 78%, mientras que el 22% restante es de sistemas de convección forzada.

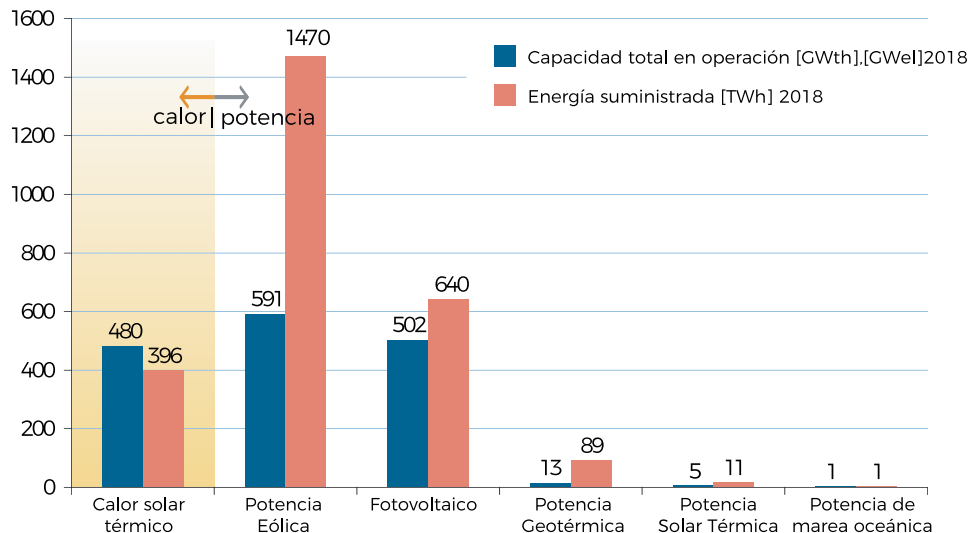
La figura 1.11 muestra la distribución al 2018 de la capacidad global en operación y energía suministrada por tecnología renovable. La solar térmica representa el tercer lugar solo superada por el rápido crecimiento de la energía eólica y fotovoltaica [10]

**Figura 1.10. Capacidad instalada por tecnología al 2017 [10].**



**Figura 1.11. Capacidad global en operación y energía suministrada por tecnología [10].**

Capacidad global en operación [GWel], [GWth] y energía suministrada [Twhel], [TWth], 2018



### 1.3.2 Otras Tecnologías Termosolares Existentes [9]

Captadores solares para calentamiento de aire. Son captadores solares cuyo fluido de trabajo es el aire en lugar del agua, pero constan básicamente de las mismas partes que los captadores de agua con la única diferencia que en general utilizan conductos más grandes ya que requieren pasar un mucho mayor volumen de aire comparado con los que utilizan agua. Hay muchas aplicaciones basadas en el acondicionamiento térmico de espacios (secado de alimentos, incubación, agricultura protegida, salas climatizadas, calentamiento de espacios habitacionales y laborales), en las cuales el aire puede calentarse de manera directa. Existen diferentes formas de las trayectorias del flujo de aire, las más comunes son las siguientes: el aire pasa entre la cubierta

transparente y el absorbedor, el flujo de aire pasa por debajo del absorbedor y entre el aislamiento térmico, el aire fluye a ambos lados del absorbedor, el aire pasa a través de un absorbedor tipo poroso o perforado, etc. (ver figura 1.12).

#### Captador cilíndrico parabólico (CPC).

Al concentrar la radiación solar en el receptor puede utilizarse en rangos de baja y mediana temperatura. Contiene un receptor cilíndrico, mostrado en la figura 1.13a, el cual está formado por dos segmentos, una sección de involuta y un segmento de una parábola. El primer segmento va de la parte inferior del receptor al punto P, que es la involuta de la sección transversal del receptor, mientras que el segundo segmento va del punto P a la parte superior de la curva. En la figura 1.13b se muestra un captador plano tipo CPC.

Figura 1.12. Tipos de captadores solares para calentamiento de aire [9]

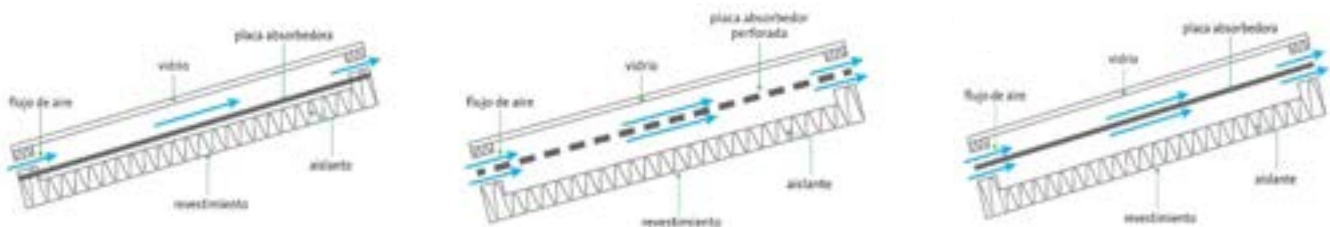
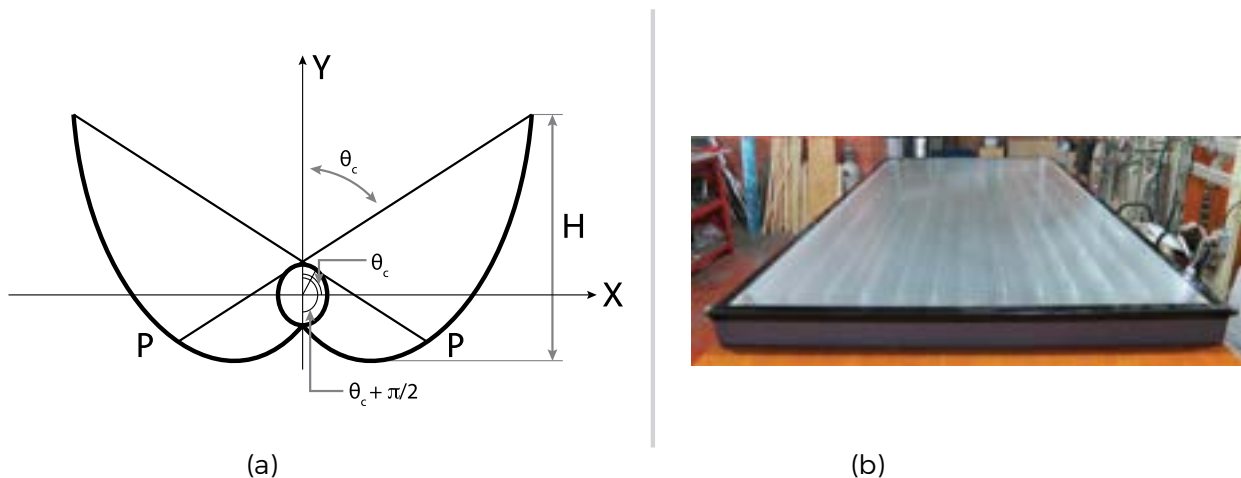


Figura 1.13. Captador cilíndrico parabólico (CPC): (a) geometría, (b) equipo comercial [9]



### Concentrador de canal parabólico.

Los canales parabólicos pueden operar a temperaturas de hasta 400 °C como resultado de la concentración de la radiación solar. El factor de concentración reduce la superficie del absorbedor con relación al área de apertura, y en consecuencia se reducen sustancialmente las pérdidas térmicas. Sin embargo, este tipo de concentradores requiere seguimiento del Sol que típicamente se realiza en un eje. Tanto económica como técnicamente, este tipo de concentradores son los más favorables para aplicaciones de altas temperaturas como los son algunos procesos

de calor para la industria y la producción de electricidad (ver figura 1.14).

### Receptor de torre central

(Ver Figura 1.15). Es un tipo de horno solar que usa una torre para recibir luz solar concentrada. Usa un conjunto de espejos planos, móviles (llamados heliostatos) para enfocar los rayos del sol sobre una torre colectora (el blanco).

En la tabla 1.2 se muestra sistemas termosolares existentes en función de su movimiento, concentración y temperatura de operación.

Figura 1.14. Concentrador de canal parabólico [9]

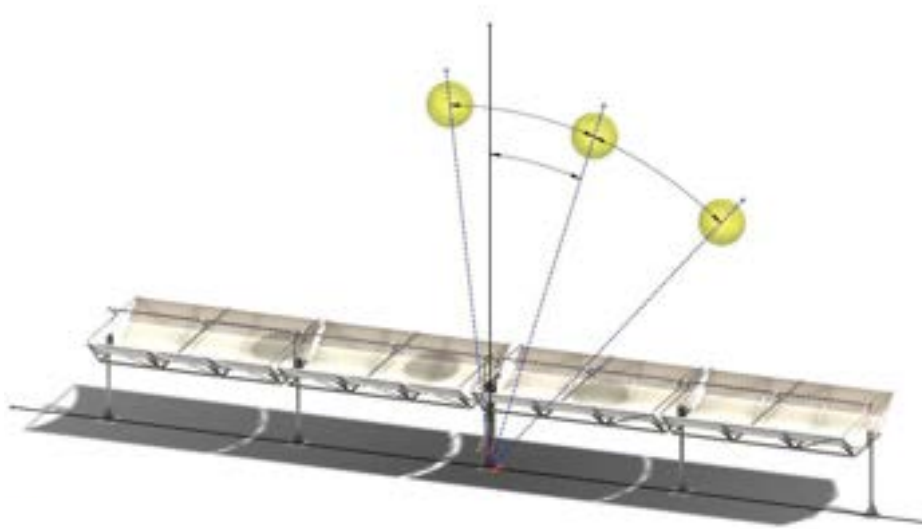
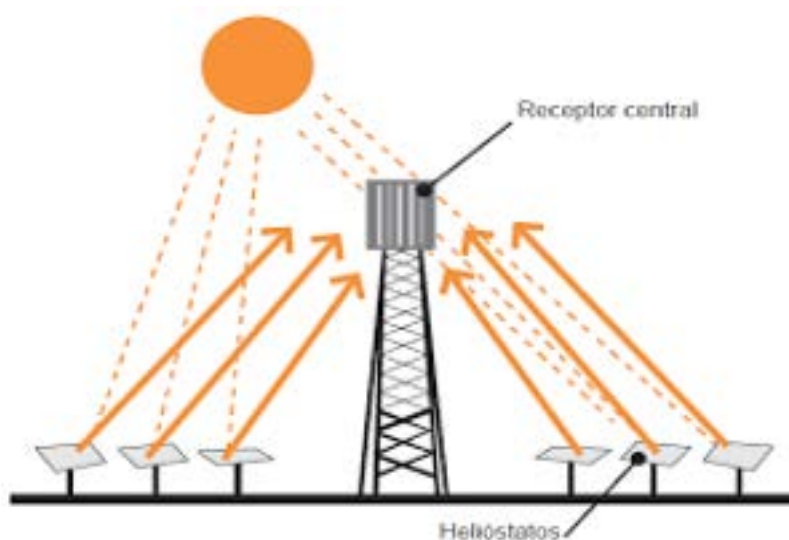


Figura 1.15. Receptor de torre central [9]





**Tabla 1.2. Sistemas termosolares**

Movimiento	Tipo de captador	Tipo de absorbedor	Factor de concentración	Rango de temperatura de operación
Estacionario	Captador plano	Plano	1	30-90
	Tubos evacuados	Tubular	1	50-120
	Concentrador parabólico compuesto (CPC)	Tubular	1-5	60-240
Seguimiento en un eje	Concentrador tipo Fresnel	Tubular	10-40	60-400
	Canal parabólico	Tubular	15-45	60-400
Seguimiento en dos ejes	Plato parabólico	Puntual	100-1000	100-1000
	Receptor de torre central	Puntual	100-1500	150-1000

## 1.4 DESARROLLO Y EVOLUCIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA EN PANAMÁ

El proyecto “Desarrollo del Mercado de Calentadores Solares de Agua en Panamá” (Termosolar Panamá) tiene como objetivo promover la inversión en tecnologías de energías renovables, así como la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> de forma costo eficiente, iniciando por el desarrollo de un mercado para sistemas de calentadores solares de agua. La fecha de arranque de este programa es el 12 de julio de 2018 y el de finalización el 31 de julio de 2021 con un presupuesto cercano a los 2 millones de dólares.

Los componentes principales son:

**1) Marco político regulatorio para la promoción de sistemas de calentamiento solar de agua (SCSA) y toma de decisiones políticas informadas.** En este componente se pretende como resultados esperados los siguientes: a) un set de regulaciones e instrumentos de políticas para SCSA; b) análisis de mercado de SCSA y su análisis económico; c) plan de acción nacional para energía solar térmica, monitoreo y evaluación.

**2) Control de calidad y fortalecimiento del sector de suministro de equipos para SCSA.** En este componente se pretende obtener como resultados esperados lo siguiente: a) análisis de necesidades de construcción de capacidades en el sector de la oferta, diseño de edificaciones y Q&A para SCSA; b) modificación de la currícula de la UTP y el INADEH para incluir SCSA en sus planes de estudio, capacitación y entrenamiento en las instituciones educativas participantes y el sector profesional para el diseño, instalación y mantenimiento de SCSA y proceso de certificación de los mismos; c) establecimiento de normas y estándares de control y aseguramiento de calidad; d) infraestructura para verificar y cumplir con las normas y estándares de calidad; e) plan de negocios para la cámara panameña de energía solar.

**3) Incremento en la sensibilización y mecanismos de apoyo para el usuario final.** En este componente se pretende obtener como resultados esperados lo siguiente: a) sensibilización por diferentes medios informativos para tomadores de decisiones, sector financiero, proveedores de tecnología y usuarios finales de los SCSA; b) promover un mecanismo financiero para el usuario final que permita invertir en SCSA; c) campaña publicitaria de mercadeo de SCSA.

4) **Implementación de proyectos piloto y demostrativos.** En este componente se pretende obtener como resultados esperados lo siguiente: a) identificación, auditorías energéticas y estudios de factibilidad de SCSA; b) 100 proyectos piloto de SCSA instalados en sectores públicos y privados.

De acuerdo con datos de la secretaría nacional de energía de Panamá en 2011 se tenían 300 m<sup>2</sup> de SCSA instalados de los cuales tan solo el 10% estaba en funcionamiento. Un estudio muy completo realizado por Termosolar Panamá da las áreas potenciales de SCSA, los resultados de este estudio se muestran en la tabla 1.3.

Si el total potencial estimado fuese real hoy y se divide entre la población de Panamá (4,037,043 habitantes), se obtiene que habría un área total instalada equivalente a 0.25 m<sup>2</sup> per cápita.

## 1.5 ASPECTOS REGULATORIOS Y TÉCNICOS SOBRE CSA

Para impulsar el desarrollo de los SCSA se requiere mayor certidumbre para los usuarios sobre la calidad de los equipos y contar con una “buena instalación”. Se han desarrollado para tal fin una normatividad que está evolucionando y que es importante vigilar su cumplimiento. Es imperiosa la elaboración de Normas Nacionales basadas en las Normas Internacionales ya existentes para obligar a todos los importadores y fabricantes de equipos de SCSA a que cumplan con un mínimo de especificaciones.

### 1.5.1 Norma Energía Solar - Definiciones y Terminología (basada en la ISO 31-6: 1992 y la ISO-9488-1999) [11][12]

El objetivo de esta norma es uniformar el lenguaje usado en el ámbito de la energía solar en sus diferentes aplicaciones. Debido a que esta rama del conocimiento ha surgido a partir de diferentes disciplinas científicas y tecnológicas en las que se emplean vocabularios especializados, razón por la cual se requiere usar un mismo lenguaje y así evitar confusiones en conceptos y nombres de variables ampliamente utilizados en la práctica.

**Tabla 1.3 Superficie instalada por sector**

Sector	m <sup>2</sup>
Hotelero	28.184
Salud	10.099
Agro-Industrial	60.000
Residencial	917.817
<b>Total</b>	<b>1.016.100</b>

Tiene una concordancia parcial con la norma ISO 31-6: 1992 [11] y la ISO-9488-1999 [12]. Establece los vocablos, simbología y la definición de los conceptos más usados en el campo de la investigación y el desarrollo de la tecnología para el mejor uso de la radiación solar como fuente alternativa de la energía con la finalidad de que en esta temática se utilice un lenguaje único en los ámbitos científicos y técnicos.

### 1.5.2 Norma Internacional para Captadores Solares Térmicos (ISO9806:2017) [13]

La Norma ISO9806:2017 (Solar Energy - Solar Thermal Collectors - Test Methods) define los procedimientos para probar los captadores solares de calentamiento de fluidos para el rendimiento térmico, la confiabilidad, la durabilidad y la seguridad en condiciones bien definidas y repetibles. Contiene métodos de prueba de rendimiento para realizar pruebas en exteriores con irradiación solar natural y viento natural y simulado, y para realizar pruebas en interiores con radiación solar y viento simulados.

Los captadores probados de acuerdo a la norma ISO9806:2017 [13] representan una amplia gama de aplicaciones, por ejemplo, captadores de placa plana y captadores de tubos de vacío para calentamiento de agua y de espacios domésticos, captadores para piscinas o para otros sistemas de baja temperatura o captadores de concentración

de seguimiento para aplicaciones de generación de energía térmica y procesos de calor industrial. Este documento es aplicable a los captadores que utilizan líquidos o aire como fluido de transferencia de calor. Del mismo modo, también se consideran los captadores que utilizan fuentes de energía externas para el funcionamiento normal y/o la seguridad (protección contra sobrecalentamiento, peligros ambientales, etc.), así como dispositivos híbridos que generan energía térmica y eléctrica.

**Alcance.** La norma ISO9806:2017 [13] especifica los métodos de prueba para evaluar la durabilidad, confiabilidad, seguridad y rendimiento térmico de los captadores solares de calentamiento de fluidos. Los métodos de prueba son aplicables para pruebas de laboratorio y para pruebas in situ; es aplicable a todos los tipos de captadores solares de calentamiento de fluidos, captadores solares de calentamiento de aire, captadores solares híbridos que generan energía eléctrica y eléctrica, así como a captadores solares que utilizan fuentes de alimentación externas para funcionamiento normal y/o para cuestiones de seguridad. No cubre aspectos de seguridad eléctrica ni otras propiedades específicas directamente relacionadas con la generación de energía eléctrica. La norma ISO9806:2017 [13] no es aplicable a aquellos dispositivos en los que una unidad de almacenamiento térmico es parte integral hasta el punto de que el proceso de recolección no puede separarse del almacenamiento. Se mencionara a continuación las pruebas enfocadas a captadores solares para calentamiento de agua.

### 1.5.2.1 Pruebas de Rendimiento Térmico

[13]

Las pruebas de rendimiento térmico de los captadores solares incluyen al menos la evaluación de la potencia térmica suministrada por el colector en diversas condiciones operativas (curva de rendimiento térmico), la medida de la dependencia del rendimiento térmico con el ángulo de incidencia de la irradiación sobre el colector y la determinación de la capacidad calorífica del colector. Estos tres conjuntos de parámetros son necesarios para el cálculo de la salida de calor del colector. También proporciona métodos para determinar parámetros importantes adicionales, como la caída a presión y la constante de tiempo.

Para todas estas pruebas el colector se monta de acuerdo con las especificaciones el fabricante. A continuación se describen las pruebas:

#### **Rendimiento térmico instantáneo** [13].

El objetivo de la prueba de rendimiento térmico instantáneo es determinar la cantidad de energía que nos puede entregar el captador en las diferentes condiciones de operación en que puede trabajar. Esto con la finalidad de poder diseñar sistemas solares para calentamiento de agua.

**Condiciones para la prueba.** Para esta prueba se tienen los siguientes requisitos: los rayos solares deben ser perpendiculares a la superficie



Crédito: Aschoff Solar1 · País: Tailandia · Sector: Industrial (cuero) · Tipo: Colector de tubos evacuados.

del colector con una desviación máxima del  $\pm 2\%$ , irradiancia total  $> 700 \text{ W/m}^2$ , la irradiancia difusa no debe de exceder en más del 30% a la irradiancia total, velocidad del viento paralela al eje del colector de  $3 \pm 1 \text{ m/s}$ . El flujo másico de agua, a menos que se indique lo contrario, es de  $0.02 \text{ kg/s}$  por  $\text{m}^2$  del área bruta del captador.

Para que un punto de prueba sea válida se debe de cumplir con las condiciones de pruebas y que el colector permanezca en condiciones de estado estable por al menos 15 minutos.

El rendimiento térmico instantáneo, para cada punto de prueba experimental se calcula con la siguiente ecuación:

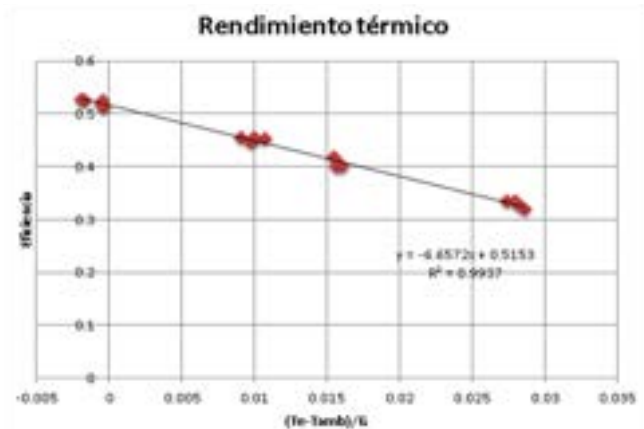
$$\eta = \frac{\dot{Q}}{G'' A_G} = \frac{\dot{m} C_f \Delta T}{G'' A_G} \quad (1.1)$$

Donde  $\dot{Q}$  es la potencia transferida al fluido de trabajo  $[\text{W}]$ ,  $G''$  la irradiancia neta  $[\text{W/m}^2]$ ,  $A_G$  el área bruta  $[\text{m}^2]$ ,  $\dot{m}$  el flujo másico del fluido  $[\text{kg/s}]$ ,  $C_f$  el calor específico del fluido a la temperatura media del fluido en su interior  $[\text{J/kg K}]$  y  $\Delta T$  la diferencia de temperaturas del fluido entre la salida y entrada del captador  $[\text{K}]$ .

Se deben obtener al menos 4 puntos para temperaturas del agua a la entrada del captador distribuidas de manera uniforme en el rango de operación especificado por el fabricante. De cada uno de estos 4 puntos se necesita sacar 4 puntos independientes.

Pudiéndose graficar los puntos obtenidos de esta manera (Figura 1.16)

Fig 1.16 Eficiencia térmica instantánea de un captador solar.

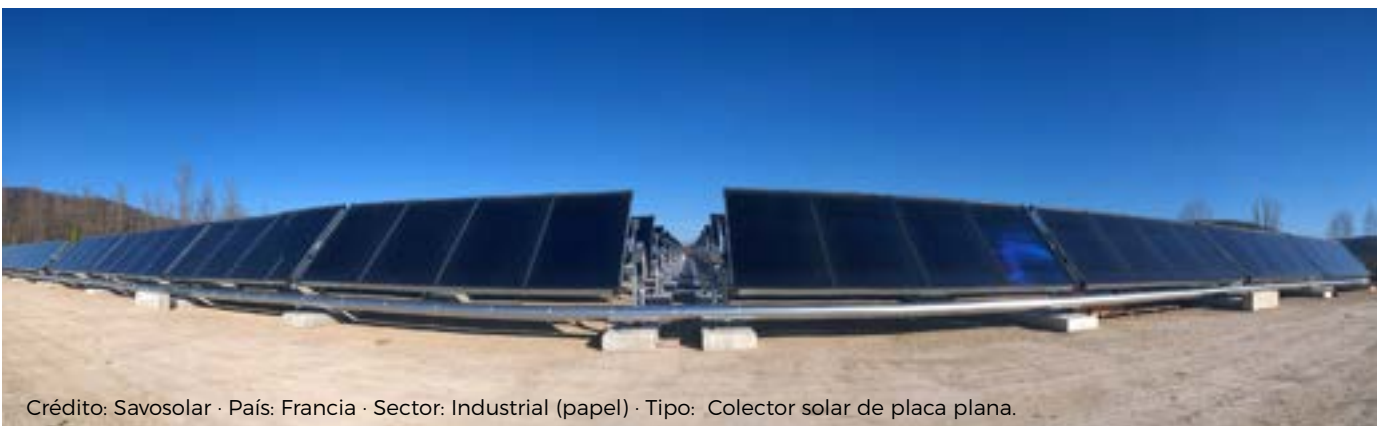


Para finalmente obtener a través de una regresión lineal, o bien de una ecuación de segundo orden dependiendo del comportamiento del captador, las siguientes curvas de rendimiento instantáneo del mismo:

$$\eta = \eta_0 - c_1 \frac{(T_{av} - T_a)}{G''} - c_2 \frac{(T_{av} - T_a)^2}{G''} \quad (1.2)$$

$$\eta = \eta_1 - b_1 \frac{(T_{av} - T_a)}{G''} \quad (1.3)$$

En algunas normativas nacionales como el caso de la mexicana, se utiliza la temperatura de fluido a la entrada del captador ( $T_{in}$ ), en lugar de la temperatura promedio del mismo en el captador ( $T_{av}$ ). También se pudiera tomar otra área como referencia para este cálculo como puede ser el área de apertura o bien el área del absorbedor.



Crédito: Savosolar · País: Francia · Sector: Industrial (papel) · Tipo: Colector solar de placa plana.

En el caso de captadores solares planos descubiertos (muy utilizados para alberca), se tienen que hacer pruebas para diferentes velocidades de viento y se obtiene una ecuación que es función también de la velocidad del viento.

### Determinación de la capacidad térmica efectiva (C) [13].

Es un parámetro que puede ser importante para evaluar la respuesta transitoria de un captador solar, donde al colector se le consideran sus propiedades como una mezcla de masas.

Hay métodos experimentales pero en general se calcula esta variable de forma teórica, como la suma de la capacidad térmica de cada uno de los componentes ( $m_i c_i$ ) ponderado por un factor ( $p_i$ , que va de 0.01 a 1):

$$C = \sum_i p_i m_i c_i \text{ [J/K]} \quad (1.4)$$

Donde  $m_i$  es la masa del componente [kg] y  $c_i$  su capacidad térmica [J/kg K].

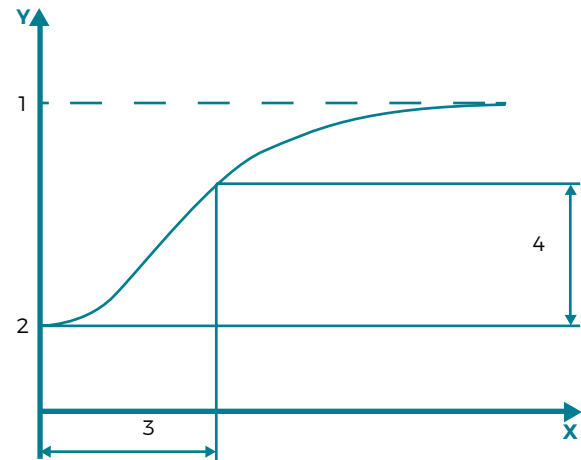
Componente	$p_i$
Absorbedor	1
Aislante	0.5
Fluido caloportador	1
Vidrio exterior	$0.01c_1$
Segundo vidrio exterior	$0.2c_1$

Donde  $c_1$  es el coeficiente encontrado en la curva de rendimiento térmico. Todos los elementos en contacto con el fluido de trabajo tienen  $p_i=1$ .

### Determinación de la constante de tiempo ( $\tau_c$ ) [13].

La constante de tiempo del colector solar se define como el tiempo requerido una vez que se destapa el colector para que el fluido a la salida del mismo alcance un 63.2% de valor de estado estable. La diferencia entre la temperatura del fluido a la salida del colector y la temperatura ambiente son graficados contra el tiempo (Figura 1.17).

Fig 1.17 Determinación de la constante de tiempo [13].



Donde X es el tiempo de la prueba, Y es temperatura a la salida del captador menos la temperatura ambiente ( $T_{out}-T_a$ ) para cada instante, 1 es el valor final en estado estacionario de ( $T_{out}-T_a$ ), 2 el valor inicial de ( $T_{out}-T_a$ ), 3 es la constante de tiempo ( $\tau_c$ ) a determinar y 4 es el valor establecido  $0.632 ((T_{out}-T_a)_{final} - (T_{out}-T_a)_{inicial})$ .

### Factor modificador del ángulo de incidencia [13]

Su objetivo es establecer el rendimiento del colector solar a diferentes ángulos de incidencia de la radiación solar directa. El factor modificador del ángulo de incidencia se define como la relación entre la eficiencia de un colector a un ángulo determinado entre la eficiencia máxima (con los rayos del sol perpendiculares al colector),

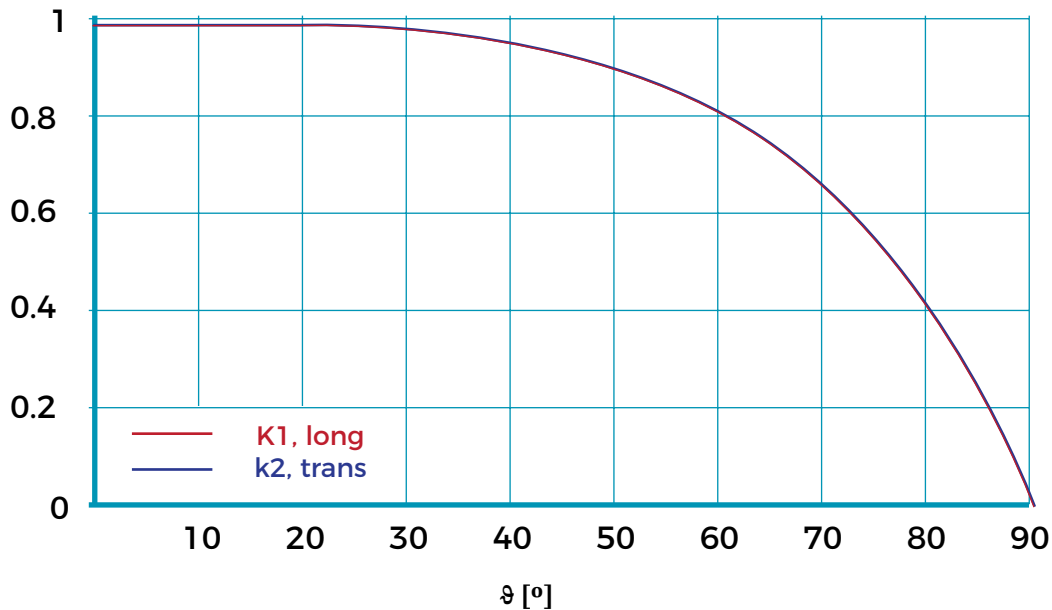
$$K(\theta) = \frac{\eta(\theta)}{\eta(0^\circ)} \quad (1.5)$$

Los valores de la eficiencia térmica del colector deben ser determinados para cada valor del ángulo incidente. Se recomienda de  $10^\circ$  en  $10^\circ$  hasta alcanzar al menos  $60^\circ$ . De los datos obtenidos se puede hacer una tabla como la Tabla 1.4 o en una Figura 1.18.

Tabla 1.4 Factor modificador del ángulo de incidencia

$\theta$	0	10	20	30	40	50	60	70
$K(\theta)$	1.0	$K(10)$	$K(20)$	$K(30)$	$K(40)$	$K(50)$	$K(60)$	$K(70)$

Fig 1.18 Factor modificador del ángulo de incidencia



Dependiendo del tipo de colector se puede representar los valores obtenidos mediante alguna función como pueden ser:

$$K(\theta) = 1 - B_0 \left( \frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) \quad (1.6)$$

$$K(\theta) = 1 - \tan^{B_0} \left( \frac{\theta}{2} \right) \quad (1.7)$$

Donde se debe determinar la constante  $B_0$  con los datos obtenidos experimentalmente.

El factor modificador del ángulo de incidencia afecta el primer término de la ecuación de rendimiento térmico que se obtiene con rayos incidentes perpendiculares al plano de la siguiente forma,

$$\eta = \eta_0 K(\theta) - c_1 \frac{(T_{av} - T_a)}{G''} - c_2 \frac{(T_{av} - T_a)^2}{G''} \quad (1.8)$$

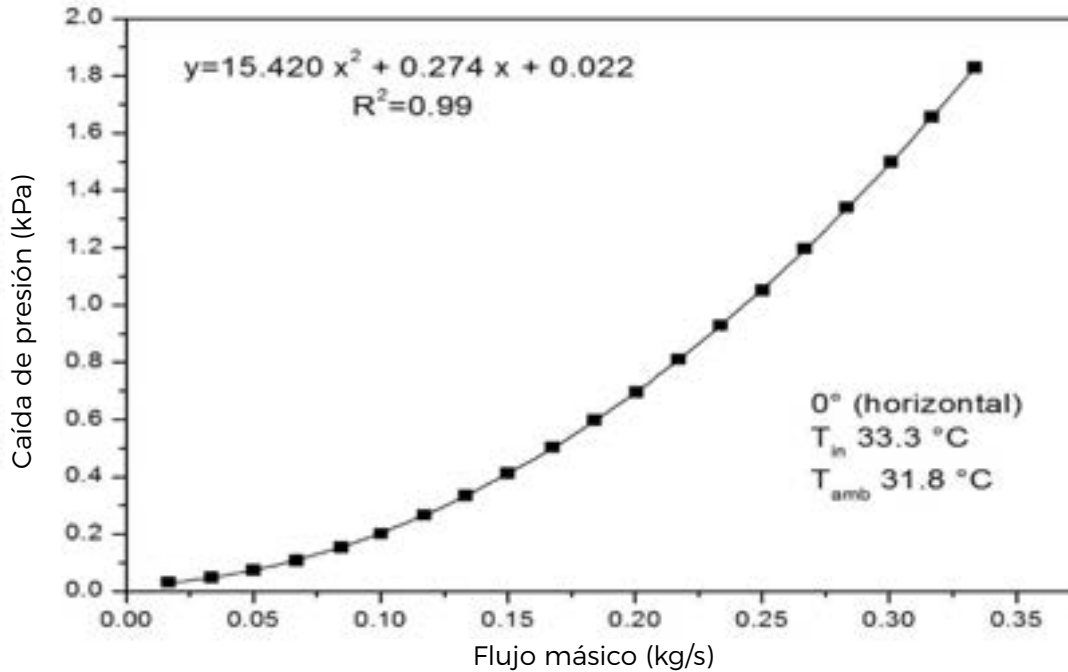
### Caída de presión a través del captador [13].

La caída de presión en un colector es un parámetro importante para los diseñadores de los sistemas hidráulicos de sistemas de calentamiento solar de agua. La temperatura de prueba estándar del fluido debe ser  $(20 \pm 2)^\circ \text{C}$ .

La caída de presión se determinará para diferentes caudales, que abarcan el rango que probablemente se utilizará en la operación real. Se realizarán al menos cinco mediciones a valores igualmente espaciados en el rango del caudal marcado por el fabricante. En cada punto de operación, la presión alcanzará condiciones de estado estable durante al menos 5 min.

Los resultados se pueden presentar con una gráfica (Figura 1.19),

Fig 1.19 Caída de presión a través del captador solar.



Y en la mayoría de los captadores, esta curva puede ser representada por un polinomio de segundo grado a través de una regresión de mínimos cuadrados, quedando de la siguiente manera,

$$\Delta p = a\dot{V} + b\dot{V}^2 \quad (1.9)$$

Donde  $\dot{V}$  es el flujo volumétrico en *litros/h* o su equivalente en *kg/h*.

### 1.5.2.2 Pruebas de Integridad [13].

Las pruebas de integridad son importantes para asegurar al usuario final que los captadores que compra no van a sufrir daños que disminuyan su efectividad, o bien que puedan quedar inservibles debido a situaciones que se pueden presentar en sus condiciones de operación durante la vida útil del equipo.

#### Prueba de presión interna [13].

El objetivo de esta prueba es evaluar la capacidad de un colector para soportar la presión máxima en los canales de fluido según lo especificado por el fabricante.

Los canales de fluido se someterán a prueba de presión a temperatura ambiente, protegidos de la luz solar. La presión de prueba debe permanecer estable dentro de  $\pm 5\%$  de 1.5 veces la presión absoluta máxima de operación del colector especificada por el fabricante. La presión de prueba se mantendrá durante al menos 15 min.

#### Temperatura de estancamiento [13].

Tiene como objetivo reportar la temperatura máxima que el captador puede alcanzar con el fin de saber si los materiales que se utilizan en el mismo no sufren defectos a estas condiciones.

Dado que probarlo experimentalmente implica meter un sensor de temperatura dentro del mismo, lo que puede afectar su funcionamiento, lo común es que se determine este parámetro a través de la curva de rendimiento obtenida para el captador, con la siguiente ecuación:

$$T_{stg} = 1.2 \left( T_a + \frac{c_1 + \sqrt{c_1^2 + 4\eta_0 c_2 G''}}{2c_2} \right) \quad (1.10)$$

Considerando  $G'' = 1000 \text{ W/m}^2$  y  $T_a = 30^\circ\text{C}$  y obteniendo los coeficientes  $\eta_0, c_1, c_2$  de la ecuación de segundo orden de rendimiento del captador solar.

### Prueba de exposición a la radiación [13].

La prueba de exposición proporciona (o simula) las condiciones de operación que son probables que ocurran durante el servicio real o durante la instalación del sistema cuando el sistema está sin agua. Para lo anterior el fabricante debe seleccionar alguna de las clases de clima que se muestran en la tabla 1.5.

Las horas deben ser medidas en intervalos de 30 minutos para poderlas acumular.

### Choque térmico externo [13].

Los captadores pueden, de vez en cuando, estar expuestos a tormentas de lluvia repentinas en días calurosos y soleados, causando un severo choque térmico externo. El objetivo de esta prueba es evaluar la capacidad de un colector para soportar tales choques térmicos sin fallas.

Se considera que los captadores que usan vidrio templado cumplen con este requisito y no se requieren pruebas.

El captador debe estar expuesto a las condiciones climáticas seleccionadas en la tabla 1.5 durante un período de 1 h antes de rociarlo con agua durante al menos 5 min. La pulverización de agua (rocío) debe tener una temperatura siempre entre  $10^\circ\text{C}$  y  $25^\circ\text{C}$  y proporcionar flujo másico de pulverización de más de  $0.03 \text{ kg/s}$  por metro cuadrado de área bruta del colector. La prueba se realiza 2 veces.

### Choque térmico interno [13].

Los captadores pueden, de vez en cuando, exponerse a una repentina entrada de fluido frío en días calurosos y soleados, causando un choque térmico interno, por ejemplo, después de un período de apagado, cuando la instalación vuelve a funcionar mientras el captador está a su temperatura de estancamiento, cuando se queda sin agua el lugar, o durante la instalación del sistema. El objetivo de esta prueba es evaluar la capacidad de un colector para soportar tales choques térmicos sin fallas.

El captador debe estar expuesto a las condiciones climáticas seleccionadas en la tabla 1.5 durante un período de 1 h antes de inyectarles agua fría en sus canales interiores durante al menos 5 min. El agua debe tener una temperatura  $< 25^\circ\text{C}$  y flujo másico del agua a inyectarse debe mínimo

Tabla 1.5 Valores utilizados por clima seleccionado para la prueba

Condiciones climáticas	Valores para el tipo de clima seleccionado		
	Clase B (soleado)	Clase A (muy soleado)	Clase A+ (extremadamente soleado)
Irradiancia total sobre el plano del colector por al menos 32 h (valor acumulado de varios días de prueba) y temperatura ambiente mínima	900 W/m <sup>2</sup> 15°C	1000 W/m <sup>2</sup> 20°C	1100 W/m <sup>2</sup> 40°C
Irradiación en el plano del colector por un mínimo de 30 días	540 MJ/m <sup>2</sup>	600 MJ/m <sup>2</sup>	700 MJ/m <sup>2</sup>



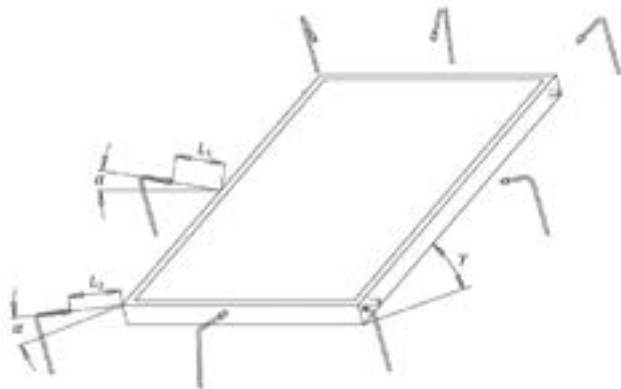
0.02 kg/s por metro cuadrado de área bruta del colector. La prueba se realiza 2 veces.

### Penetración de agua de lluvia [13].

El objetivo de esta prueba es evaluar la capacidad de un captador para resistir la lluvia que cae libremente, o la lluvia torrencial sin daños visibles en el captador solar y sin la entrada de agua de tal manera que pueda haber una reducción significativa del rendimiento o la vida útil del mismo.

Durante toda la prueba, el captador debe estar protegido de la luz solar ( $G'' < 200 \text{ W/m}^2$ ) y debe mantenerse caliente haciendo circular un fluido a  $55^\circ\text{C} (\pm 5\text{K})$  a través del mismo. Todos los captadores se estabilizarán en estas condiciones durante al menos 1 h. Luego se rocía el captador durante 4 h. Colocando las boquillas de pulverización de acuerdo a la Figura 1.20.

**Fig 1.20 Posición de las boquillas de pulverización para la prueba de penetración de agua de lluvia [13]**



$L_1, L_2$  250mm

Las boquillas de pulverización requeridas son:

- pulverización de cono completo;
- flujo másico de  $2 \text{ kg/min} (\pm 0.5 \text{ kg/min})$  por boquilla;
- ángulo de pulverización de  $60^\circ \pm 5^\circ$ ;

- tamaño de gota  $> 150 \mu\text{m}$ , según información técnica del fabricante de la boquilla;
- la presión del agua en cada boquilla se mantendrá a  $300 \text{ kPa} (\pm 50 \text{ kPa})$ .

Si corresponde, la colocación de las boquillas pulverizadoras deberá ser:

- al menos cada esquina y cada lado de la carcasa se rocía directamente como se muestra en la figura;
- la distancia máxima entre dos boquillas de pulverización es de 150 cm.

La penetración de agua en el colector se determinará mediante inspección final, dentro de las 72 h posteriores a la pulverización o si se encuentra humedades mayores a 25 ml en alguna parte del colector. El método para medir la humedad que ha penetrado en el captador consiste en pesar el captador antes y después de la prueba para ver el incremento de peso que pudo tener, que es directamente proporcional al agua que penetró.

### Resistencia al congelamiento

No aplica para Panamá, dada que las temperaturas registradas han estado siempre por encima del punto de congelamiento del agua.

### Carga mecánica (presión positiva y presión negativa) [13].

Las pruebas de carga mecánica están destinadas a evaluar en qué medida el captador y sus puntos de fijación pueden resistir la carga de presión positiva debido al viento o la nieve y la presión negativa o las fuerzas de elevación causadas por el viento (huracanes). La base de montaje no se evalúa.

Se pueden usar diferentes metodologías para aplicar cargas positivas y negativas distribuidas uniformemente al captador, como ejemplo:

**Lámina y grava, arena o agua:** el captador se coloca horizontalmente cubierto por una lámina flexible y un marco circundante lo suficientemente alto como para contener la cantidad requerida de grava, arena o agua que se coloca sobre el

captador. La grava, la arena o el agua se distribuirán de manera uniforme en el marco.

**Ventosas:** las ventosas accionadas mecánicamente se distribuyen uniformemente en la superficie del colector.

**Presión de aire:** el captador se instala en una plataforma de prueba donde se puede aplicar una presión de aire positiva o negativa desde el lado frontal o posterior, por ejemplo, mediante el uso de cojines de aire u otros métodos.

Dependiendo del tipo de captador, otros métodos también pueden ser más apropiados, siempre que proporcionen una distribución de presión homogénea en toda el área bruta del colector. El método de prueba se describirá en el informe de prueba.

Las presiones se incrementarán en pasos de un máximo de 500 Pa. El área de referencia a utilizar es el área bruta del captador. Cada carga se mantendrá durante un mínimo de 5 min.

### **Resistencia al impacto [13].**

El objetivo de esta prueba es evaluar en qué medida un captador puede soportar los efectos de los impactos causados por el granizo o por una pedrada (vandalismo). Esta prueba afecta a sistemas que no tienen vidrios templados y que tienen espesores pequeños en el vidrio. En caso de romperse la cubierta o tubo evacuado el equipo queda prácticamente inservible hasta que se pueda sustituir la misma.

### **Método de impacto con bola de acero (balín) [13]**

El captador se montará en un soporte. El soporte deberá ser lo suficientemente rígido para que haya una distorsión o desviación insignificante en el momento del impacto.

La bola de acero tendrá una masa de  $150 \text{ g} \pm 10$  g y se considerarán las siguientes alturas de caída: 0.4 m, 0.6 m, 0.8 m, 1.0 m, 1.2 m, 1.4 m, 1.6 m, 1.8 m y 2.0 m. Se realizan 4 impactos desde cada altura.

Para captadores de placa plana: los puntos de impacto se ubicarán dentro de un radio de 75 mm desde la esquina del vidrio. Para cada serie de impactos se elegirá una esquina diferente.

Para captadores de tubos evacuados: para cada impacto, se probarán cuatro tubos del captador elegidos al azar. Se probarán dos tubos en el extremo superior y dos tubos en el extremo inferior. Los puntos de impacto deben ubicarse a un máximo de 75 mm desde el extremo superior y desde el extremo inferior e impactar el tubo en el centro donde la superficie del tubo es normal al impacto. La dirección del disparo será normal al eje del tubo.

Una muestra de la prueba de impacto con bola de acero, donde el captador sufre daños se observa en la Fig 1.21.

**Fig. 1.21. Prueba de impacto con bola de acero.**



## Impacto con bolas de hielo [13]

Se deben fabricar las bolas de hielo con agua sin aditivos y que queden libres de burbujas, la bola de hielo debe estar a una temperatura de  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . El número de impactos y su localización son iguales a los del método de la bola de acero. La tabla 1.6 muestra las condiciones de las bolas de hielo para cada prueba. La velocidad de impacto se obtiene al considerar el objeto en caída libre.

Fig. 1.21. Prueba de impacto con bola de acero.

Diámetro nominal (mm)	Masa (g $\pm$ 5%)	Velocidad de impacto (m/s $\pm$ 5%)
15	1.63	17.8
25	7.53	23.0
35	20.7	27.2
45	43.9	30.7

### Inspección final

La inspección final está destinada a registrar la estructura y los materiales del captador y evaluar la condición del captador después de completar la prueba. La información proporcionada se verificará con la información del fabricante.

El captador deberá desmontarse e inspeccionarse por completo en condiciones de laboratorio, es decir, en un estado no operativo, protegido de la luz y a temperatura ambiente. La inspección final se considerará como un método de prueba destructivo y, por lo tanto, será la prueba final.

### Criterios de valoración para la inspección final

Todos los hallazgos clasificados como problemas menores o fallas mayores deberán documentarse mediante fotografías.

Los defectos y las anomalías deben documentarse y clasificarse cuando corresponda de acuerdo con la siguiente clave.

## 0 No hay problema

El rendimiento, la durabilidad, la seguridad y la apariencia visual se consideran no afectados por las pruebas anteriores y se mantienen estables durante la vida útil esperada. No hay decoloración de acristalamiento desgasificante visible.

## 1 Problema menor

Principalmente aspectos de apariencia visual, defectos estéticos. Se considera que la durabilidad y la seguridad permanecen estables durante la vida útil esperada. Leve decoloración de acristalamiento desgasificante visible. Las deficiencias que pueden progresar se clasificarán como problemas mayores.

## 2 Falla mayor

Se encuentra o se espera una falla prematura severa relacionada con el rendimiento, la durabilidad, la seguridad o la apariencia visual. Decoloración de acristalamiento de desgasificación significativa visible.

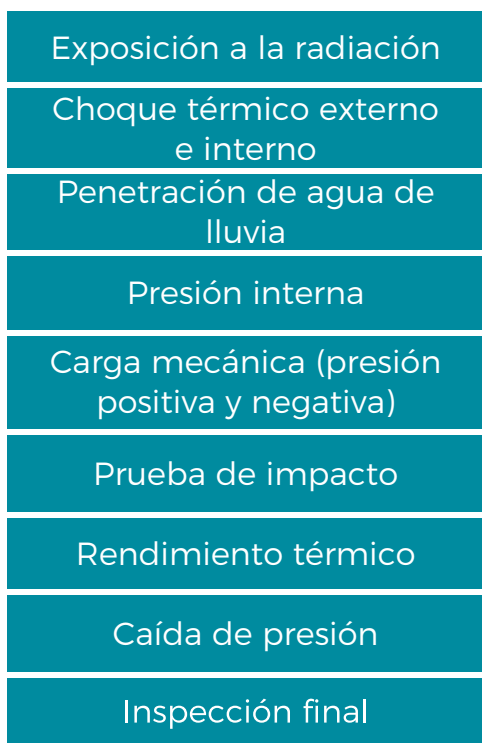
Una calificación de "falla mayor" es obligatoria (si corresponde) en caso de (pero no limitado a):

- rotura o deformación permanente de la cubierta o la fijación de la cubierta;
- fuga del líquido;
- cualquier deformación tal que se establezca un contacto permanente entre el absorbedor y la cubierta;
- rotura o deformación severa de los puntos de fijación del colector o de la caja del colector; pérdida de vacío;
- disolución de la superficie selectiva;
- acumulación de humedad en forma de condensado permanente en el interior de la cubierta transparente o retención local permanente de agua.

## Orden de secuencia de las pruebas

En la tabla 1.7 se propone una secuencia de prueba completa para los captadores solares térmicos, incluida la prueba de durabilidad y las mediciones del rendimiento térmico. Para todas las secuencias de prueba y pruebas individuales, se recomienda la inspección final, que se realiza de manera visual. No se puede establecer un tiempo estimado para la realización de las pruebas ya que dependen de las condiciones ambientales que se presenten.

**Fig. 1.21. Prueba de impacto con bola de acero.**



### 1.5.3 Normas Internacionales para Sistemas termosifónicos (UNE 12976) [14]

Esta norma europea define los métodos de prueba para validar la durabilidad, rendimiento y seguridad sistemas solares de agua prefabricados (normalmente termosifónicos o autocontenidos) e incluye también un método para evaluar el rendimiento térmico del sistema como caja negra.

Para todos los casos el sistema debe ser instalado de acuerdo al manual proporcionado por el fabricante.

## Resistencia al congelamiento

No aplica para Panamá, dada que las temperaturas registradas han estado siempre por encima del punto de congelamiento del agua.

### Protección contra sobrecalentamiento [14]

Su objetivo es asegurar que el sistema de calentamiento solar de agua (SCSA) está protegido contra daños causados en periodos de no extracción de agua caliente. En caso de que los sistemas no estén bien diseñados, o bien, no cuenten con válvulas de seguridad, el sobrecalentamiento causa una expansión del agua y a veces su evaporación, lo que produce un aumento importante de presión que puede dañar gravemente el equipo e incluso llegar a reventarlo.

El sistema debe operar como mínimo durante 4 días consecutivos sin extracción de agua y hasta que este sujeto al menos en 2 días consecutivos en los que la irradiación solar sobre el plano del colector sea mayor a 20 MJ/m<sup>2</sup> y una temperatura ambiente mayor de 20 °C durante el mediodía solar.

El sistema debe resistir sin sufrir daños están condiciones o bien se deben de activar los sistemas de seguridad que tenga como es el caso de válvulas de alivio de presión y temperatura que pudieran tener.

### Resistencia a la presión [14]

Su objetivo es evaluar con un valor determinado de presión hidráulica de trabajo indicada por el fabricante, todos los componentes y conexiones del SCSA.

El sistema debe soportar por un periodo de 15 minutos una presión hidráulica igual a 1.5 veces la presión máxima de trabajo marcada por el fabricante.

Un daño de un sistema por presión significa que alguno de sus elementos se reventó con lo que queda inservible el equipo.

## Caracterización térmica [14]

La prueba de caracterización térmica se realiza de acuerdo al protocolo de la ISO 9459-2 [15], que es una norma para equipos solares prefabricados (sistemas termosifónicos). El objetivo final de la caracterización térmica es poder determinar la cantidad de energía que nos puede entregar el sistema en las diferentes condiciones de operación en que puede trabajar. Esto con la finalidad de diseñar sistemas solares para calentamiento de agua.

La ISO 9459-2 [15] es aplicable a los sistemas únicamente solares y los sistemas de precalentamiento solar. La prueba de rendimiento para sistemas solares es un procedimiento de "caja negra" que produce resultados de "entrada-salida" para un sistema. Los resultados de la prueba se pueden usar directamente con los valores medios diarios de irradiación solar local, temperatura del aire ambiente y datos de temperatura del agua fría para predecir el rendimiento anual del sistema.

Esta prueba involucra el sistema completo (al menos seis pruebas de un día), junto con una breve prueba para determinar el grado de mezcla en el tanque de almacenamiento durante la extracción, y una prueba de pérdida de calor durante la noche para determinar el coeficiente de pérdida de calor del tanque de almacenamiento.

El procedimiento de prueba consiste en una serie de pruebas de un día, con diferentes condiciones de operación del sistema. En cada día de prueba, el sistema se prueba al exterior y se aplica una extracción única de agua al final del día. Al principio de cada día de la prueba, el sistema se precondiciona con agua a una temperatura conocida para sacar otro punto de la ecuación o gráfica de la energía entregada por el sistema que se pretende obtener. Los datos de entrada (es decir, la incidencia de irradiación en el sistema) y la salida (es decir, la energía contenida en la extracción de agua caliente), se miden para cada día de prueba y se trazan en un diagrama de entrada / salida. Los días de prueba deberán cubrir un rango de valores de irradiación y valores

de la temperatura ambiente promedio del día y la temperatura inicial del agua en el sistema ( $T_{a,day} - T_{main}$ ) para que la dependencia del rendimiento del sistema con estos parámetros pueda ser establecido.

## Condiciones de prueba [14]

Los resultados se obtendrán durante al menos cuatro días diferentes con aproximadamente los mismos valores de ( $T_{a,day} - T_{main}$ ) y con valores de irradiación distribuidos uniformemente en el rango de 8 MJ/m<sup>2</sup> a 25 MJ/m<sup>2</sup>. Los resultados también se obtendrán por al menos dos días adicionales con valores de ( $T_{a,day} - T_{main}$ ) al menos 9 K por encima o por debajo de los valores de ( $T_{a,day} - T_{main}$ ) obtenidos durante los primeros cuatro días. El valor de ( $T_{a,day} - T_{main}$ ) estará en el rango - 5 K + 20 K por cada día de prueba.

## Preacondicionamiento del sistema [14]

El objetivo del preacondicionamiento es poder hacer la prueba del sistema bajo unas condiciones estables iniciales fijadas por el que realiza la prueba.

Al comienzo de cada día de prueba, antes del inicio de la prueba, cubra al captador del sol directo y acondicione la prueba haciendo circular agua a una temperatura  $T_{main}$  a través del sistema a un caudal de al menos 600 l / h (0.1666 l / s) hasta que todo el sistema se lleva a una temperatura uniforme. Una vez alcanzado el punto se destapa el sistema. Para cada día se determina la temperatura inicial de la prueba ( $T_{main}$ ).

Se requiere para la prueba tener una velocidad de viento entre 3 y 5 m/s promedio en el plano del captador a 50 mm de la cubierta (se utilizan ventiladores para este fin).

Durante la prueba se mide durante un periodo de 12 horas continuas (iniciando 6 horas antes y finalizando 6 horas después del mediodía solar) la irradiación global, la irradiancia difusa, la temperatura ambiente y la velocidad el viento sobre el captador.

## Determinación de la prueba de rendimiento diario [14]

Se permitirá que el sistema funcione durante 12 h, desde 6 h antes del mediodía solar hasta 6 h después del mediodía solar. A las 6 h después del mediodía solar, el captador se cubre y se extrae agua a un caudal constante de 600 l/h  $\pm$  50 l/h. El agua fría de reposición deberá estar a la temperatura  $T_{main}$  definida durante el preacondicionamiento del sistema.

La temperatura del agua que se extrae ( $T_d$ ) se medirá al menos cada 15 s y se registrará un valor promedio al menos cada vez que se extrae una décima parte del volumen del tanque. Las temperaturas se utilizarán para construir un perfil de temperatura de extracción como se muestra en la figura 1.22.

Se extraerá un volumen de agua igual a tres veces el volumen del tanque. Si la temperatura entre el agua extraída y el agua fría que ingresa es mayor a 1 K después de tres volúmenes de tanque, la extracción se continuará hasta que la temperatura sea inferior a 1 K.

## Ecuación de rendimiento diario [14]

La ecuación de rendimiento diario tiene como objetivo, determinar, para cualquier condición de operación del sistema, la cantidad de energía que este nos entregaría al final del día solar.

Integrando el perfil de extracciones se puede obtener la energía almacenada en el agua durante el día de pruebas. Con varios días de pruebas se puede obtener una ecuación de la forma:

$$Q = a_1 H + a_2 (T_{a,day} - T_{main}) + a_3 \quad (1.11)$$

Donde  $H$  es la irradiación solar en MJ/m<sup>2</sup> día y los coeficientes  $a_1$  [m<sup>2</sup>],  $a_2$  [MJ/K día] y  $a_3$  [MJ/día] se determinan con un método de mínimos cuadrados.

Los resultados también se pueden mostrar en una gráfica (Figura 1.23). Donde cada línea de la 1 a la 4 representa diferencias entre ( $T_{a,day} - T_{main}$ ) de 20 K, 10 K, 0 K y - 10 K respectivamente.

Fig 1.22 Perfil de extracción [14].

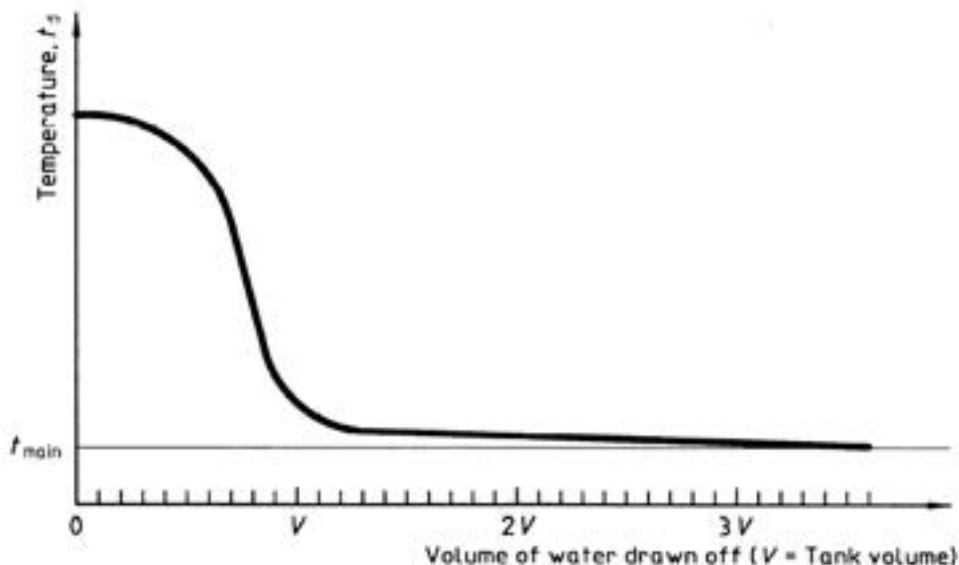
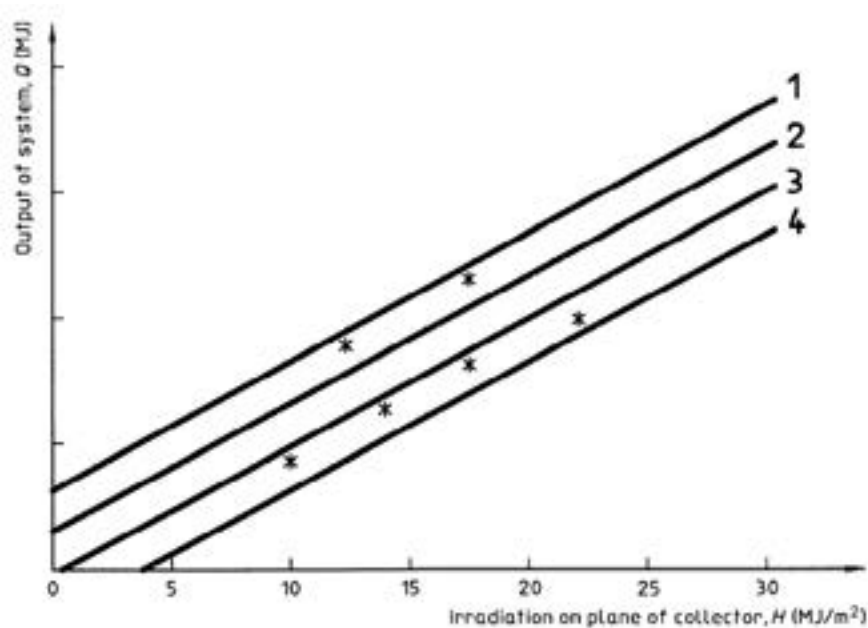


Fig 1.23 Gráfica de energía vs. irradiación solar para el sistema [14].



### Determinación de las pérdidas térmicas en el tanque [14]

El objetivo de esta prueba es determinar la cantidad de energía que pierde el sistema durante la noche bajo las diferentes condiciones de operación que se pueden presentar.

El sistema debe ser acondicionado para tener agua a una temperatura uniforme de 60°C. Durante el periodo de enfriamiento se debe circular aire a una velocidad entre 3 y 5 m/s promedio sobre el sistema. Al final de la prueba se recircula el agua hasta alcanzar una temperatura uniforme. Se puede realizar una segunda prueba al tanque únicamente con el captador desconectado.

### Cálculo del coeficiente de pérdidas en el tanque ( $U_s$ ) [14]

Este coeficiente se determina con la siguiente correlación:

$$U_s = \frac{(\rho_w c_{pw} V_s)}{\Delta t} \ln \left[ \frac{T_i - T_{a,s}}{T_f - T_{a,s}} \right] \text{ [W/K]} \quad (1.12)$$

$\Delta t$  es la duración de la prueba en segundos,  $V_s$  es el volumen del tanque,  $T_i$ ,  $T_f$  y  $T_{a,s}$  son las temperaturas de inicio y final de la prueba, así como la temperatura ambiente promedio alrededor del sistema.

Finalmente, con la ecuación de la energía diurna obtenida en función de la irradiancia, temperatura ambiente diurna y la temperatura inicial del sistema, en conjunto con la ecuación del coeficiente de pérdidas en el tanque, se puede hacer una evaluación del rendimiento anual de este sistema para un lugar en particular y una cantidad de agua caliente requerida diaria, que es el objetivo final de este procedimiento.

### 1.5.4 Normas de Requerimientos Mínimos para la Instalación de Sistemas Solares Térmicos, para Calentamiento de Agua (basada en la NMX-ES-003-NORMEX-2008) [16]

La aplicación de esta se extiende a todos los sistemas mecánicos, hidráulicos, eléctricos, electrónicos y demás que forman parte de las instalaciones de sistemas termo-solares de más de 500 litros.

Su objetivo es fijar las condiciones técnicas mínimas que deben cumplir las instalaciones de sistemas para calentamiento solar de líquidos, especificando los requisitos de durabilidad, confiabilidad y seguridad.

En esta norma se especifica o dan recomendaciones para: a) orientación, inclinación de captadores solares y distancia entre filas para que no se sombreen; b) tipo y fijación del colector al techo, así como de las tuberías del mismo; c) cálculos hidráulicos (diámetros de tubería, dimensionamiento de la bomba), arreglos modulares y tanques de almacenamiento; d) aislamiento de tuberías; e) válvulas (vacío, eliminadoras de aire, de drenado, de alivio, check, etc.) y accesorios; f) protección anticongelamiento (no aplica en Panamá); g) controles automáticos (diferenciales de arranque y paro del sistema) y medidores (de flujo y temperatura); h) manual de instalación, mantenimiento y operación; y (i) garantía de captadores e instalación.



Crédito: Savosolar · País: Francia · Sector: Industrial (papel) · Tipo: Colector solar de placa plana.

## CONCLUSIONES

En este capítulo se explicó los efectos del cambio climático, así como los gases de efecto invernadero que más afectan al mismo. De igual forma se plantean algunas de las estrategias y políticas energéticas más importantes para revertir el cambio climático e implementar tecnologías basadas en energías renovables en sustitución del uso de los combustibles fósiles.

Se detalla el uso y aplicación de los calentadores solares de agua, detallando las tecnologías actuales existentes y el número de equipos instalados por cada tecnología a nivel mundial, así, como el aporte en términos de energía térmica que estos sistemas dan a escala mundial. Se mencionan otras tecnologías como son los captadores para calentamiento de aire, y los sistemas de concentración solar que se pueden utilizar en otras aplicaciones.

Se resume del desarrollo y evolución de la energía solar térmica en Panamá a través del programa Termosolar Panamá, los componentes principales del mismo y sus objetivos a alcanzar.

Detalla la importancia de contar con aspectos regulatorios y técnicos para los sistemas de calentamiento de agua para brindar al usuario final la seguridad de que los equipos que está adquiriendo cumplen con las normas mínimas de rendimiento y calidad necesarias para su buen funcionamiento y una vida útil de al menos 10 años. Se menciona la norma de definiciones y terminología que permite uniformar el lenguaje usado en el ámbito de la energía solar. Explica brevemente los objetivos e importancia de las pruebas de rendimiento e integridad que se realizan de acuerdo a protocolos establecidos por normas ISO a captadores solares para calentamiento de agua y a sistemas de calentamiento solar de agua (sistemas termosifónicos). Finalmente, se menciona una norma de requerimientos mínimos que se deben cumplir para la instalación de sistemas solares térmicos con el objetivo de tener sistemas instalados confiables, durables y seguros.



## CUESTIONARIO CAPÍTULO 1

### 1. ¿Cuáles son los principales causantes del cambio climático?

- a) El uso de energías renovables.
- b) El uso de combustibles fósiles y emisiones de gases de efecto invernadero.
- c) Los incendios y erupciones volcánicas.
- d) Las tormentas y huracanes.

### 2. ¿Cuál es el principal gas implicado en el efecto invernadero?

- a) Vapor de agua.
- b) Óxido nitroso.
- c) Metano.
- d) Dióxido de carbono.

### 3. Mencione una estrategia para mitigar de forma importante el cambio climático

- a) Utilización de fuentes de energías renovables.
- b) Utilización de plantas de energía de carbón.
- c) Crear mayor industria de bienes de consumo.
- d) Incrementar el uso de vehículos de combustión interna.

### 4. ¿Cuál es la tecnología o tecnologías más usadas para el calentamiento solar de agua?

- a) Sistemas solares autocontenidos.
- b) Captadores solares planos y tubos evacuados.
- c) Concentradores de canal parabólico.
- d) Captador cilíndrico parabólico.

### 5. ¿En qué lugar de acuerdo a su capacidad instalada a nivel mundial se encuentra la energía solar térmica, respecto a otras fuentes de energía renovable, según la agencia internacional de energía?

- a) Primer lugar.
- b) Segundo lugar.
- c) Tercer lugar.
- d) Cuarto lugar.

### 6. ¿Por qué son importantes los aspectos regulatorios para los sistemas de calentamiento solar de agua?

- a) Como barrera para la introducción de productos extranjeros.
- b) Para reducir el costo final de los sistemas.
- c) Para regular la competencia leal entre empresas del ramo.
- d) Para dar certidumbre al usuario final sobre la calidad y eficiencia de los sistemas.

### 7. ¿La mayoría de las normas sobre sistemas de calentamiento solar de agua, en qué normas se sustentan?

- a) En las normas europeas.
- b) En las normas ISO.
- c) En las normas elaboradas en cada país.
- d) En las normas estadounidenses.

### 8. ¿Para qué se realizan pruebas de rendimiento térmico a los SCSA?

- a) Para conocer la energía suministrada por el sistema solar bajo diferentes condiciones de operación.
- b) Para evaluar la durabilidad del sistema solar.
- c) Para evaluar la seguridad del sistema solar.
- d) Para evaluar la confiabilidad del sistema solar.

### 9. ¿Para qué son importantes las pruebas de integridad en SCSA?

- a) Para intercomparar sistemas.
- b) Para asegurar que los sistemas que no van a sufrir daños que disminuyan su efectividad, o fallen en condiciones de operación que se pueden presentar en su vida.
- c) Para conocer la energía suministrada por el sistema solar bajo diferentes condiciones de operación.
- d) Para evaluar la durabilidad del sistema solar.

### 10. ¿Qué prueba de integridad se utiliza para asegurar que un sistema solar no falle al estar expuesto a tormentas de lluvia repentinas en días calurosos y soleados?

- a) Presión positiva.
- b) Choque térmico externo.
- c) Choque térmico interno.
- d) Penetración de agua de lluvia.

## CAPÍTULO 2

# IDENTIFICACIÓN Y CÁLCULO DE RECURSO SOLAR, POTENCIAL ENERGÉTICO Y SOMBRAS



## INTRODUCCIÓN

La radiación solar es la energía electromagnética (inducida por un campo magnético) que se recibe del Sol en forma natural y que ha permitido la existencia de la vida en la Tierra. Parte de esta energía es la responsable del clima en la Tierra y otra parte origina la mayoría de los procesos biológicos conocidos. Es tan abundante esta energía que puede aprovecharse para satisfacer las necesidades energéticas de la humanidad.

El recurso solar se entiende como la energía que en forma de radiación térmica (que es la energía que emite un cuerpo debido a su temperatura) procedente del Sol llega a la superficie terrestre y puede ser utilizada para algún proceso energético. A diferencia de otras energías renovables, la energía solar es en principio predecible ya que su disponibilidad primaria es función de un buen conocido sistema astronómico Sol-Tierra, cuyos aspectos generales se describirán más adelante. Además del aspecto astronómico, la

radiación solar disponible para una determinada región depende del comportamiento de la radiación electromagnética al incidir y penetrar la atmósfera terrestre; varios fenómenos se presentan a lo largo de la trayectoria de los rayos solares antes de llegar a la superficie de la Tierra. Conjuntamente la presencia de humedad (vapor de agua), aerosoles (humo, polvo, smog) y nubes son factores que determinan la transparencia atmosférica y por consecuencia la cantidad de energía solar disponible.

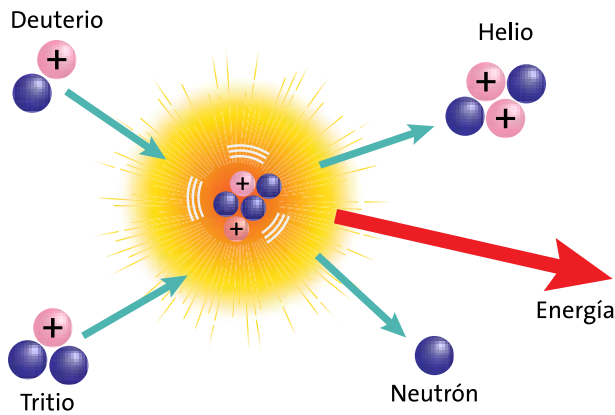
Existen varias formas de estimar la cantidad de radiación solar que se recibe en alguna región; las dos formas más comunes son: la medición in situ y la estimación mediante imágenes de satélite. Los instrumentos de medición de radiación solar han sido normalizados a nivel internacional, por lo que hay mucha concordancia entre los datos de diferentes estaciones del mundo. Por otra parte, la estimación vía satélite también ha sido mejorada en los últimos años, por lo que sus estimaciones se van aproximando progresivamente a las

mediciones en tierra. Esto ha permitido no sólo que se vayan formando bases de datos de regiones cada vez más amplias sino también que estas bases estén disponibles a mayor número de usuarios, tanto en el ámbito de la investigación como en el del desarrollo de aplicaciones solares.

## 2.1 EL SOL [17]

El Sol es una estrella que genera energía bajo un proceso nuclear de fusión, por medio del cual se convierte hidrógeno en helio, como se observa en la figura 2.1.

**Figura 2.1 Reacción de fusión nuclear en el Sol** [17].



La estructura general del Sol puede dividirse en núcleo, zona convectiva-radiativa y corona. En el núcleo es donde sucede la reacción de fusión, y en la zona convectiva-radiativa es donde ocurre la transferencia de energía a la corona, que es la superficie que observamos desde la Tierra (figura 2.2).

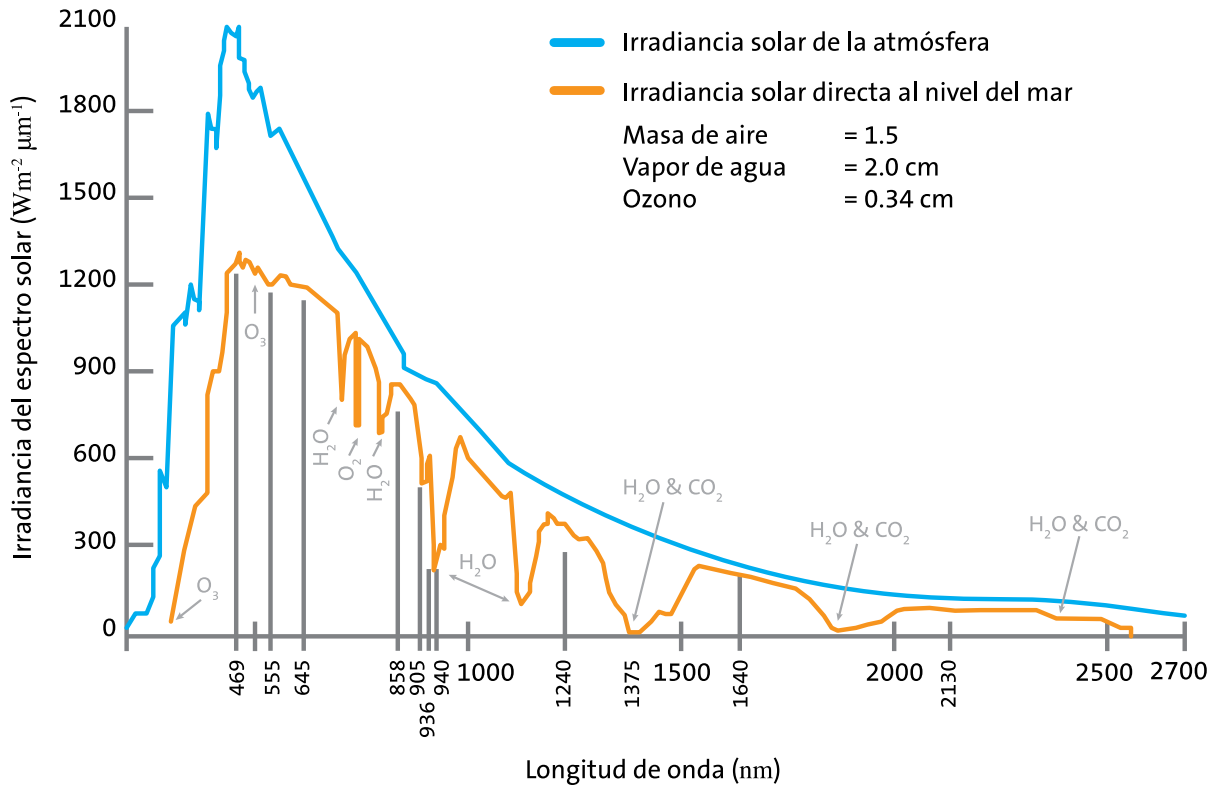
Las temperaturas del interior del núcleo sobrepasan los millones de Kelvins, pero se estima que en la superficie del Sol la temperatura promedio es de casi 5,778 K.

La cantidad de radiación por unidad de área que recibe la Tierra en el tope de la atmósfera es casi una constante, puede variar ligeramente a lo largo del año debido a que la órbita terrestre alrededor del Sol es elíptica, por lo que presenta acercamientos o alejamientos del astro, y también a causa de la actividad solar cuyo ciclo es de 11 años. El valor actualizado y más preciso es de  $1,360.8 \pm 0.5 \text{ W/m}^2$  [18]; este valor se conoce como "constante solar", pero se sabe que no es precisamente una constante universal en el sentido científico y que esas pequeñas variaciones pueden incidir en el clima terrestre pero son poco considerables en aplicaciones de energía solar térmica.

**Figura 2.2 Estructura solar** [17].



Figura 2.3 Espectro solar en el tope de la atmósfera y al nivel del mar [17].



La radiación térmica emitida por la superficie del Sol tiene una distribución espectral (que es la energía irradiada desde una fuente luminosa, la cual viene ordenada por valores de longitud de onda) que se asemeja a la de un cuerpo negro a 5,778 K, como se observa en la figura 2.3.

## 2.2 SISTEMA SOL-TIERRA [17]

La Tierra gira alrededor del Sol en una órbita elíptica, casi esférica, en la que éste está en uno de los focos. Un ciclo se completa en 365 días y se denomina movimiento de traslación (figura 2.4). A su vez, la Tierra gira alrededor de su propio eje con una duración de aproximadamente 24 horas y este giro se denomina movimiento de rotación. El eje de la Tierra está ligeramente desplazado ( $23^{\circ}26'13.7''$ ) con respecto al plano de la órbita. Este plano recibe el nombre eclíptica. El movimiento de traslación en conjunción con

la oblicuidad terrestre produce las estaciones del año; y el de rotación, el día y la noche. De estos dos movimientos depende cuánta energía solar se recibe en una determinada región de la Tierra a lo largo del año.

De esta forma en el solsticio de diciembre los rayos del Sol caen perpendicularmente en el trópico de Capricornio, y en el solsticio de junio en el trópico de Cáncer. De los trópicos hacia los polos los rayos solares nunca caen perpendicularmente sobre la superficie de la Tierra, de modo que esas regiones reciben menos radiación solar (figura 2.5).

La distancia más grande entre el Sol y la Tierra durante el año sucede en el solsticio de invierno, y la más corta en el solsticio de verano. Esta es una de las razones de que la Antártida sea el lugar más frío del planeta.

Figura 2.4 Órbita de la Tierra alrededor del Sol a lo largo del año [17].

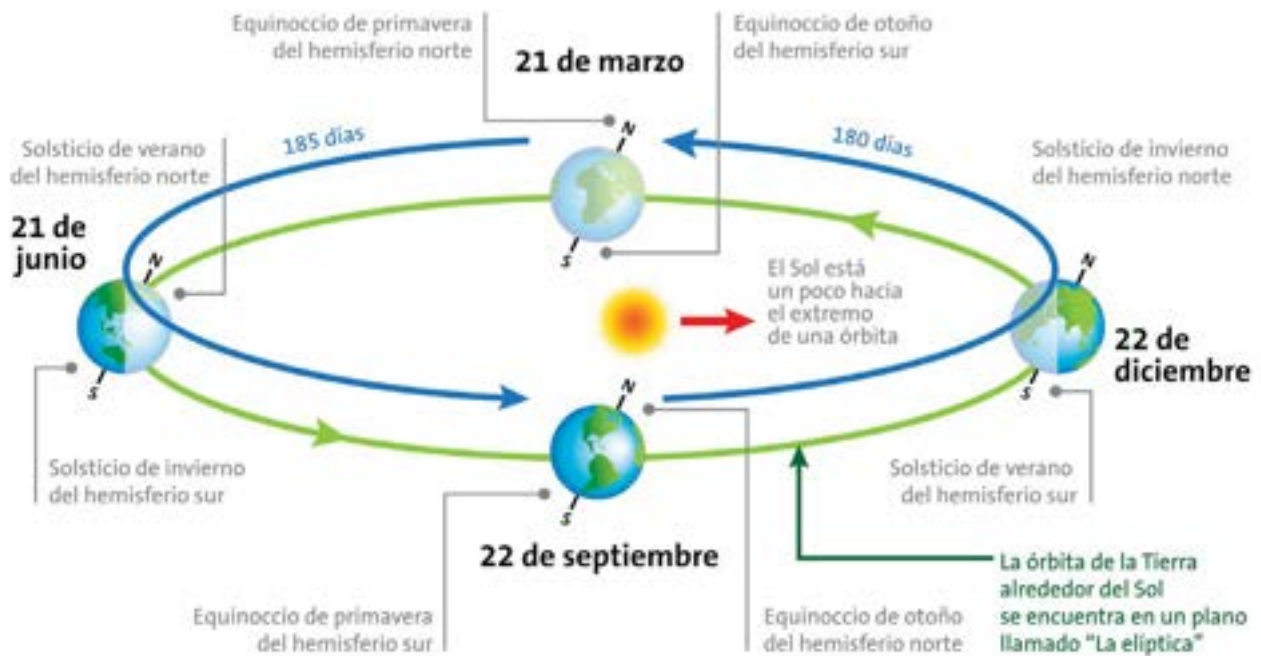
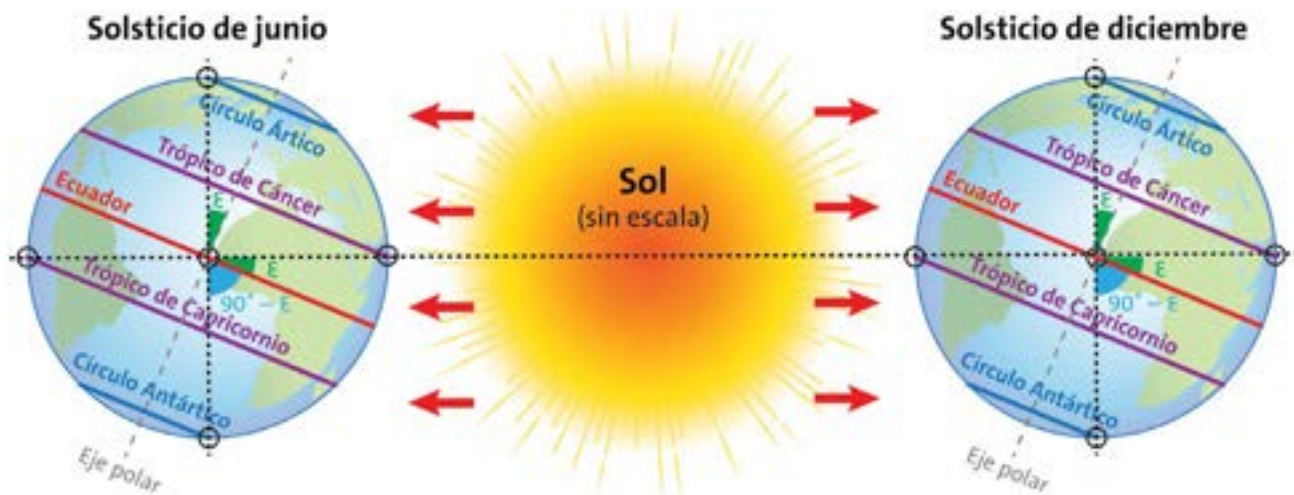


Figura 2.5 Variación de la dirección de los rayos solares sobre la superficie de la Tierra a lo largo del año [17].



## 2.3 ATMÓSFERA [17]

No sólo de la interacción del sistema astronómico Sol-Tierra depende la cantidad de radiación solar que recibe una determinada región sobre la superficie de la Tierra, sino también de las condiciones de la atmósfera. Varios fenómenos se presentan durante la trayectoria de la radiación electromagnética proveniente del Sol a través de la atmósfera: la dispersión, la reflexión y la absorción son los principales factores que atenúan la cantidad de radiación que viaja por las distintas capas atmosféricas (fig. 2.6).

**La dispersión.** Se refiere al fenómeno que ocurre cuando la radiación electromagnética interacciona con partículas o moléculas de los gases presentes en la atmósfera, y una parte de aquella es redireccionada en forma aleatoria sin cambiar la longitud de onda (dispersión de Rayleigh), y otra parte, considerable, es devuelta al espacio por este fenómeno. El tamaño de las partículas y de las moléculas afectan de diferente manera a las distintas longitudes de onda; dadas las características de la atmósfera terrestre, las longitudes de ondas pequeñas (cercanas al azul)

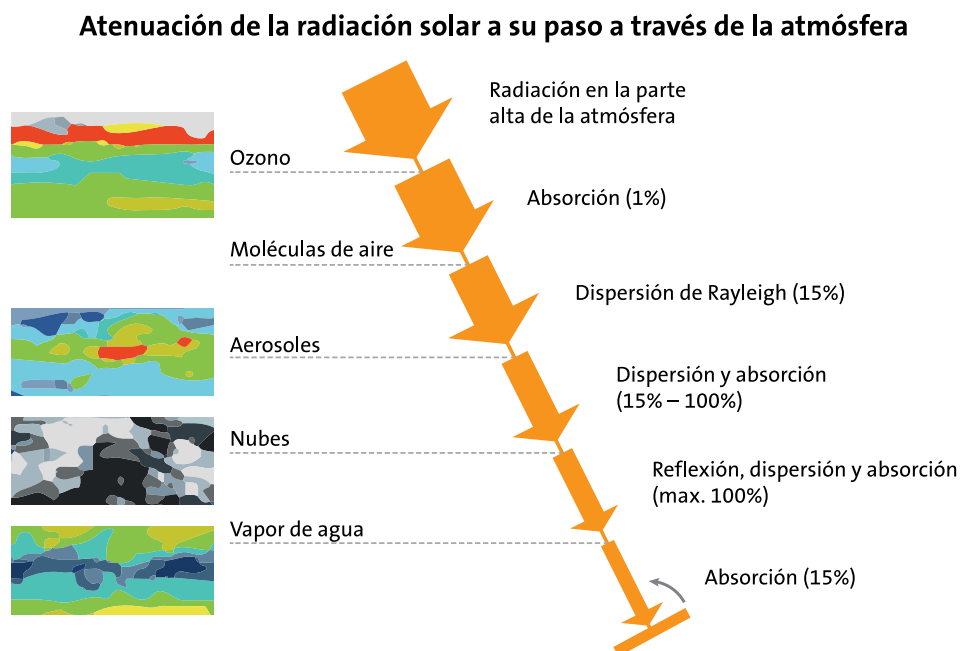
son más dispersadas (esto origina el color del cielo, de lo contrario sería transparente, como en la noche).

**La absorción.** Se presenta cuando moléculas de ozono ( $O_3$ ), de vapor de agua ( $H_2O$ ) o de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) junto con los aerosoles de partículas de polvo, hielo y otras sustancias, reciben radiación solar que aumenta su temperatura (y que se reemite por radiación térmica). Esta fracción de la energía total puede llegar a ser del 15%, dependiendo de las condiciones atmosféricas.

**La reflexión.** Las nubes conformadas por aerosoles de agua y de hielo reflejan una gran cantidad de radiación incidente, por lo que bloquean el paso de la misma a la Tierra; dependiendo del espesor de la capa de nube el bloqueo puede llegar a ser total. Las nubes presentan al mismo tiempo el fenómeno de absorción.

En términos generales se calcula que alrededor del 23% de la radiación solar extraterrestre incidente en la atmósfera será atenuada por estos fenómenos antes de llegar a la superficie de la Tierra [19].

Figura 2.6 Factores que influyen en la atenuación de la radiación solar incidente [17].





## 2.4 CONCEPTOS GENERALES

Para comprender mejor la nomenclatura utilizada en la literatura especializada sobre energía solar y sus aplicaciones se presentan a continuación algunas definiciones.

Como se vio en las secciones anteriores, la radiación solar sufre algunas transformaciones al atravesar la atmósfera terrestre, por lo que es necesario definir los diferentes componentes de la misma.

**Radiación directa.** Es la que se recibe directamente del Sol y que no ha variado su dirección, es decir, es la parte de la radiación extraterrestre que logra atravesar la atmósfera sin cambiar su dirección (pero sí su magnitud). La radiación extraterrestre (fuera de la Tierra) es por tanto radiación directa por excelencia, este tipo de radiación es la que produce sombra en los objetos en los que incide.

**Radiación difusa.** Es la que se recibe del Sol después de ser desviada por dispersión en la atmósfera, la que atraviesa las nubes, así como la que proviene del cielo azul. De no haber radiación difusa el cielo sería transparente, como sucede por ejemplo en la Luna.

**Radiación terrestre.** Es la que proviene de objetos terrestres, por ejemplo, lo que refleja una pared blanca, un lago, el suelo, etc.

**Radiación total.** Es la suma de las radiaciones directa, difusa y terrestre que se reciben sobre una superficie.

**Radiación global.** Es la radiación total que incide sobre una superficie horizontal, y es igual a la suma de la difusa y la directa.

**Irradiancia.** Se refiere a la potencia solar y es la rapidez de incidencia de energía radiante sobre una superficie por unidad de área. Se representa generalmente con el símbolo “ $G$ ”, junto con los subíndices adecuados:  $G_o$ ,  $G_b$ ,  $G_d$ , para la irradiancia extraterrestre, directa y difusa, respectivamente. Las unidades más comúnmente utilizadas para la irradiancia son  $W/m^2$ , que es la energía que incide instantáneamente sobre una superficie.

**Irradiación.** Es la cantidad de energía por unidad de área ( $J/m^2$ ) que incide durante un periodo dado, y no es otra cosa que la integral de la irradiancia durante el período de tiempo en cuestión. Generalmente se usa el símbolo “ $I$ ” para la insolación por hora, y “ $H$ ” para la insolación en el periodo de un día. Se aplican los mismos subíndices, por ejemplo:  $H_o$  simboliza la irradiación extraterrestre;  $I_d$ , la irradiación difusa en una hora, etc. La ecuación 2.1 representa la relación entre la irradiancia y la irradiación en el período de tiempo de  $t_1$  a  $t_2$ .

$$I = \int_{t_1}^{t_2} G(t) \quad (2.1)$$

**Masa de aire ( $m$ ).** Se refiere a la razón del espesor de atmósfera a través de la cual el haz de radiación solar llega a la Tierra. La masa de aire es igual a 1 cuando el Sol está en el zenit de un determinado punto sobre la Tierra a nivel del mar. Cuando el Sol está en un ángulo de  $60^\circ$  con respecto al zenit ( $\theta_z$ ),  $m = 2$ . Para ángulos de zenit de  $0^\circ$  a  $70^\circ$  a nivel del mar, una buena aproximación es:

$$m = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (2.2)$$

Para ángulos más grandes el efecto de la curvatura de la Tierra llega a ser significativo y debe ser tomado en cuenta.

**Tiempo solar.** Es el tiempo basado en el movimiento angular aparente del Sol en el cielo; el mediodía solar ocurre cuando el Sol atraviesa el meridiano del observador.

**Tiempo civil o tiempo estándar.** También llamado tiempo local, no coincide con el solar. Para convertir el tiempo estándar a tiempo solar se realizan dos correlaciones. La primera consiste en corregir por la diferencia de longitudes entre la que se encuentra el observador y en la que está basado el tiempo civil, el cual es fijado en forma de decreto gubernamental. El Sol tarda 4 minutos en desplazarse  $1^\circ$  de longitud. La segunda corrección es la ecuación del tiempo en donde se consideran las variaciones del tiempo de rotación de la Tierra, el cual afecta el tiempo en que el Sol cruza el meridiano del observador. La diferencia en minutos entre el tiempo solar y el civil es:

$$\text{Tiempo solar} - \text{Tiempo civil} = 4(L_{st} - L_{loc}) + E \quad (2.3)$$

Donde  $L_{st}$  es el meridiano estándar para el cual está basado el tiempo local,  $L_{loc}$  es la longitud del lugar en cuestión (en grados) y  $E$  es la ecuación del tiempo en minutos:

$$E = 229.2(0.000075 + 0.001868\cos B - 0.032077\sen B - 0.014615\cos 2B - 0.04089\sen 2B) \quad (2.4)$$

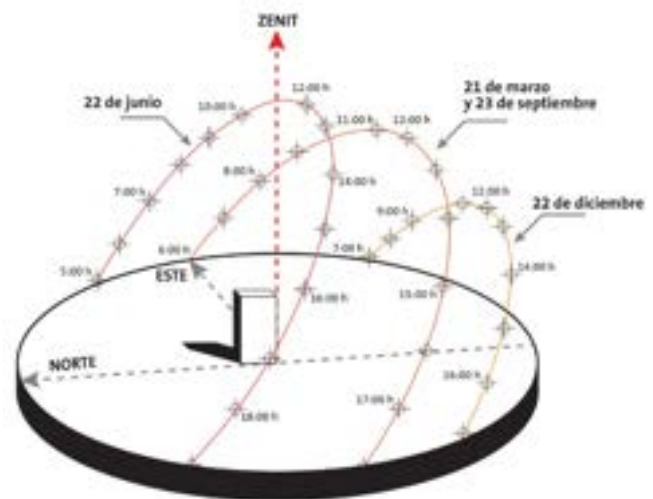
Donde  $B$  está dado por:

$$B = (n-1) \frac{360}{365} \quad (2.5)$$

y  $n$  es el día juliano del año [18]

**Trayectoria solar.** Es el movimiento aparente que sigue el Sol según lo ve un observador sobre la superficie terrestre (Figura 2.7).

**Figura 2.7 Trayectorias solares estacionales a  $40^\circ$  N de latitud [17].**



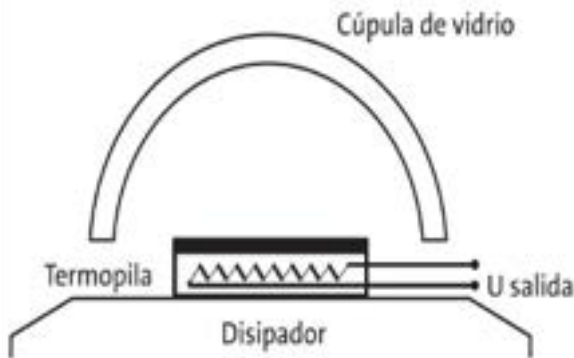
## 2.5 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

Los instrumentos utilizados para medir la radiación solar se pueden clasificar en dos tipos: piranómetros y pirheliómetros; ambos pueden denominarse radiómetros solares, pero difieren en sus funciones. Ambos comparten el mismo tipo de sensor que por lo general consiste en una termopila (unión de varios termopares en un arreglo que optimiza la señal de salida). La termopila es de un color negro mate que permite absorber casi toda la radiación solar incidente, prácticamente en todas las longitudes de onda de la radiación térmica. La temperatura de la termopila aumenta con rapidez sobre la temperatura de referencia, y esa diferencia permite estimar la potencia de la radiación solar en un instante determinado, por lo que ambos dispositivos miden la irradiancia comúnmente en  $W/m^2$ .



El **piranómetro** consiste en una termopila montada en una base de gran masa con inercia térmica y está protegida por una cúpula de vidrio transparente para evitar tanto las pérdidas de calor por convección como los efectos de la intemperie (polvo, lluvia, nieve, etc., figura 2.8). Los piranómetros son los instrumentos utilizados para medir la radiación global sobre una superficie plana. Con los accesorios especiales también miden la radiación difusa y la total sobre una superficie no horizontal incluyendo la reflejada por otras superficies.

**Figura 2.8 Diagrama y foto de un piranómetro** [17].



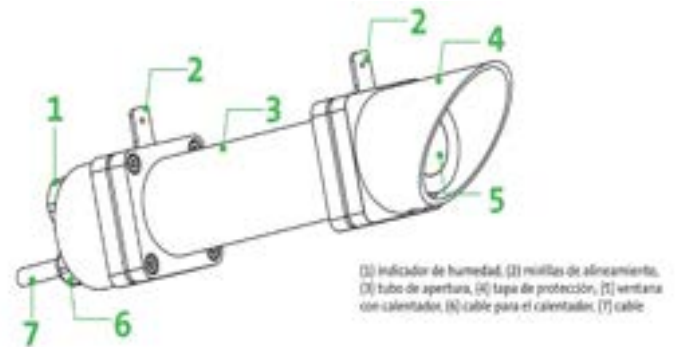
El **pirheliómetro** es un instrumento diseñado para medir la radiación solar directa, y consiste en una termopila, al igual que el piranómetro, pero con la diferencia de que ésta se encuentra colocada al final de un cilindro a fin de sólo dejar

entrar al sensor los rayos que vienen directamente del Sol, como se observa en la figura 2.9. La apertura de la lente es de sólo 5° como lo marca la norma respectiva (Norma Internacional ISO 9060 y la Organización Meteorológica Mundial).

Ambos equipos miden irradiancia en  $W/m^2$  que son las unidades internacionales para la medición de la radiación solar.

Se pueden utilizar otros equipos, pero en aplicaciones donde no se requiere gran precisión incorporan sensores fotovoltaicos, que son prácticos y de bajo costo. Su principal inconveniente es que no son sensibles en todo el rango de radiación solar por lo que sus lecturas arrojan una incertidumbre que varía entre 3 y 5%, contra el 1% en el caso de los térmicos.

**Figuras 2.9 Diagrama y fotografía de un pirheliómetro** [17].



En la figura 2.10 se muestra una estación solarimétrica común donde se observan los distintos sensores de radiación, tanto de global horizontal, difusa, directa normal y otros parámetros climatológicos.

**Figura 2.10 Estación solarimétrica automatizada [17].**



## 2.6 ESTIMACIÓN TEÓRICA Y BASES DE DATOS CLIMATOLÓGICAS

En los últimos años se han dedicado muchos esfuerzos a determinar con mayor precisión la cantidad de radiación solar que llega a la superficie terrestre. Los instrumentos que se analizaron en la sección anterior pueden medir la radiación, pero sólo para un punto, y está claro que mientras más sensores se tengan, más precisa será la estimación del recurso solar, pero resulta imposible disponer de una densa red de estos equipos, por sus

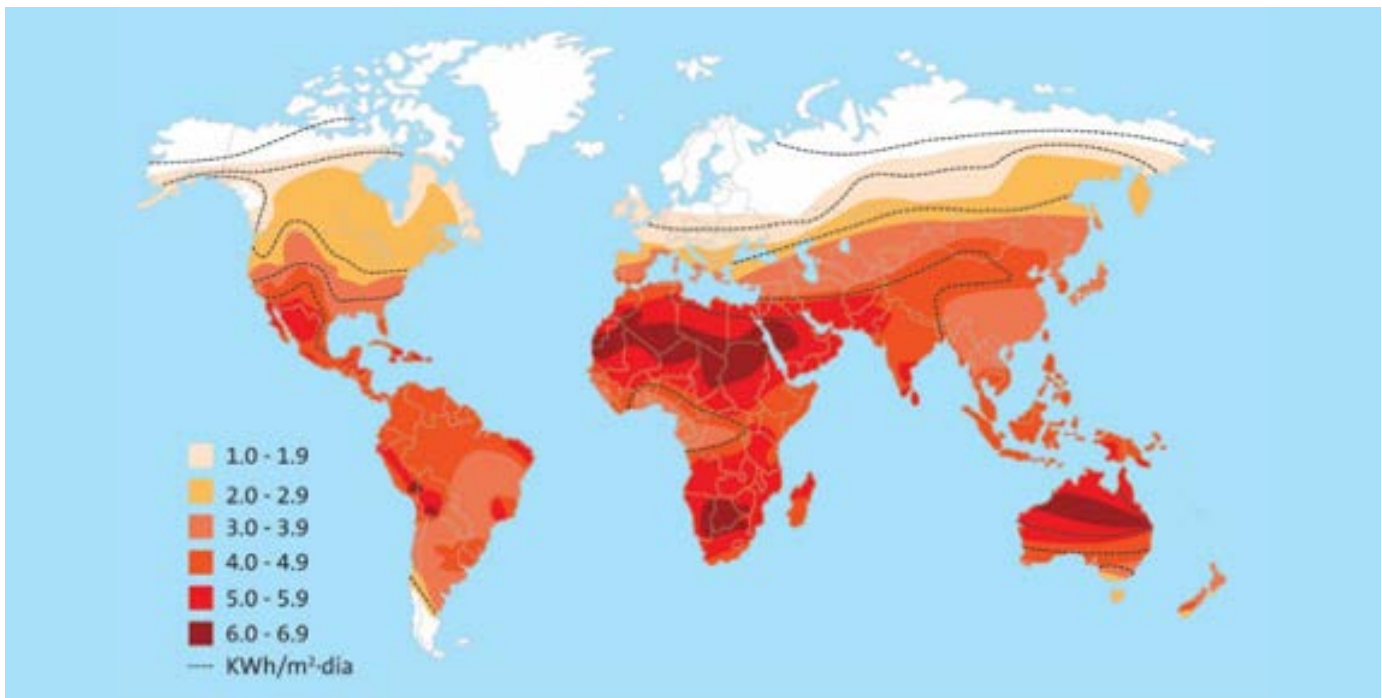
costos y por lo demandantes que son en cuanto a vigilancia, limpieza, etc., y en cuanto a calibración, además de la inaccesibilidad para instalaciones remotas. Con esto se concluye que para un país o una región determinados sólo se podrá contar con algunas estaciones solarimétricas colocadas en puntos que pudieran no ser los idóneos, sino donde se garantice cierta seguridad de operación. Por lo tanto, se requiere desarrollar algunas otras formas de estimar el recurso solar en áreas entre puntos de medición; dos son los métodos más empleados: mediante modelos matemáticos que extrapolen desde esos puntos de medición hasta cubrir áreas más extensas, y mediante lecturas de satélites. Ambos métodos han mostrado ser consistentes y sus algoritmos de cálculo son cada vez más sofisticados y han estado mejorando sustancialmente en los últimos años. No es el objetivo de este texto profundizar en estos métodos, sino presentar al lector aspectos de importancia general para aprovechar la información del recurso solar disponible.

La información sobre la radiación solar puede obtenerse a partir de bases de datos de diversas formas; si la información es medida instantáneamente (irradiancia) o si es integrada en un periodo de tiempo (irradiación); la primera es en unidades de potencia,  $W/m^2$ , y la segunda en unidades de energía, ya sean  $MJ/m^2$  o  $kWh/m^2$ .

Con mucha frecuencia estos datos se reportan en forma de promedios diarios, por lo que las unidades están en  $MJ/m^2$  día o  $kWh/m^2$  día. También pueden encontrarse integrados en todo el año. En la figura 2.11 se observa un mapamundi con los valores de radiación solar en unidades de energía por área, expresadas en promedio diario y anual, basados en un modelo llamado GeoModel.

De la figura 2.11 se pueden desprender varias observaciones; primero, las áreas del mundo donde se cuenta con mayor recurso solar (gran parte de América, todo el continente Africano, buena parte de Asia y toda Oceanía y algunas regiones de Europa); segundo, los valores más altos de radiación global horizontal pasan ligeramente de  $7.5 kWh/m^2$  día; tercero, la limitante de este modelo de cálculo del recurso solar es que no funciona en los polos, ni en lugares

Figura 2.11 Radiación solar promedio diaria (kwh/ m<sup>2</sup> día) [17].

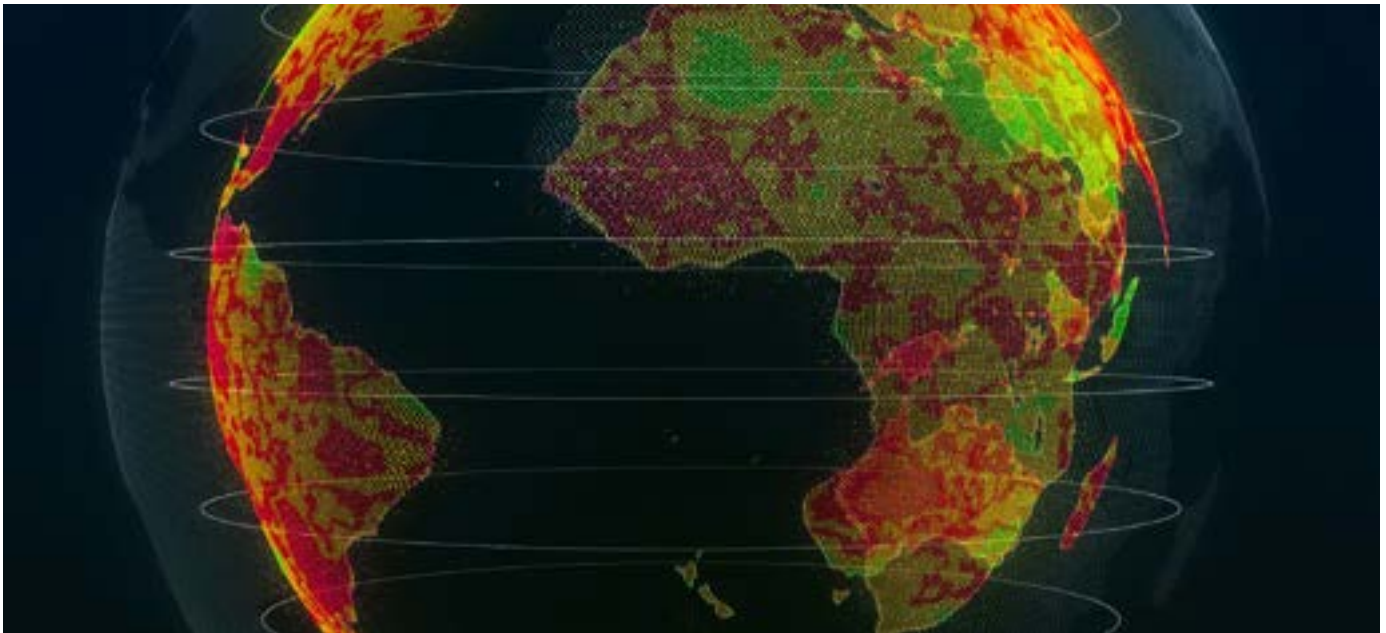


con nieve (obsérvese al norte y al sur de América, donde aparecen franjas sin color, y que el mapa se trunca en los círculos polares). Los modelos satelitales acusan una limitación en el ángulo de vista del satélite, por lo que en la actualidad no se puede discriminar en la información satelital entre nieve-hielo y nubes. Finalmente, el valor de esta información, al ser calculada en promedios y en forma muy agregada, debe manejarse como información indicativa general, para determinar extensiones con mayor o menor radiación.

Para cálculos de aplicaciones solares, ya sean de instalaciones fotovoltaicas o térmicas, regularmente se requiere mayor cantidad de datos. El procedimiento actual para el cálculo de diseño de sistemas fotovoltaicos recurre a software de simulación matemática que requiere información de radiación solar horaria a lo largo de todo un año. Muchos de estos programas acceden a sus propias bases de datos y otros permiten que el usuario incluya información del lugar para el cual se está realizando la simulación. Es frecuente que estos programas o paquetes comerciales requieran la información en un formato especial; entre los más comunes se encuentran los conocidos como

TMY (Typical Meteorological Year), que además de la radiación solar incluyen otras variables climatológicas imprescindibles para realizar las simulaciones (como son la temperatura ambiente diurna y nocturna, la velocidad de viento a 10 m de altura y la humedad relativa). Los TMY están disponibles para una gran cantidad de ciudades de EEUU, Europa y otros países [20].

Una base de datos muy asistida por la gran cantidad de información que se puede obtener y por ser de libre acceso es la del sitio web de la NASA, en el programa Surface Meteorology and Solar Energy (SSE) [21], el cual está basado en un mínimo de 10 años, de información tanto satelital como de mediciones en Tierra. Esta base de datos está pensada para usarse en los cálculos de diseño de sistemas solares, tanto fotovoltaicos como térmicos, además de que es de fácil manejo y cuenta con varias opciones dependiendo de la información requerida. La única información que se necesita introducir son las coordenadas del lugar objeto de estudio, en donde las tres componentes principales de la radiación solar (global, directa y difusa) se pueden obtener para superficies horizontales o inclinadas



a varios ángulos determinados. La malla del mapa no es muy refinada lo que presenta algunos inconvenientes sobre todo en zonas con orografías pronunciadas.

Aparentemente para cualquier ubicación del mundo la irradiancia puede estimarse en este sitio, lo que resulta especialmente ventajoso para los usuarios latinoamericanos dada la limitada información confiable del recurso solar disponible. Otras fuentes de información pueden ser el Atlas Solar Global [22] realizado con el financiamiento de banco mundial, algunos softwares comerciales como es el caso del METEONORM [23] en el que se pueden obtener series de tiempo de irradiación y temperatura o se puede obtener información también de los servicios meteorológicos de cada país (aunque hay que revisar la información disponible en este caso y el formato en que se presenta).

Cabe señalar que la información sobre el recurso solar para una determinada localidad debe ser evaluado en sitio ya que es la forma más segura y confiable de obtener esta información, sin embargo, los métodos antes expuestos pueden suplir o complementar considerablemente la información requerida para la elaboración de un proyecto de aplicaciones solares.

## 2.7 CÁLCULO DEL POTENCIAL ENERGÉTICO (SOLAR)

Para poder calcular el potencial energético solar de una localidad o lugar es necesario o bien tener mediciones en el sitio de al menos 2 años (lo ideal es tener un mayor tiempo) o bien poder contar con una base de datos una estimación teórica o base de datos confiable como las mencionadas en la sección anterior para de esta manera poder obtener un archivo TMY (Typical Meteorological Year) que incluya de preferencia los datos de irradiancia total, directa y difusa en intervalos de mínimo una hora. Una vez que se tiene el archivo detallado se pueden obtener los potenciales solares (multiplicando la irradiancia promedio por el intervalo en que se obtuvo) que se pueden reportar de acuerdo a las necesidades de cada usuario por día, por mes, por estación del año o bien de forma anual dependiendo de las necesidades específicas y de los cálculos que requiera realizar.

Normalmente estos datos vienen datos para el plano horizontal por lo que hay que corregir este valor si la superficie del sistema a calcular está en un ángulo diferente a la horizontal (como es el caso de los captadores solares para calentamiento de agua) y si no está direccionado hacia el Ecuador.

## 2.8 CÁLCULO DE SOMBRAS

En las instalaciones solares es muy importante realizar un análisis de la proyección de sombras sobre el sistema debido a los obstáculos adyacentes, así como la posibilidad de nuevas construcciones anexas y el crecimiento de árboles y plantas y por las mismas hileras de captadores y termotanques.

El criterio generalmente aceptado es que las sombras proyectadas sobre los captadores entre el total de la instalación no deben superar el 10% de la superficie de captación al mediodía del solsticio de invierno (en el hemisferio norte). Este criterio debe ser ajustado por el diseñador para cada caso particular.

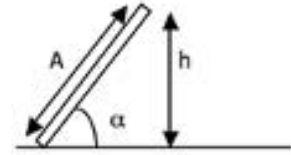
La distancia entre filas de captadores no deberá ser inferior a la obtenida por la siguiente expresión (ver Figura 2.12):

$$d = kh \quad (2.6)$$

Donde  $h$  es la altura máxima del captador u obstáculo y  $k$  es un coeficiente en función de la latitud del lugar.

La altura máxima del objeto ( $h$ ) se calcula como

$$h = A \operatorname{sen} \alpha$$



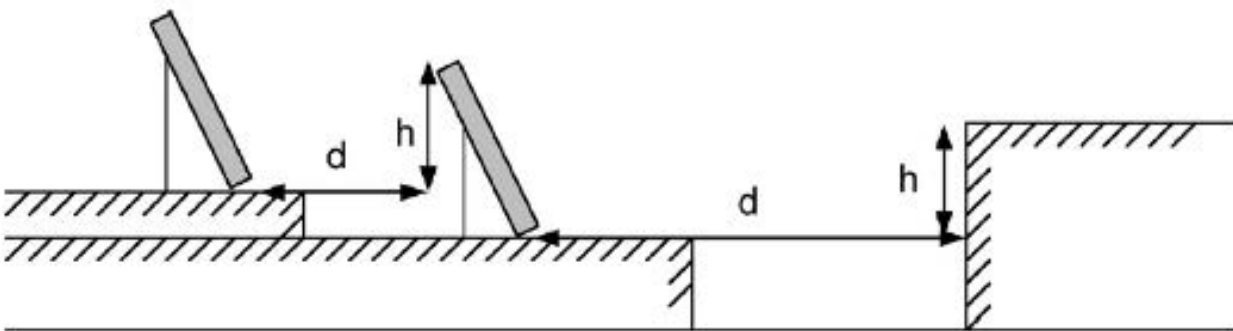
Y el coeficiente  $k$  como,

$$k = 1 / \tan (61 - \text{latitud del lugar}) \quad (2.7)$$

Existen páginas en internet donde mediante sencillas calculadoras pueden dar también valores estimados para el cálculo de la separación entre captadores solares como es el caso de la de monsoar [24], que lo calcula tanto para superficies horizontales como para planos inclinados.

También se pueden calcular mediante softwares para el diseño e instalación de sistemas solares como es el PV\*SOL [25] o muchos especializados como es el de diseño en 3D "SketchUp" [26] que te permite el cálculo de sombras en estructuras más complejas y para cada hora y día del año.

Figura 2.12 Distancia entre captadores u obstáculos [17].



## CONCLUSIONES

En este capítulo se explicó que es el Sol, su estructura y los procesos que se realizan dentro de él, así como el valor de la energía que recibe la atmósfera terrestre y como es el espectro solar para diferentes longitudes de onda.

Se explica el movimiento de la Tierra con respecto al Sol, y cómo debido a esto, los rayos solares caen con diferentes inclinaciones con respecto a la hora del día o a la época del año. Se analizan los fenómenos que se presentan durante la trayectoria de la radiación electromagnética proveniente del Sol a través de la atmósfera, como son: la dispersión, la reflexión y la absorción, que son los principales factores que atenúan la cantidad de radiación que viaja por las distintas capas atmosféricas.

Se presentan definiciones importantes en el área de la energía solar, como son los

conceptos de radiación directa, radiación difusa, radiación total. Se explica la diferencia entre irradiancia e irradiación solar y los conceptos de tiempo solar y tiempo civil.

Se describe los principios de funcionamiento de los instrumentos de medición de la radiación solar como son el piranómetro y el pirheliómetro. Se mencionan las fuentes o bases de datos que se utilizan para la estimación del recurso solar, que se aplican tanto modelos matemáticos, lecturas satelitales o estaciones de medición para obtener sus predicciones. Mediante estas predicciones se calcula el potencial energético solar para un lugar o región de la Tierra.

Finalmente, dada las diferentes trayectorias de los rayos solares, se describen las ecuaciones o softwares que se requieren para calcular la distancia entre un obstáculo y un captador solar para que este no se sombree.



## CUESTIONARIO CAPÍTULO 2

**1. ¿Cuál es el valor de la llamada constante solar, qué es la energía por unidad de área que recibe la atmósfera de parte del Sol?**

- a) 1,100.0 W/m<sup>2</sup> K
- b) 1,360.8 W/m<sup>2</sup> K.
- c) 1,580.8 W/m<sup>2</sup> K
- d) 900.0 W/m<sup>2</sup> K

**2. ¿Cuál es la distancia más larga entre el Sol y la Tierra durante el año?**

- a) Solsticio de verano.
- b) Al inicio de la primavera.
- c) Al inicio del verano.
- d) Solsticio de invierno.

**3. ¿Qué porcentaje aproximado de la radiación solar extraterrestre se atenúa debido a su paso por la atmósfera?**

- a) 23%.
- b) 50%.
- c) 33%.
- d) 72%.

**4. Está definido como la cantidad de energía por unidad de área (J/m<sup>2</sup>) que incide del Sol en un periodo dado.**

- a) Radiación directa.
- b) Irradiación.
- c) Irradiancia.
- d) Radiación difusa.

**5. Instrumento que se utiliza para medir la irradiancia global sobre una superficie plana**

- a) Pirheliómetro.
- b) Anemómetro.
- c) Piranómetro.
- d) Contador Geiger.

**6. Calcular la distancia mínima a la que requiere estar un captador solar que de un obstáculo que se encuentra hacia el Ecuador y que tiene una altura de 1 m para que no se sombree. Esto para la ciudad de Panamá que se encuentra a una latitud de 9° y considerando el ángulo de inclinación del captador solar es de 10°.**

- a) 0.78 m.
- b) 0.14 m.
- c) 1.28 m.
- d) 0.65 m.

### CAPÍTULO 3 DIMENSIÓN Y SELECCIÓN DE EQUIPOS PRINCIPALES PARA CALENTAMIENTO SOLAR DE AGUA



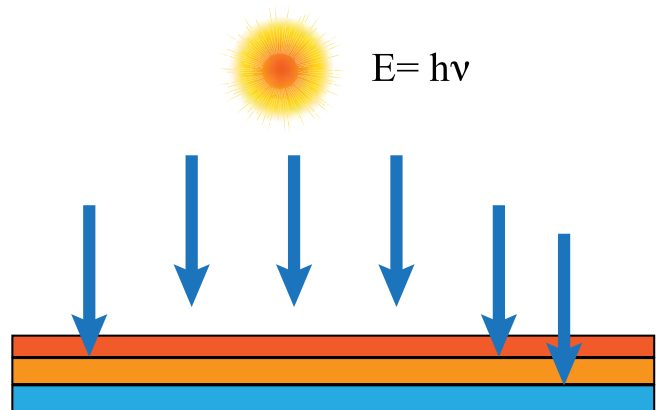
Crédito: Termosolar · País: Panamá  
Sector: Salud Pública · Tipo: Colector solar de placa plana.

### 3.1 PRINCIPIOS DE CONVERSIÓN FOTOTÉRMICA [27]

La energía que se recibe del Sol se propaga en forma ondulatoria con un espectro continuo de emisión, en un intervalo de longitud de onda característico. Su contenido energético depende precisamente de la frecuencia, de acuerdo con la figura 3.1. El elemento principal de un dispositivo termoconversor es una superficie, normalmente metálica, recubierta con un material de alta absorción (absortividad) de la radiación solar, lo que provoca una elevación de la temperatura.

Existen algunos principios básicos para el mejor aprovechamiento de la energía solar. El primero se basa en elegir la mejor época del año, determinar la inclinación y orientación correctas y seleccionar los materiales de construcción más adecuados. El segundo principio consiste en conservar durante el mayor tiempo posible la energía almacenada por el absorbedor. En este caso se debe proveer al absorbedor con

Figura 3.1 Energía radiante recibida sobre una superficie absorbente [27].



aislamientos térmicos: convectivos, radiativos y conductivos para disminuir las pérdidas térmicas. Para seleccionar adecuadamente los diferentes materiales que permitan estos aislamientos es necesario conocer su interacción con la radiación, que es de dos tipos: la solar, cuya longitud de onda es corta (entre 0.25 y 2.5 micras) y la que emiten los cuerpos terrestres, cuya longitud de onda es larga (entre 2.0 y 100 micras) [28].



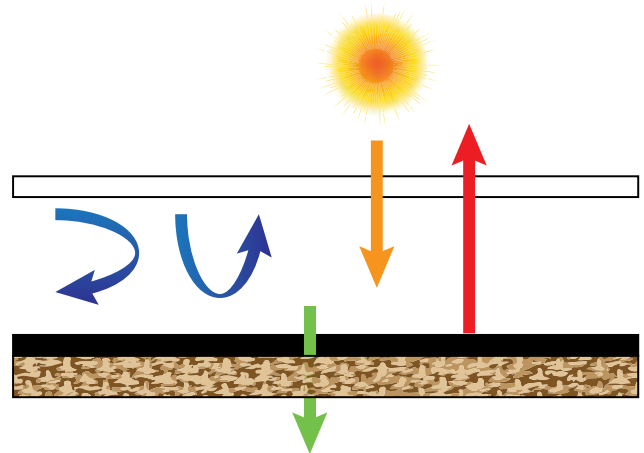
El aislamiento convectivo consiste en colocar una cubierta transparente a la radiación solar sobre el absorbedor para disminuir el efecto de intercambio térmico con el aire circundante. Algunos materiales transparentes presentan cierta selectividad, es decir, son transparentes a onda corta y opaca o reflectora a la radiación de onda larga como es el caso del vidrio y algunos materiales plásticos. Esta propiedad genera el efecto invernadero, que permite la acumulación de calor y disminuye al mismo tiempo las pérdidas convectivas y las radiativas. A medida que se aumenta el número de cubiertas, disminuye la convección térmica, pero también la transparencia. Esto produce aumento de la temperatura, pero disminución sensible de la eficiencia de conversión [29].

En cuanto a las pérdidas radiativas, no existe un material que de manera natural absorba mucha radiación y emita poca. La mayoría de los absorbedores se aproximan a un cuerpo negro, el cual absorbe y emite en la misma proporción la radiación incidente. Existe una gran cantidad de técnicas para generar depósitos de materiales sobre el sustrato metálico del absorbedor para darle la propiedad de selectividad espectral al tener una alta absorptividad de la radiación solar y una baja emisividad térmica en el infrarrojo, como es el caso de ciertos óxidos metálicos. Cabe mencionar que las pérdidas térmicas ocurren de manera simultánea cuando el absorbedor se somete a la radiación solar durante el día. Durante la noche los intercambios térmicos se efectúan entre la radiación emitida por la atmósfera y la del absorbedor [30].

Las pérdidas por conducción térmica pueden disminuirse utilizando materiales de baja conductividad térmica, como fibras naturales o minerales, espumas plásticas, etc. El tipo de material así como el espesor requerido son función de la conductividad térmica y de la diferencia en temperatura entre la del interior del absorbedor y la del ambiente. Además debe considerarse su exposición a la radiación ultravioleta en donde algunos aislamientos se pueden degradar. La figura 3.2, ejemplifica las diferentes pérdidas térmicas que pueden ocurrir en un conversor

térmico, las flechas azules representan las pérdidas convectivas, la verde las pérdidas conductivas, la roja las pérdidas radiativas. La flecha amarilla las ganancias de energía debidas a la irradiancia solar [29].

**Figura 3.2 Representación esquemática de las pérdidas térmicas de un absorbedor solar [27].**



Otro principio básico para el mejor aprovechamiento de la energía solar se refiere a extraer el calor almacenado de la forma más eficiente posible. En este caso, se utiliza un fluido que por sus características permita optimizar la recuperación de la energía térmica; el mejor de ellos es el agua, seguido de algunas soluciones acuosas y aceites que posibilitan elevar los puntos de ebullición, y finalmente el aire, aunque sus propiedades térmicas no son adecuadas, permite tener un sistema de calentamiento simple, sin problemas de corrosión y de afectación por las bajas temperaturas [29].

Existe un límite teórico de la máxima temperatura que se puede alcanzar en un absorbedor solar, dependiendo del tipo de tecnología y materiales utilizados. Las pérdidas térmicas más importantes son las debidas a la convección del aire. Si quisiéramos aumentar la temperatura, podríamos incrementar el número de cubiertas, pero disminuiría en consecuencia la transmitancia [28]. Otras técnicas consisten en la incorporación de barreras anticonvectivas a fin de reducir el contenido del aire interior, producir vacío al interior de los equipos y finalmente en aumentar

la densidad de la energía solar mediante dispositivos concentradores, como lentes, lentillas o espejos con diferentes geometrías.

**Barreras anticonvectivas.** Si las cubiertas se colocan paralelas a la superficie, la radiación reflejada sale de la superficie absorbidora por la cubierta exterior; mientras que si se colocan perpendicularmente, la radiación se dirige hacia el absorbedor y no se pierde. Por otro lado, debido a que las particiones se pueden hacer bastante delgadas, es posible evitar las absorciones en las particiones con el resultado neto de que la transmisión solar del aislamiento convectivo llega a ser bastante alta. Considerando que están debidamente diseñadas las particiones verticales, estas pueden suprimir las corrientes de convección natural. Si son opacas a la radiación de longitud de onda larga, pueden también reducir sustancialmente las pérdidas radiativas del absorbedor. Si son transparentes, se debe usar una superficie selectiva en el absorbedor, y las particiones verticales se limitarán a suprimir la convección. En un principio las particiones eran hexagonales, por lo que originalmente este tipo de captadores se conoce con el nombre de captadores solares planos tipo panel [31]. La figura 3.3 muestra las diferentes formas de las barreras anticonvectivas, las cubiertas transparentes horizontales y las correspondientes verticales. Otra técnica para disminuir las pérdidas convectivas del aire consiste en reducir su contenido en las

inmediaciones del absorbedor solar. A este tipo de absorbedor solar se le conoce como captador tubular al vacío. Está compuesto por una serie de tubos transparentes por lo general de vidrio. En cada uno de ellos hay un absorbedor que capta la energía solar y un intercambiador para permitir la transferencia de la energía térmica. A todos los tubos se les hace vacío para disminuir en lo posible las pérdidas térmicas convectivas del absorbedor, el cual contiene un tratamiento selectivo para disminuir a su vez las pérdidas térmicas radiativas [30].

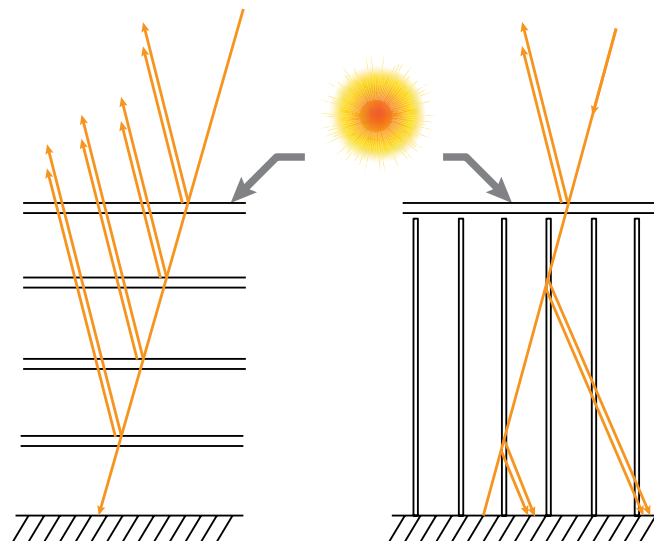
### 3.2 EQUIPOS PRINCIPALES Y ACCESORIOS (DISPOSITIVOS CONVERSORES TERMOSOLARES DE BAJA TEMPERATURA)

En la sección 1.3.1 se describieron ya los dispositivos conversores termosolares (que convierten la energía solar en energía térmica) de baja temperatura más utilizados en la actualidad.

### 3.3 PRINCIPIOS DE OPERACIÓN DE UN SISTEMA CSA [27]

En esta sección se describen los principios fundamentales de operación de los más comunes sistemas de calentamiento solar de agua de baja temperatura utilizados en la actualidad.

**Figura 3.3 Disposición de barreras anticonvectivas paralelas horizontales y verticales [27].**



### 3.3.1 Aplicaciones de los Sistemas CSA en el Sector Residencial [27]

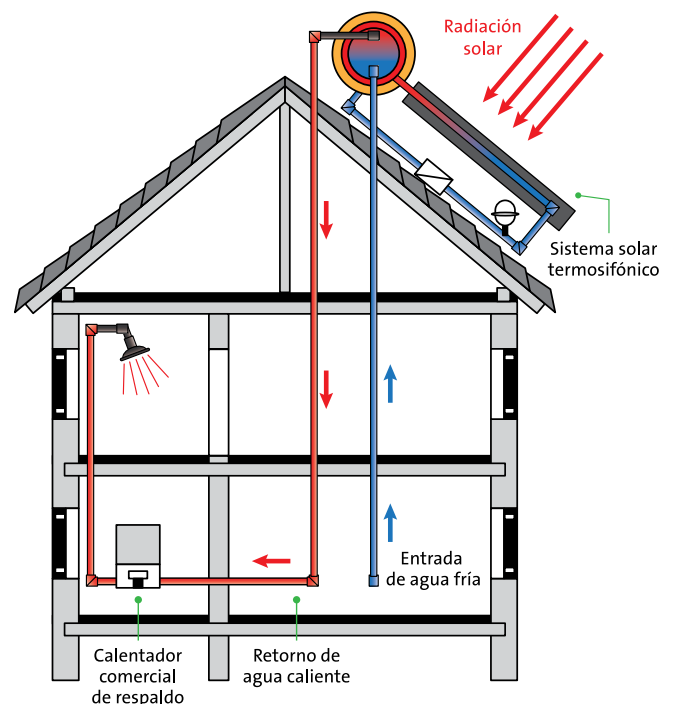
Para este sector, y para viviendas de clase media y baja en general, los requerimientos de agua calientes no son muy grandes, por lo que pueden cubrirse por lo general con sistemas termosifónicos, ya sea de placa plana o de tubos evacuados (descritos en la sección 1.3.1.). Estos sistemas presentan la ventaja de no requerir una bomba y trabajan de manera automática. Los sistemas más comunes, y que pueden en general satisfacer los requerimientos de agua caliente para una familia de entre 3 y 4 personas, son los termosifónicos con tanques termos de 150 litros y un captador solar de aproximadamente 2 m<sup>2</sup>; en caso de ser mayores los requerimientos de agua, se pueden instalar dos de estos sistemas en paralelo para que proporcionen el doble de capacidad. La instalación típica de estos sistemas se puede ver en la figura 3.4, estos sistemas suelen instalarse en serie con el calentador auxiliar (boiler o calentador de gas normalmente), con el objeto de que aún en días nublados o cuando aumente la demanda de agua caliente en la vivienda (si hay visitas en casa, por ejemplo) el usuario pueda seguir recibiendo agua caliente sin problemas; así, el ahorro de combustible es notorio y el usuario recibe agua caliente siempre que lo requiera, independientemente de las condiciones climatológicas o de la cantidad de agua caliente que necesite. Es importante también revisar el acoplamiento entre el sistema solar termosifónico y el sistema de respaldo para que su rendimiento sea óptimo. El mejor acoplamiento de los sistemas solares, y por tanto un mayor ahorro, se alcanza con sistemas de rápida recuperación o bien con sistemas instantáneos dotados de control termostático; en caso de usar calentadores de depósito es importante que el termostato se coloque en una posición media o baja para conseguir ahorros significativos del sistema solar (véase fig. 3.4).

Los sistemas termosifónicos se instalan en la azotea de la vivienda cuidando que no queden bajo sombras y de preferencia que el captador solar del sistema esté orientado hacia el Ecuador (nunca en sentido opuesto) con una inclinación

igual a la latitud del lugar  $\pm 10^\circ$  para lograr la mayor ganancia de energía a lo largo del año. En el caso de que la vivienda cuente con un tanque elevado, es indispensable que el tanque termo del sistema termosifónico esté por debajo de la parte inferior de dicho tanque, para asegurar que en todo momento el sistema solar se encuentra lleno de agua y evitar de esta manera problemas en su funcionamiento.

Para los sistemas termosifónicos, se ha estimado una tasa interna de retorno (derivado de los ahorros que se obtienen en la reducción del consumo de gas LP) para Panamá de 3 a 5 años si se compara un equipo de calentamiento de agua por electricidad y unos 7 a 9 años si se compara con un equipo de calentamiento de agua de gas LP [32].

**Fig 3.4 Instalación típica de un sistema solar termosifónico para vivienda [27].**



### 3.3.2 Aplicaciones de los Sistemas CSA en el Sector Servicios [27]

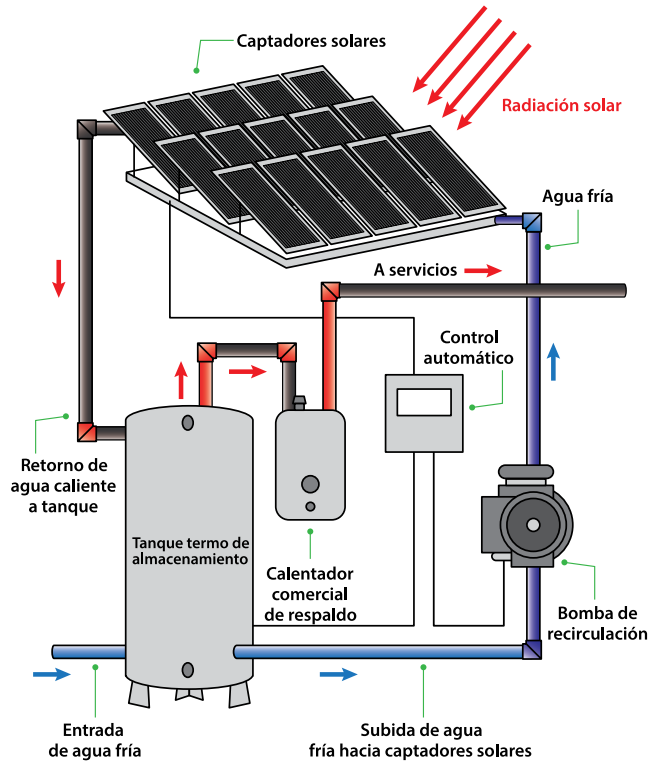
Este sector (hoteles, hospitales, centros deportivos, baños públicos, centros comerciales, etc.) en general requiere volúmenes de agua caliente superiores a los 1000 litros por día, por

lo que ya no son recomendables los sistemas termosifónicos, porque resultarían más costosos que instalar un sistema en convención forzada con una bomba acoplada a un conjunto de captadores solares colocados en serie o en paralelo según las necesidades y un termotanque con una capacidad suficiente para los requerimientos de consumo de agua caliente. La figura 3.5 muestra un esquema de una instalación típica para este sector con sus equipos principales que se describen a continuación.

Los captadores del sistema se instalan en las azoteas (ver Fig 3.5) cuidando que no queden bajo sombras (y que no se sombreen entre sí) y que estén orientados hacia el Ecuador (nunca en sentido opuesto) con una inclinación igual a la latitud del lugar  $\pm 10^\circ$  para lograr la mayor ganancia de energía a lo largo del año. Se requiere un control automático de arranque y paro de la bomba de recirculación (ver Fig 3.5) para que el sistema pueda dar la mayor cantidad de energía de acuerdo con los requerimientos de volumen y temperatura de agua caliente. Al igual que en el caso de los sistemas domésticos, estos sistemas tienen que ir conectados en serie a una caldera o calentador comercial de respaldo (ver Fig 3.5) con el objetivo de que el usuario final disponga siempre de agua caliente para los requerimientos que se le puedan presentar.

En estos sistemas es muy importante diseñar con cuidado la red hidráulica para asegurar que el flujo de agua se reparte equitativamente entre todos los captadores, ya que, en caso contrario, se reduce por un lado la eficiencia del sistema y por el otro se corre el riesgo de bajo flujo en algunas zonas. Debido al bajo flujo en algunas zonas, se pueden alcanzar temperaturas de evaporación que aumentan la presión y pueden llegar a reventar las tuberías. Debido a su tamaño y peso (superior en general a una tonelada), los tanques termos de almacenamiento de este tipo de sistemas se instalan generalmente en el piso dentro de un cuarto de máquinas donde también se encuentra la bomba de recirculación (en caso de ser de acero al carbón tendrán que tener ánodos de sacrificio de magnesio para disminuir

**Fig 3.5 Instalación típica de un sistema solar de convección forzada para el sector comercial** [27].



las posibles afectaciones debido a la corrosión) y los calentadores de gas de respaldo o la caldera (ver Fig 3.5).

Para este sector, el sistema solar se diseña para que aporte un cierto porcentaje de la energía, el restante lo sigue aportando la caldera o calentador de gas de respaldo, en función de los requerimientos de agua caliente (cantidad de litros y temperatura deseada), verificando si estos consumos son más o menos constantes o presentan una estacionalidad marcada (como en el caso de los hoteles en temporadas vacacionales). Se diseña generalmente para el valor óptimo de este factor solar (normalmente entre 70 y 85%) en función de la tasa interna de retorno y el tiempo de recuperación de la inversión, comparado contra el costo de los combustibles para una caldera o un calentador de respaldo. Es imposible diseñar un sistema solar que pueda dar el 100% del factor solar, ya que sería muy costoso, y aun así no cumpliría su objetivo en el caso de que se presenten varios días consecutivos nublados.

**Fig. 3.6 Instalaciones de sistemas solares para sector servicios.**



Fotos cortesía de Módulo Solar S.A de C.V

Estos sistemas han probado un retorno de la inversión (derivado de los ahorros que se obtienen en la reducción del consumo de combustibles) en general entre 3 y 5 años en países latinoamericanos, y una vida útil garantizada por más de 10 años, por lo que representan una inversión atractiva. En la figura 3.6 se muestran fotografías de instalaciones típicas en el sector comercial y de servicios.

### **Acondicionamiento de agua para piscinas (del sector residencial e industrial)**

Las piscinas, sean residenciales o de servicios, requieren temperaturas normalmente de 26 a 30°C.

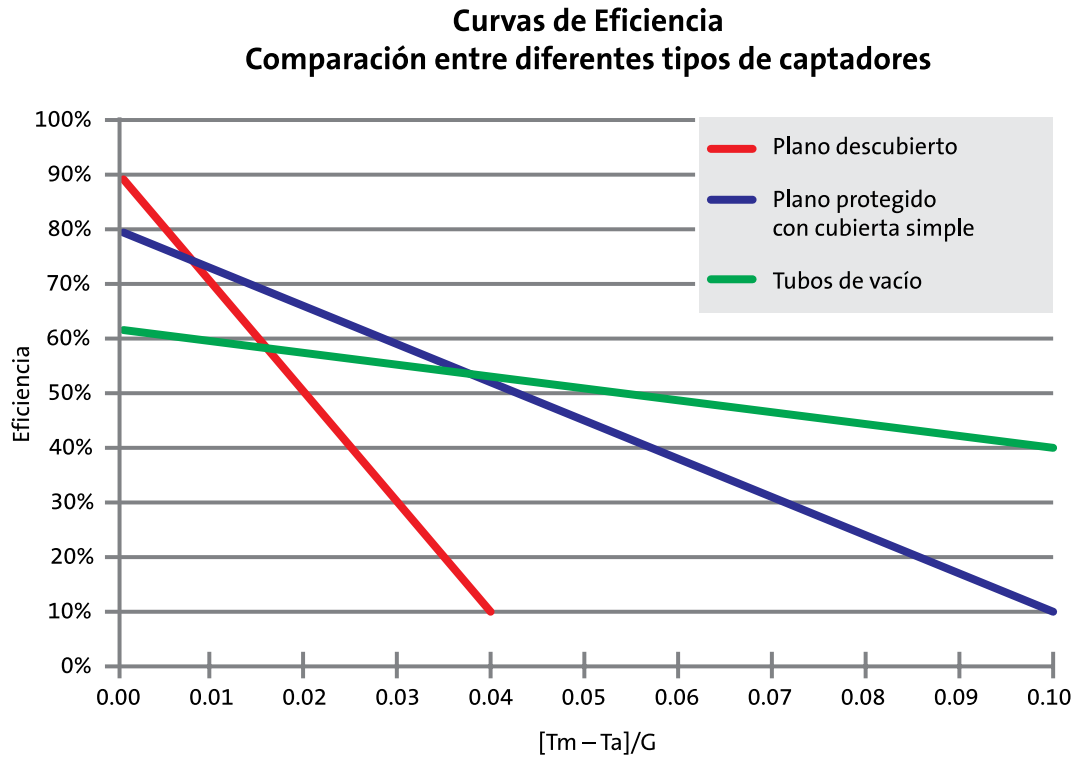
Los captadores más recomendables para este fin son los captadores planos desnudos (sin cubierta) de materiales poliméricos, debido a que son más económicos, sumamente ligeros y muy fáciles de instalar (estos captadores son muy adecuados para el calentamiento de agua a temperaturas inferiores a los 40 °C). Como se ve en la figura 3.7, estos captadores tienen un mejor rendimiento que las otras tecnologías, debido a que la temperatura a la cual se requiere el agua de la piscina es bastante baja comparada con la que se necesita para otro tipo de procesos o servicios. Con lo cual, el gradiente de temperatura suministrado por el sistema solar es de apenas de unos cuantos grados Celsius por encima de la

temperatura de la piscina. El rango de uso para piscinas es para valores en el eje X menores a 0.015 °C/W/m<sup>2</sup> (véase la fig. 3.7); de tal forma que escogiendo el captador más eficiente y barato se reducirán los costos finales del sistema completo para calentamiento de la piscina. Para valores mayores a la cantidad anterior la eficiencia de esta tecnología decae drásticamente.

Los únicos casos en que se justificaría una tecnología diferente a la de captador plano descubierta en piscina son en zonas de vientos fuertes, donde el captador está totalmente expuesto al viento, y no se cuenta con protecciones de viento como pueden ser un alerón, el cual se utiliza en algunas construcciones. Otra justificación sería para zonas de climas extremos fríos, en piscinas techadas y cerradas donde el sistema solar se utilice durante todo el año. Lo anterior, previa evaluación de que la aportación de los captadores en la temporada de invierno pueda ser importante y rentable; bajo estas premisas, los captadores planos con cubiertas pudieran ser una buena opción, o bien los tubos evacuados, en los lugares de climas muy extremos.

En la figura 3.8 se muestra el diagrama típico de una instalación de captadores solares en una piscina. En esta figura se describen los principales elementos que integran el sistema: bomba de recirculación del agua de la alberca a los captadores solares y al sistema de filtrado (1), válvula check para evitar

Fig 3.7 Eficiencia típica de captadores solares [27]



que el flujo de agua pueda ir en sentido inverso cuando se apaga la bomba (2), válvula de 3 vías para dirección el agua o bien hacia los captadores solares o hacia el sistema de filtrado (3), válvula de esfera para poder independizar el sistema solar de forma manual el caso de mantenimiento o reparación del mismo (4), válvula eliminadora de aire colocada en la parte superior del sistema para purgar de aire el sistema y evitar que se tenga un flujo de agua no homogéneo o se incremente la presión del sistema al calentarse el aire (5), se muestra la tubería de entrada a los captadores (6) y de retorno hacia la alberca (7) una vez que el agua se calentó por su paso por los captadores solares, un control automático (8) de la bomba que arranca y para la misma en función de los valores de irradiancia del sensor montado en la instalación (9) y del sensor de temperatura del agua de la alberca (10).

En general, una piscina bien construida y acondicionada cuenta con un sistema de filtrado y recirculación del agua con una bomba. En estos casos y después de un cálculo hidráulico se puede utilizar en varias ocasiones la misma bomba para llevar el agua de la piscina hacia los captadores y retornarla a la piscina. Es indispensable en

estos sistemas un control de temperatura que arranque la bomba de forma automática, lo que incrementa la eficiencia del sistema. Los captadores solares se colocan sobre las azoteas de la instalación y se calculan la superficie necesaria del captador en función de las dimensiones de la alberca, las condiciones climatológicas del lugar y de las zonas disponibles no sombreadas de las azoteas. Los captadores desnudos poliméricos (ver Fig 1.7a) tendrán la inclinación del techo en que se montan, por lo que hay que tener cuidado únicamente de no instalarlas en techos de dos aguas por el riesgo de que queden en dirección opuesta al Ecuador, en cuyo caso no funcionarían de manera adecuada y su rendimiento decaería drásticamente.

En el caso de piscinas es altamente recomendable colocar una cubierta flotante nocturna que cubra el área superficial del espejo de agua, ya que durante la noche, cuando las temperaturas decaen, las pérdidas evaporativas a través de su superficie son muy elevadas. La colocación de una cubierta flotante nocturna reduce de manera considerable estas pérdidas, con lo que el sistema solar diseñado en estos casos puede ser de hasta la mitad del tamaño comparado

con uno que no cuente con dicha cubierta. Además, la cubierta también reduce considerablemente el requerimiento de cloro y otros productos en la alberca, pues se evaporan también durante la noche, y evita la acumulación de basura u hojarasca.

En general, la utilización de sistemas solares para calentamiento de piscinas puede ser de dos tipos:

**1) Piscina doméstica.** En este caso la piscina normalmente no cuenta con una caldera y se diseña el sistema para que el usuario disponga de una temperatura del agua confortable (en general se fija una temperatura de 28 °C). En climas fríos y con piscinas no techadas, la utilización efectiva en el año de la piscina se puede reducir a 8 meses. En estos sistemas lo que se le brinda al usuario final es confort y la posibilidad de ampliar el aprovechamiento de su piscina unos 2 meses más, de lo que lo haría si no contara con el sistema solar de calentamiento.

**2) Piscinas comerciales.** En este caso la piscina normalmente cuenta con una caldera y se diseña el sistema para que el usuario consiga una temperatura del agua confortable durante todo el año (en general se fija una temperatura de 28 °C). En estos casos, se diseña el sistema solar para que aporte un cierto porcentaje de la energía, el restante lo sigue aportando la caldera que se utiliza principalmente en la temporada de invierno. De esta manera, se diseña para el valor óptimo de este factor solar (normalmente entre 70 y 85%) en función de la tasa interna de retorno y el tiempo de recuperación de la inversión, comparado contra el costo de los combustibles o la electricidad para una caldera o una bomba de calor. Es posible diseñar un sistema que pueda dar el 100% de factor solar, sin embargo sería muy costoso, y aun así pudiera no cumpliría su objetivo en el caso de que se presenten varios días consecutivos nublados.

**Fig. 3.8 Esquema de instalación de un sistema solar en una piscina:**

- 1) bomba de recirculación del sistema solar;
- 2) válvula check;
- 3) válvula de tres vías que automáticamente dirige el agua hacia los captadores o recircula hacia el filtro ;
- 4) válvulas esfera para habilitar o deshabilitar el sistema solar de forma manual;
- 5) válvula eliminadora de aire;
- 6) entrada de agua fría a los paneles;
- 7) salida de agua caliente de los captadores;
- 8) control diferencial que controla la bomba;
- 9) sensor de radiación solar;
- 10) sensor de temperatura en la tubería de agua fría de la alberca [27]

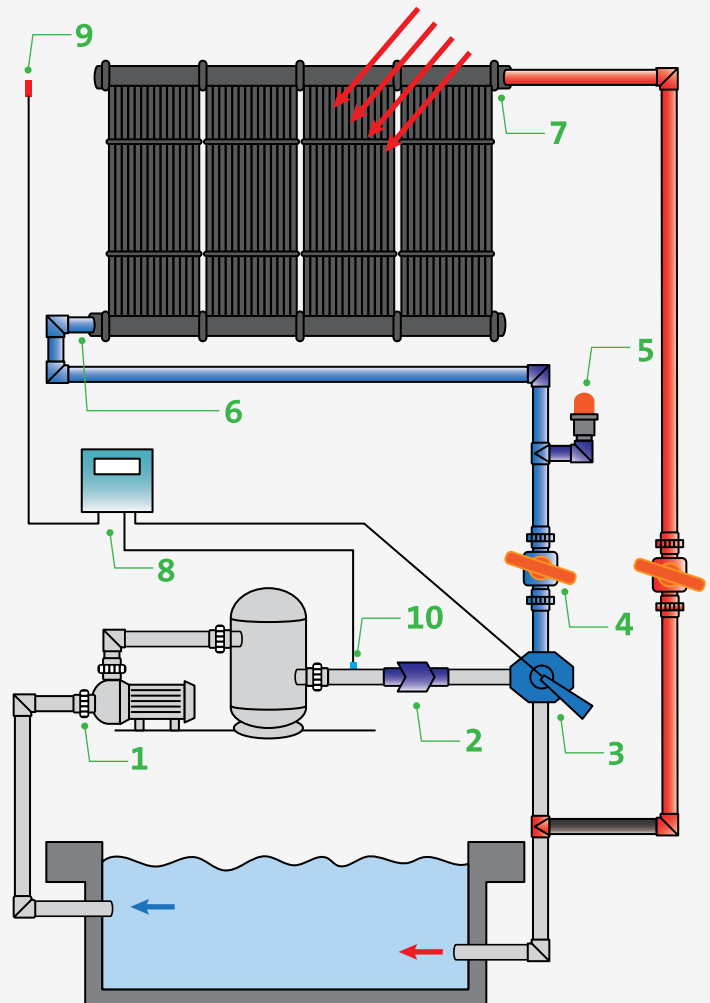


Fig 3.9 Instalaciones de sistemas solares para piscinas.



Fotos cortesía de Módulo Solar S.A de C.V

Las instalaciones de calentamiento de agua para piscinas son sin lugar a dudas las más económicamente viables que se pueden realizar con captadores solares. En estas instalaciones, los retornos de inversión son prácticamente en todos los casos inferiores a un año, lo que se pueden reducir aún más si se complementan estos sistemas con cubiertas flotantes para cuando la piscina no está en servicio. Los sistemas no requieren en general de mayor mantenimiento y su arranque y paro es automático mediante un control diferencial.

Las instalaciones de sistemas solares para piscinas son muy habituales, tanto para uso residencial como para el comercial. Muestra de esto lo podemos apreciar en las fotografías de la figura 3.9.

### 3.3.3 Aplicaciones de los Sistemas CSA en el Sector Industrial [27]

#### Aplicaciones en sistemas acuícolas, criaderos y acondicionamiento de biodigestores

En general, los sistemas acuícolas, de criaderos de aves y el acondicionamiento de biodigestores son sistemas que incrementan su rendimiento en la medida en que aumenta su temperatura de operación, incluso puede estar directamente relacionado con la incidencia de la radiación solar

como promotor de crecimiento, como en el caso de la producción de organismos vegetales. Es conocido que en muchas latitudes, sobre todo en aquellas con climas extremos, las condiciones naturales (bajas temperaturas, fuertes vientos o ambos factores) no favorecen las actividades del sector agroindustrial y pecuario, sino que incluso las pueden llegar a inhibir notablemente. Para mejorar las condiciones de producción de los sistemas de referencia, es necesario acondicionar los espacios destinados a tal fin, proveyéndolos de energía térmica y en algunos casos encapsulándolos (tipo invernadero) para hacer más eficiente el suministro de energía.

Las fuentes tradicionales de energía térmica han sido la biomasa, a través de la quema de leña y desechos agrícolas, la geotermia en los sitios en los que se dispone de tal recurso, pero fundamentalmente la quema de algún hidrocarburo (diésel, combustóleo o gas).

El control adecuado de los distintos parámetros para cada aplicación (el aporte alimenticio y el control estricto del medio de cultivo), incluida la temperatura idónea, permitirá el tránsito de un sistema de producción extensiva a uno intensivo, caracterizado por una alta concentración de individuos, una producción más abundante y un mayor rendimiento económico.



## Sistemas acuícolas

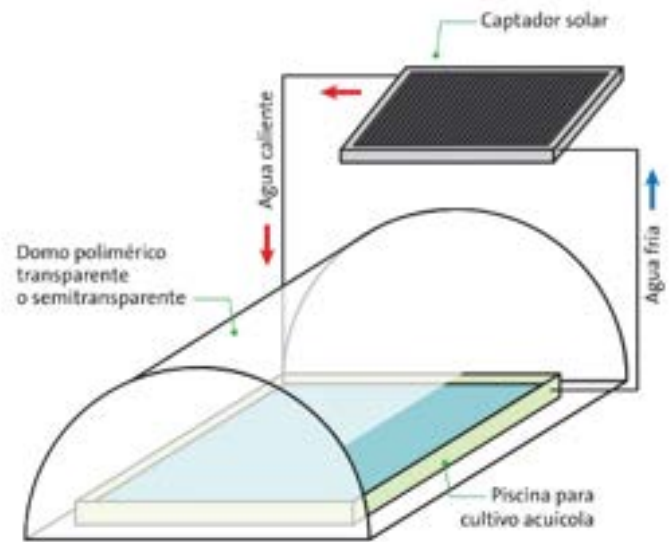
La acuicultura puede entenderse como la actividad que permite la producción de organismos acuáticos, ya sea animales o vegetales, cuya reproducción, crecimiento y desarrollo depende fundamentalmente del agua, medio en que pueden vivir parcial o totalmente. Se requieren sitios adecuados, con abastecimiento de agua suficiente (en cantidad y calidad), temperaturas óptimas, y por supuesto la nutrición adecuada y un plan de prevención de enfermedades, todo ello en función de la especie que se cultive.

De los anteriores requerimientos, el tema importante en esta sección reside en las temperaturas óptimas y la fuente energética requerida para lograrla y mantenerla.

Se sabe que el desarrollo de cultivos acuícolas es óptimo a temperaturas que van de los 15 °C a los 35 °C, es decir, entre 5 °C y hasta 25 °C superiores a las del medio ambiente, por lo que se requiere implementar medidas para mantener la temperatura óptima lo más constante posible, lo cual se puede lograr mediante protecciones reductoras de pérdidas de energía (y de evaporación), o mediante sistemas de calentamiento externos (convencionales o renovables), o, lo que es mejor aún, por la combinación de ellos.

En los sistemas acuícolas protegidos (figura 3.10), se gana energía proveniente de la radiación solar de manera directa mediante domos poliméricos transparentes o semitransparentes, y es posible aumentar esa ganancia con ayuda de sistemas de calentamiento solar de agua de recirculación de las tinas de cultivo, con lo que se puede reducir notablemente el consumo de la energía convencional. Estudios detallados muestran ahorros energéticos de hasta un 87 % para climas templados y hasta un 67 % para climas fríos [31] con el solo uso de una doble capa de polietileno (efecto invernadero). Dichos ahorros de energía serán mayores aún si se combina el sistema de efecto invernadero con uno de calentamiento solar del agua de recirculación, los que son directamente proporcionales al área de captadores usado.

**Figura 3.10 Diagrama de piscina para cultivo acuícola protegida con domos poliméricos, acondicionada con captador solar [27]**



## Criaderos

El aprovechamiento de la energía solar para calentar el agua destinada al procesamiento de los productos de criaderos de ganado ha crecido notablemente. Estudios recientes y profundos han mostrado la rentabilidad de calentadores solares de agua en el sector de sacrificio de animales de abasto y suministro de productos y subproductos cárnicos [33], en los que se requiere agua de proceso a temperaturas de hasta 90 °C, aunque en la mayoría de las etapas se requieren sólo 60 °C, principalmente en las de escaldado y depilado, evisceración, lavado de canales, así como en la limpieza diaria y periódica de mesas y espacios del establecimiento en general.

Un producto importante de criaderos de ganado es la leche, que requiere forzosamente procesos térmicos para su purificación (disminución o eliminación de la carga microbiana), conservación y comercialización. En particular, considerando que la temperatura de los procesos de la leche es inversamente proporcional al tiempo de aplicación, se requieren temperaturas de hasta 65°C para aniquilar el bacilo tubérculo, de hasta 75°C para eliminar la fosfatasa alcalina, de hasta 83°C para perder el 5 % de las proteínas del suero,

y de hasta 89°C para destruir la peroxidasa [34]. Asimismo, se requieren temperaturas [31] de 71 °C a 72 °C para la pasteurización de alta temperatura (HTST), y de 85 °C a 90 °C para la pasteurización relámpago (flash), de hasta 150 °C para leches esterilizadas y leches de ultra alta temperatura (UHT).

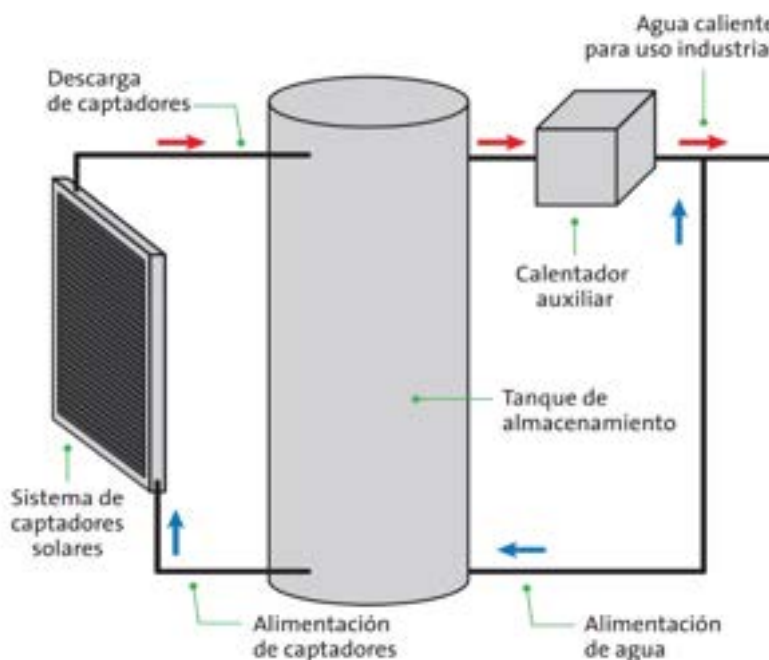
Respecto al procesamiento de productos cárnicos, la fabricación del jamón y otros productos incluyen, entre otras, una etapa de cocción en la que se requieren temperaturas de entre 60 °C y 70 °C [31]. Las aplicaciones industriales de referencia, asociadas al procesamiento de cárnicos provenientes de criaderos, requieren una fuente de energía térmica, que puede ser proporcionada principalmente por las tecnologías solares con almacenamiento descritas previamente (figura 3.11), acopladas a sistemas convencionales para suplir eventuales faltantes. Existen múltiples casos exitosos de este tipo de arreglo, como son los rastros y empresas de cárnicos donde se requieren gran cantidad de agua caliente para el proceso de limpieza y desinfección del lugar, y en el sector alimentario donde el sistema solar se utiliza para precalentar el agua que se utiliza en los diferentes procesos que se llevan a cabo.

## Acondicionamiento de biodigestores

Un biodigestor es un dispositivo que mediante la digestión anaeróbica microbiana transforma materia orgánica, ya sea de origen animal o vegetal, en biogás, que consiste en 40-70 % de metano ( $\text{CH}_4$ ), 30-60 % de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y pequeñas proporciones de otros gases, como hidrógeno ( $\text{H}_2$ ) y ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) principalmente. El biogás es un combustible mediante cuya combustión controlada es posible obtener energía térmica, energía eléctrica o, en el mejor de los casos, ambas (cogeneración), con lo que se eleva la eficiencia energética del sistema productor de energía.

La biodigestión de materia orgánica se desarrolla fundamentalmente en tres etapas: a) hidrólisis, que es la transformación de macromoléculas orgánicas (carbohidratos, lípidos y proteínas) en moléculas más sencillas (amilasa, lipasa o proteasa), mediante bacterias hidrolíticas; b) fermentación, que consiste en la transformación de los productos de la hidrólisis en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono por acidogénesis (bacterias acidogénicas), así como ácidos grasos que son transformados en los anteriores por

**Figura 3.11 Diagrama de un sistema de calentamiento solar con almacenamiento y calentador auxiliar para uso industrial [27]**



acetogénesis (bacterias acetogénicas), y c) metanogénesis, en la que principalmente el ácido acético (otras fuentes pueden ser el metanol y el ácido fórmico) se transforma en metano por la acción de las bacterias metanogénicas, obteniendo finalmente el biogás deseado.

En general, el desarrollo de la biodigestión en sus distintas etapas requiere el control de varios parámetros fisicoquímicos, principalmente la temperatura, el pH, la relación carbono/nitrógeno, así como los nutrientes y la toxicidad, entre otros. De estos parámetros, el adecuado control de la temperatura determina la eficiencia del biodigestor. Se reconocen tres grupos bacteriales metanogénicos, que se distinguen por el intervalo de temperatura de máxima actividad: psicrófilas (menores de 20°C), mesófilas (entre 20°C y 40°C) y termófilas (superior a 40°C y hasta cerca de 70°C); estas bacterias son muy sensibles a cambios bruscos de temperatura. La mayor parte de los biodigestores operan hoy día con las bacterias mesófilas o termófilas, casos en los que se requiere una fuente de energía externa para acondicionar el biodigestor y mantener la temperatura lo más constante posible en el punto de máxima actividad para aumentar la eficiencia en la producción de biogás.

Dado que la temperatura máxima requerida para el acondicionamiento de sistemas biodigestores es del orden de los 70 °C, ésta puede fácilmente ser suministrada por la energía solar, mediante tecnologías solares de baja temperatura, específicamente captadores planos. Cabe señalar que es indispensable contar con sistemas de almacenamiento de energía térmica para garantizar su disponibilidad durante las horas de ausencia del recurso solar. El fluido de trabajo recomendado para el circuito de calentamiento solar es el agua, por sus propiedades térmicas, su bajo costo, su alta disponibilidad y gran estabilidad química.

El acondicionamiento térmico solar de los sistemas de biodigestores representa una oportunidad inmejorable de producción de biogás, sobre todo en los lugares donde abunde la biomasa de origen animal o vegetal –que suele significar un problema hasta de orden sanitario para la

población– y, desde luego, niveles aceptables de energía solar. En el tema energético, el biogás es una fuente de energía de menores emisiones tóxicas que la quema directa de la biomasa, brinda la oportunidad de disponer del energético en lugares donde no estaba disponible; con él se puede proporcionar energía térmica hasta para generar electricidad, para algunos procesos industriales y semi industriales de productos agropecuarios, incluida la cocción de alimentos, entre otras muchas de sus posibles aplicaciones. La biodigestión de materia orgánica permite reciclar y valorar residuos; sus productos son esencialmente un energético, el biogás, y fertilizantes, los residuos líquidos y sólidos (llamado biol); con ello no sólo se evita contaminar el suelo y cuerpos de agua, sino que se nutre el propio suelo. Asimismo, se reconoce que el uso del biogás reducirá el consumo de leña, disminuyendo con ello la deforestación de carácter antropogénico. Otros beneficios pueden ser la disposición descentralizada de plantas de generación de energéticos, la reducción de problemas de salud e higiene, el ahorro en gastos médicos, en costo de combustible, en tiempo, y la posibilidad de generar otras actividades productivas derivadas del uso del biol, como insumo para la acuicultura, mejora de alimentos para ganado, etc.

Un ejemplo de la utilización de la energía solar térmica en biodigestores se encuentra en Costa Rica (ver <https://www.youtube.com/watch?v=5AtoXJlCPQ>)

### **Deshidratado de alimentos**

El agua es uno de los componentes más importantes de los alimentos, y para muchos de ellos, el más abundante. Además de su función estructural, el agua tiene gran influencia en las cualidades físicas, químicas y sensoriales; su control es de gran importancia en la preservación, pues debido a ella se pueden llevar a cabo reacciones químicas y enzimáticas. Podemos decir que el agua es la causante de la naturaleza perecedera de los alimentos. Conservar por un mayor tiempo la calidad de los alimentos y aumentar el tiempo de disponibilidad de los mismos ha dado origen a técnicas de preservación entre las que se encuentran el secado o deshidratado.

Deshidratar o secar un alimento consiste en disminuir su contenido de agua hasta un nivel seguro de humedad que permita garantizar condiciones adecuadas para su almacenamiento o para un proceso posterior.

El secado solar se refiere al uso de la radiación solar como fuente de energía para disminuir la cantidad de agua presente en un material; es una de las aplicaciones de la energía solar más antiguas. La exposición al sol de alimentos se realizaba como una técnica de preservación con la finalidad de mantener la disponibilidad de ciertos productos durante épocas con climas adversos o no aptos para el cultivo. Además de las aplicaciones en los alimentos, el secado solar fue, y sigue siendo, una técnica recurrente para disminuir la cantidad de agua en otros materiales, como ladrillos o bloques, pieles o telas.

El uso de la biomasa como fuente de calor permitió secar algunos materiales, como los de construcción, pero el deshidratado de alimentos continuó siendo a través de la exposición directa al sol; no es sino hasta el siglo XVIII cuando comenzó a desarrollarse la industria del deshidratado de alimentos.

El secado de alimentos presenta varias ventajas, entre ellas se encuentran:

- Prolonga el periodo de conservación (12 a 24 meses) sin aditivos, siempre y cuando la humedad ambiental lo permita.
- Posibilita el almacenamiento de productos a temperatura ambiente.
- Disminuye el peso y el volumen del producto, facilitando y reduciendo costos de empaque, almacenamiento y transporte.
- Facilita el uso del producto (leche en polvo, café soluble, etc.).
- Aumenta la compatibilidad con otros alimentos en mezclas secas.
- Reduce la producción de residuos.
- Hace posible la disponibilidad constante del producto a lo largo del periodo de conservación, a precios estables.

- En algunos casos mejora las propiedades organolépticas, como el sabor, el olor y la textura.
- Eleva el valor agregado.

Entre sus desventajas se encuentran:

- Modifica el sabor, olor, color y textura en algunos productos.
- Provoca pérdidas de nutrientes y, en general, de propiedades funcionales y medicinales, como vitaminas, clorofila, actividades antioxidantes, etc.
- Algunos métodos de deshidratación tienen costos relativamente altos.

Los secadores solares se clasifican en activos y pasivos, según la forma como se hace circular el aire dentro de la cabina de secado. En los sistemas activos se integran ventiladores con la finalidad de favorecer el arrastre de humedad, mientras que en los sistemas pasivos el aire circula de manera natural por fuerzas de empuje como resultado de diferencias de densidad por gradientes de temperatura del aire.



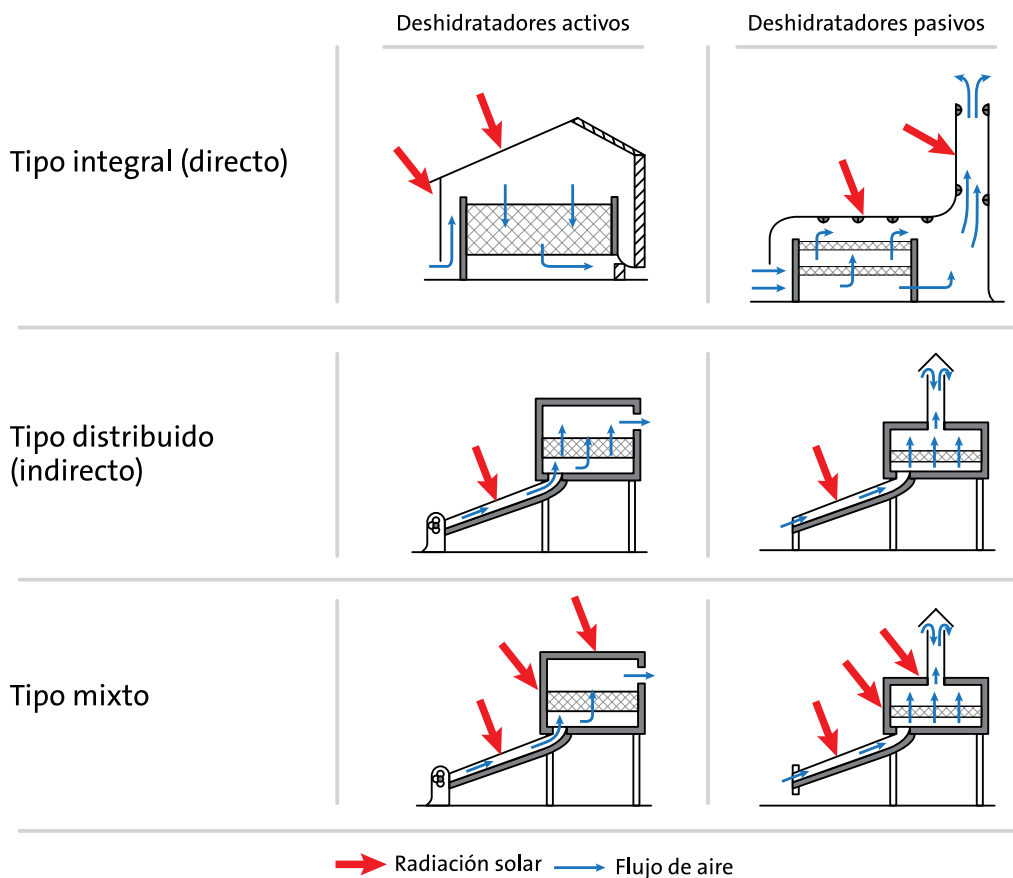
En los deshidratadores solares directos, parte de la radiación a la que se expone el producto es absorbida por el mismo, lo que causa incremento de su temperatura y la vaporización del agua contenida en el interior del alimento. La migración de la humedad del interior del material al medio circundante depende del fenómeno de difusión, y la difusividad másica (tasa de eliminación) está en función también de factores como forma, componentes estructurales y contenido de humedad. Cuando el alimento se expone de manera directa a la radiación solar otro de los factores que toma importancia es la absorbancia del producto. La mayor parte de los alimentos agrícolas, por su color y textura, tienen una alta absorbancia, lo cual favorecen la deshidratación.

Tanto los secadores pasivos como los activos se clasifican de acuerdo con la distribución de los componentes del dispositivo en: integrales,

distribuidos y mixtos. En los equipos integrales, el captador sirve también como cabina de secado. Los deshidratadores pasivos integrales se clasifican a su vez en tipo invernadero o de gabinete. En los deshidratadores distribuidos, el captador y la cabina de secado se encuentran separados. Por su parte, los equipos mixtos consisten en equipos combinados, es decir, el deshidratador puede absorber el calor directamente pero el proceso es mejorado al integrarse un captador solar (ver Figura 3.12).

Un caso exitoso de deshidratación solar de alimentos es la planta híbrida (solar-gas LP) instalada en Zacatecas, México con una capacidad de deshidratado de hasta 4 toneladas de alimento fresco (ver: [https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=3&v=wlgoQ-JTLlI](https://www.youtube.com/watch?time_continue=3&v=wlgoQ-JTLlI) ó [http://fordecyt.ier.unam.mx/html/termosolar\\_planta\\_deshidratadora\\_chile\\_2.html](http://fordecyt.ier.unam.mx/html/termosolar_planta_deshidratadora_chile_2.html)).

**Figura 3.12 Clasificación de deshidratadores solares [27]**



### 3.4 CRITERIOS DE DISEÑO DE UN SISTEMA Y SUS COMPONENTES

De acuerdo con el tipo de sistema a analizar, ya sea del sector residencial, servicios o industrial y del tipo de requerimiento de usuario final, existen diferentes criterios para el diseño de un sistema solar térmico para calentamiento de agua.

#### Sector residencial

Para el sector residencial en general se utilizan los sistemas termosifónicos para cubrir los requerimientos de agua caliente de la vivienda. Para poder escoger entre la variedad de equipos que se encuentran en el mercado de este tipo de sistemas (tanto de captadores planos como de tubos evacuados), se debe de intentar cuantificar las necesidades de agua caliente (litro de agua caliente diaria utilizada, horario de la demanda y su temperatura de uso).

Dado que es complicado establecer la cantidad de agua caliente que usa una persona al día, hay algunos criterios que se han considerado a nivel internacional. En el caso de México se estima que una persona usa 40 litros de agua caliente a 45°C cada día; en el caso de la unión europea

consideran 40 litros de agua caliente a 50°C; en el caso de Panamá se consideran 50 litros a 50°C. Dado lo anterior, los datos necesarios para poder realizar el cálculo de la demanda energética y con esto poder seleccionar el equipo a utilizar (que debe de contar con las curvas de rendimiento térmico que se mencionaron en el capítulo anterior para la norma UNE 12976), son los siguientes:

- Lugar donde se instalará el sistema. Para con esto tener la base de datos meteorológica de la ciudad.
- Temperatura del agua de la red municipal a lo largo del año.
- Número de habitantes de la casa (considerar 50 litros de diarios de consumo por persona a 50 °C, para el caso de Panamá).
- Tipo de extracción: número de personas que se bañan por la mañana y por la noche respectivamente.

Con los datos anteriores se puede calcular la energía diaria requerida para cada vivienda y en qué momento se utiliza. Los cálculos detallados se harán en la sección 3.5. Cálculo de la demanda y fracción solar.



## Sector servicios

### Agua caliente sanitaria

Para el caso del uso de agua caliente para este sector (hoteles, hospitales, centros deportivos, baños públicos, centros comerciales, etc.), dado que el consumo es en general bastante mayor que el sector residencial se utilizan sistemas de convección forzada con lo que hay que determinar el tipo y número de captadores a utilizarse, su arreglo y el tanque termo que se requiere.

Al igual que en los casos anteriores de debe de estimar lo mejor posible la cantidad de litros de agua caliente que se utilizan diariamente y su temperatura de uso.

Como en la mayoría de los casos, este tipo de registro no se tiene normalmente. Se recurre también a dar valores de consumo de agua caliente de acuerdo con el tipo de sector como la tabla 3.1 que se muestra a continuación.

**Tabla 3.1. Consumo diario de agua caliente por aplicación**

Fuente: Módulo Solar S.A de C.V

#### DEMANDA DE REFERENCIA AGUA CALIENTE A 50°C

Tipo de consumo	Litros por día	Unidad
<b>Hoteles</b>		
Gran turismo	100	Por persona
Hotel *****	75	Por persona
Hotel ****	60	Por persona
Hotel ***	50	Por persona
Hotel **	43	Por persona
Hotel *	35	Por persona
<b>Camping</b>		
Camping (Trailer park)	25	Por persona
Albergues	25	Por persona
<b>Hospitales</b>		
Hospitales y clínicas	55	Por persona
Hospitales y clínicas	240	Por cama
Ambulatorios y centro de salud	45	Por persona
Residencias o asilos	45	Por persona
<b>Otros</b>		
Centro penitenciario	35	Por persona
Cuarteles	35	Por persona
Vestuarios/duchas colectivas	25	Por persona
Clubes con alberca	45	Por persona
Gimnasios	25	Por persona
Restaurantes	10	Por persona
Restaurantes	4	Por comida
Cafeterías	2	Por persona
Oficinas	5	Por persona
Baños públicos	75	Por persona
Fábricas y talleres (Regaderas)	20	Por persona
Lavandería	5	Por kg de ropa

Dado lo anterior, los datos necesarios para poder realizar el cálculo de la demanda energética y con esto seleccionar en número de captadores solares a utilizar (que debe de contar con las curvas de rendimiento térmico que se mencionaron en el capítulo anterior para la norma ISO9806:2017), son los siguientes:

- Lugar donde se instalará el sistema. Para con esto tener la base de datos meteorológica de la ciudad.
- Temperatura del agua de la red municipal a lo largo del año.
- Volumen de agua caliente diaria (litros) necesaria y su temperatura.
- Tamaño del tanque termo a utilizar.

Con los datos anteriores se puede calcular la energía diaria requerida para este sector. Los cálculos detallados se harán en la sección 3.5. Cálculo de la demanda y fracción solar.

Como comparación, la norma española tiene los siguientes consumos de agua caliente diarios a 60°C en función de la categoría del hotel y el equipamiento de las habitaciones correspondientes.

### **Piscinas**

Para el caso de piscinas, para poder determinar la energía que se requiere dar a la alberca en cada día para tener la temperatura de confort que el usuario desea, los datos necesarios para poder realizar el cálculo de la demanda energética y con esto seleccionar en número de captadores solares a utilizar (que debe de contar con las curvas de rendimiento térmico que se mencionaron en el capítulo anterior para la norma ISO9806:2017), son los siguientes:

- Lugar donde se instalará el sistema. Para con esto tener la base de datos meteorológica de la ciudad.
- Tipo de alberca (al exterior o al interior).
- Área superficial y profundidad media.
- Temperatura requerida por el usuario.
- Utilización o no de cubierta flotante nocturna.
- Cuenta con equipo de respaldo y tipo (caldera o bomba de calor).

En el caso de piscinas para establecimientos recreativos (gimnasios, deportivo, hoteles, etc.) en general se cuenta con un equipo de respaldo (caldera o bomba de calor) que da las condiciones

**Tabla 3.2. Consumo diario de agua caliente para hoteles, norma española.**

Categoría del hotel Nº de estrellas	Equipamiento por habitación	Cantidad de agua en litros por habitación y día a 60 °C
1	Lavabo (ducha de pasillo)	50
2	Ducha + Lavabo	70
3	Baño + Lavabo	100
4	Baño + Lavabo	120
5	Baño + Lavabo	150



de confort al usuario por lo que el sistema solar lo que hace es dar un ahorro de energía equivalente a un cierto porcentaje de las necesidades (factor solar).

En el caso de piscinas para vivienda donde normalmente no se cuenta con un equipo de respaldo, se diseña el sistema solar para darle ciertas condiciones de confort al usuario final a lo largo del año o de los meses de uso de la misma. Con los datos anteriores se puede calcular la energía diaria requerida cada día en la piscina. Se mencionará brevemente como se realiza en la sección 3.5. Cálculo de la demanda y fracción solar.

### Sector industrial

Los requerimientos para poder calcular la demanda energética en este sector son iguales a los del sector servicios en el caso de que el agua caliente a utilizar sea desechada una vez utilizada. En el caso de procesos con ciclos cerrados de agua caliente, lo que cambiará es establecer la temperatura del agua del proceso a utilizar, la disminución de temperatura que sufre la misma en el proceso industrial a utilizar y el número de horas en que se lleva a cabo diariamente.

## 3.5 CÁLCULOS DE DEMANDA Y FRACCIÓN SOLAR

En esta sección se calculará la demanda energética para diferentes usos de agua caliente, al igual que la fracción solar que podemos obtener en una instalación.

Fracción solar es la cantidad de energía obtenida a través de la tecnología solar utilizada, dividido por el total de la energía requerida en un proceso o servicio. A continuación se presentan de forma general el cálculo de la demanda energética y obtención de la fracción solar para instalaciones solares en el sector residencia, servicios e industrial.

### Sector residencial

De acuerdo a los datos de entrada mencionados en la sección anterior y teniendo los datos de las curvas características del sistema solar termosifónico a utilizarse de acuerdo a la norma UNE12976 (ecuación 1.11 de la energía para el sistema solar y la ecuación 1.12 de las pérdidas térmicas en el tanque) o alguna norma equivalente.

El cálculo se debe realizar para un año típico teniendo las condiciones meteorológicas del lugar (datos de promedio diario para cada mes de las siguientes variables: temperatura ambiente, temperatura diurna, temperatura nocturna e irradiación solar en el plano de inclinación del captador).

Para el cálculo, se requiere hacer un ciclo que abarque todo el año (365 días). Se considera que en el día 1 la temperatura del agua de la red es igual a la temperatura inicial del sistema.

El calor acumulado, si es que existe, por el sistema solar se calcula como,

$$Q_{acum,solar} = m_{agua,solar} C_{p,agua} (T_{ini} - T_{red})$$

Para el día 1 este es igual a cero.

Para obtener la energía acumulada por el sistema solar se usa la ec. 1.11,

$$Q_{sol} = a_1 H + a_2 (T_{a,day} - T_{ini}) + a_3$$

Donde  $T_{a,day}$  es la temperatura ambiente promedia durante el día solar,  $T_{ini}$  es la temperatura inicial del sistema (al amanecer) y  $H$  es la irradiación promedio diaria en el plano del captador. Los coeficientes  $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$  se obtienen de forma experimental mediante la curva de rendimiento térmico diario del sistema termosifónico (ver sección 1.5.3). Para el día 1,  $T_{ini}$  es igual a la temperatura del agua de la red ( $T_{red}$ ).

La energía requerida por el usuario durante la noche se determina así,

$$Q_{req, noche} = m_{aguareq, noche} C_{p_{agua}} (T_{req} - T_{red})$$

Donde  $m_{aguareq, noche}$  es la masa de agua requerida por la noche que se puede determinar en función del número de usuarios que se duchan a esas horas, la  $T_{req}$  es la temperatura del agua requerida por el usuario y  $T_{red}$  es la temperatura del agua de la red municipal.

La energía que le queda al sistema solar después de la extracción nocturna sería,

$$Q_{fext, noche} = \max(0.0, (Q_{sol} + Q_{acum, sol} - Q_{req, noche}))$$

La temperatura en el sistema al final de la extracción nocturna nos queda,

$$T_{fext, noche} = T_{ini} + \frac{Q_{fext, noche}}{m_{agua, solar} C_{p_{agua}}}$$

Donde  $m_{agua, solar}$  es la masa de agua que tiene el sistema termosifónico.

Las pérdidas del sistema solar durante la noche se evalúan de acuerdo al coeficiente de pérdidas en el tanque (US) obtenido con la ecuación 1.12,

$$Q_{per, noc, solar} = m_{agua, solar} C_{p_{agua}} (T_{fext, noche} - T_{amb, noche}) \left(1 - \exp\left(-\frac{U_s \Delta t}{m_{agua, solar} C_{p_{agua}}}\right)\right)$$

La energía del sistema solar al final de la noche será,

$$Q_{final, noche} = \max(0.0, (Q_{fext, noche} - Q_{per, noc, solar}))$$

La energía requerida por el usuario al amanecer es,

$$Q_{req, amanece} = m_{aguareq, amanece} C_{p_{agua}} (T_{req} - T_{red})$$

La energía final del sistema después de la extracción al amanecer es,

$$Q_{fext, amanece} = \max(0.0, (Q_{final, noche} - Q_{req, amanece}))$$

Finalmente la temperatura final del sistema solar se determina como,

$$T_{fext, amanece} = T_{ini} + \frac{Q_{fext, amanece}}{m_{agua, solar} C_{p_{agua}}}$$

La temperatura final, se convierte en la inicial para el siguiente día. Este procedimiento se hace desde el día 1 hasta el 365.

La energía requerida por el usuario a lo largo del año (demanda energética anual) se determina como:

$$Q_{req} = \sum_{i=1}^{ndías} (Q_{req, noche} + Q_{req, amanece})$$

La energía entregada al usuario por el sistema solar se calcula como:

$$Q_{solar} = \sum_{i=1}^{ndías} (Q_{sol} + Q_{per, noc, solar})$$

Este cálculo se puede hacer para todo el año o por mes, para poder obtener la demanda energética mensual (que pudiera ser variable), así como la fracción solar entregada por el sistema también en cada mes (que varía por las variaciones climatológicas) o bien de forma anual, obtenida de la siguiente manera,

$$F_{solar} = \frac{Q_{solar}}{Q_{req}}$$

Hay que tener en cuenta que la fracción solar no puede ser mayor a 1, en el supuesto de que esto fuera se tomaría como 1 o 100% para cada mes del año.

**Ejercicio 1.** Calcular la energía por día requerida por el usuario, la entregada por el sistema solar termosifónico y el factor solar del sistema para el caso de una familia de 4 personas que consume 200 litros de agua caliente por persona a 50°C. 2 integrantes se bañan en la mañana y 2 en la noche. Tomar en cuenta los siguientes datos: la irradiación solar diaria es de 21 MJ/m<sup>2</sup> día, la temperatura ambiente diurna y nocturna del lugar es de 25 y 18°C respectivamente, el agua de la red se encuentra a 20°C y el sistema

solar termosifónico de 160 litros y 2 m<sup>2</sup> de área del captador, tiene los siguientes coeficientes obtenidos experimentalmente de acuerdo a la norma UNE12976) para su ecuación rendimiento térmico diurno (a<sub>1</sub>=0.96 m<sup>2</sup>, a<sub>2</sub>=0.47 MJ/K día, a<sub>3</sub>= -1.37 MJ/día) y un coeficiente de pérdidas U<sub>s</sub>=1.8 W/K registrada durante las 10 horas que dura la noche.

Requerimientos de energía del usuario para agua caliente:

$$Q_{req,noche} = m_{aguareq,noche} C_{p,agua} (T_{req} - T_{red}) = 100 \text{ kg } 4186 \text{ J/kg } ^\circ\text{C} (50-20) ^\circ\text{C} = 12.558 \text{ MJ}$$

$$Q_{req,amanece} = m_{aguareq,amanece} C_{p,agua} (T_{req} - T_{red}) = 12.558 \text{ MJ}$$

Energía requerida de agua caliente por día del usuario: **25.115 MJ/día**

La energía obtenida por el sistema solar termosifónico es:

$$Q_{sol} = a_1 H + a_2 (T_{a,day} - T_{ini}) + a_3 = 0.96 \text{ m}^2 \cdot 21 \text{ MJ/m}^2\text{día} + 0.47 \text{ MJ/}^\circ\text{C día} (25-20) ^\circ\text{C} - 1.37 \text{ MJ//día} = 20.16 \text{ MJ/día} + 2.35 \text{ MJ/día} - 1.37 \text{ MJ/día} = 21.14 \text{ MJ/día}$$

La energía almacenada en el sistema solar termosifónico después de la extracción nocturna, así como la temperatura promedio del agua dentro del mismo, son:

$$Q_{fext,noche} = \max(0.0, (Q_{sol} + Q_{acum,sol} - Q_{req,noche})) = 21.14 \text{ MJ} - 12.558 \text{ MJ} = 8.582 \text{ MJ}$$

$$T_{fext,noche} = T_{ini} + \frac{Q_{fext,noche}}{m_{agua,solar} C_{p,agua}} = 20 ^\circ\text{C} + (8.582 \text{ MJ} / (160 \text{ kg } 0.004186 \text{ MJ/kg } ^\circ\text{C})) = 31.81 ^\circ\text{C}$$

Las pérdidas del sistema solar termosifónico durante la noche son:

$$Q_{per,noc,solar} = m_{agua,solar} C_{p,agua} (T_{fext,noche} - T_{amb,noche}) \left(1 - \exp\left(-\frac{U_s \Delta t}{m_{agua,solar} C_{p,agua}}\right)\right) = 160 \text{ kg } 0.004186 \text{ MJ/kg } ^\circ\text{C} (31.81-18) ^\circ\text{C} (1 - \exp(-(1.8 \text{ W/K } 36000 \text{ s}) / (160 \text{ kg } 4186 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}))) = 9.249 \text{ MJ} (1 - 0.9078) = 0.853 \text{ MJ}$$

La energía del sistema solar al final de la noche será,

$$Q_{final,noche} = \max(0.0, (Q_{fext,noche} - Q_{per,noc,solar})) = 8.582 \text{ MJ} - 0.853 \text{ MJ} = 7.729 \text{ MJ}$$

La energía final del sistema después de la extracción al amanecer es,

$$Q_{fext,amanece} = \max(0.0, (Q_{final,noche} - Q_{req,amanece})) = \max(0, (7.729 \text{ MJ} - 12.558 \text{ MJ})) = 0 \text{ MJ},$$

lo que significa que el sistema entregó toda su energía y no cumplió con el 100% de los requerimientos necesarios de agua caliente. Por lo tanto, la energía entregada por el sistema solar termosifónico es:

$$Q_{solar} = (Q_{sol} - Q_{per,noc,solar}) = 21.14 \text{ MJ} - 0.853 \text{ MJ} = 20.287 \text{ MJ}$$

Y finalmente el factor solar aportado por el sistema es,

$$F_{solar} = \frac{Q_{solar}}{Q_{req}} = 20.287 \text{ MJ} / 25.115 \text{ MJ} = 0.8077 \text{ (ó } 80.77 \%)$$

Cabe resaltar que, si se requiere hacer una evaluación anual del sistema solar termosifónico para saber la energía que entrega y su factor solar para un caso determinado, es necesario hacer el procedimiento descrito en el ejercicio 1 para un día típico de cada mes del año. Esto debido a que las condiciones meteorológicas varían a lo largo del año y por lo tanto los resultados que se obtienen en este análisis van cambiando en función de ellas.

## Sector servicios

De acuerdo a los datos de entrada mencionados en la sección anterior y teniendo los datos de las curvas de rendimiento térmico del captador solar de acuerdo a la norma ISO9806:2017. Se procederá a realizar el cálculo del tamaño del sistema solar para con este determinar el factor solar para cada instalación en función de la demanda del usuario. El método a utilizar es el F-chart desarrollado por S.A. Klein y W.A. Beckman que se basa en una correlación obtenida de cientos de resultados de simulación con TRNSYS (que es un programa de simulación utilizado principalmente en los campos de la ingeniería de las energías renovables y la simulación de sistemas solares pasivos y activos. Es un paquete de software comercial desarrollado en la Universidad de Wisconsin. Uno de sus usos originales fue el de realizar la simulación dinámica del comportamiento de un sistema de agua caliente solar para un año típico meteorológicos a fin de que se pueda comprobar los ahorros de los costos a largo plazo de estos sistemas, [www.trnsys.com](http://www.trnsys.com)) para sistemas solares de calentamiento.

Se determina el factor de aporte mensual (y anual) a partir de los datos de rendimiento del captador, consumo requerido y de irradiación y temperatura ambiente mensual. Determinando de esta manera el área requerida para obtener una cierta fracción solar anual por el sistema.

La ecuación a utilizar del captador solar debe ser lineal y a diferencia de la obtenida con la ISO9806:2017 se debe poner en función de la temperatura de entrada al captador

$$\eta = F_R (\tau\alpha)_n - F_R U_L \frac{T_i - T_a}{I}$$

Donde  $T_i$  es la temperatura de entrada al captador solar,  $T_a$  la temperatura ambiente en el momento de utilizar el sistema e  $I$  es la irradiancia solar medida en el plano del colector, los dos términos restantes se obtienen experimentalmente con la norma ISO9806:2017. La configuración estándar del F-chart se base en la figura 3.13.

El factor de aporte mensual,  $f$ , es función de los adimensionales que depende de los parámetros X y Y.

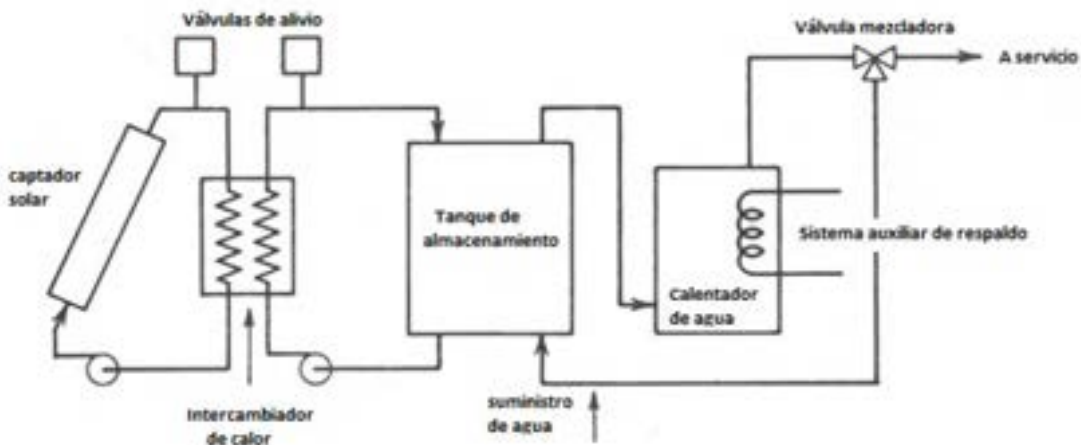
El parámetro X representa la relación entre el total de energía perdida por el sistema y la energía total demanda por el usuario

$$X = F_R U_L \frac{F_R}{F'_R} \frac{X_c}{X} (T_{ref} - T_a) \Delta t \frac{A_c}{Q_L}$$

El parámetro Y representa la relación entre la energía total absorbida por el sistema solar y la energía total demanda por el usuario

$$Y = F_R (\tau\alpha)_n \frac{F_R}{F'_R} \frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n} H N \frac{A_c}{Q_L}$$

Figura 3.13 Configuración estándar del F-chart [28]



Donde  $A_c$  es el área de los captadores (número de captadores x área de apertura de cada uno),  $Q_L$  es la carga térmica mensual requerida por el usuario,  $H$  es la irradiación media mensual normal al colector ( $J/m^2$ ),  $N$  el número de días en el mes,  $T_{ref} = 100^\circ C$ ,  $T_a$  = Temperatura ambiente diurna,  $\Delta t$ : Número total de segundos en el mes.

En caso de la existencia de un intercambiador (entre circuito primario y secundario). El siguiente factor corrige el desempeño del sistema en presencia de un intercambiador que causa que el sistema solar opere a una mayor temperatura que si no existiera este.

$$\frac{F'_R}{F_R} = \frac{1}{1 + \left( \frac{F_R U_c A_c}{(\dot{m}c)C} \right) \left( \frac{(\dot{m}c)C}{\varepsilon(\dot{m}c) \min} - 1 \right)}$$

En caso de ser un sistema directo el valor de esta relación es 1.

Otro factor corrector es debido al tamaño del tanque seleccionado para acumular el agua caliente, el método se diseñó tomando en cuenta una capacidad del tanque  $75 \text{ l/m}^2$ ; si su capacidad,  $CA$ , es diferente, corregimos con la siguiente ecuación que es válida para  $37.5 < CA < 300 \text{ l}$ .

$$\frac{X_c}{X} = \left( \frac{CA}{75} \right)^{-0.25}$$

Otro factor corrector es para tener en cuenta que la radiación incidente no es perpendicular al captador durante todo el año, se toma en cuenta este parámetro. Klein propone los siguientes valores para los meses de invierno.

$$\frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n} = \begin{cases} 0.94 & \text{cubierta} \\ 0.92 & \text{dos cubiertas} \end{cases}$$

Se puede obtener este valor mensual promedio también con el factor modificador del ángulo de incidencia obtenido en la ISO9806:2017.

Finalmente, el factor de aporte mensual se calcula con la siguiente ecuación,

$$f = 1.029 Y - 0.065 X - 0.245 Y^2 + 0.0018 X^2 + 0.0215 Y^3$$

Válida para  $0 < X < 18$  y  $0 < Y < 3$

El rango en que es válido el presente método se presenta en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2. Rango de validez del método**

**F-chart [28]**

$$\begin{aligned} 0.6 &\leq (\tau\alpha)_n \leq 0.9 \\ 5 &\leq F'_R A_c \leq 120 \text{ m}^2 \\ 2.1 &\leq U_L \leq 8.3 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C} \\ 30 &\leq \beta \leq 90^\circ \\ 83 &\leq (UA)_h \leq 667 \text{ W/}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

El factor solar anual se determina en función del factor solar mensual obtenido con este método de la siguiente manera,

$$F = \frac{\sum \overline{n} f_n \cdot Q_n}{\sum \overline{n} Q_n}$$

En este método se va incrementando el número de captadores a utilizarse hasta que este número de captadores nos dé un valor superior al factor solar anual que se desee.



Crédito: Termosolar UNEP · País: Panamá · Sector: Salud Pública · Tipo: Colector solar de placa plana.

**Ejemplo 2.** Un sistema solar directo (sin intercambiador de calor) ha sido diseñado para la Ciudad de Panamá. Usando un colector solar con la siguiente curva de eficiencia determinado de acuerdo al protocolo de la norma ISO9806:2017:

$$\eta = 0.74 - 4.0 \frac{T_i - T_a}{I}$$

La radiación en el mes de octubre promedio en el plano del colector es de 16.6 MJ/m<sup>2</sup> día y la temperatura ambiente promedio 20°C. Los requerimientos del usuario son de 10,000 litros de agua caliente diarios a 60°C y la temperatura del agua de la red son 20°C. El colector tiene una cubierta y se considera que el factor

$$\frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n} = 0.96$$

y la relación entre la capacidad actual del tanque y la capacidad estándar del fchart es de 2 ( $C_A/75 = 2$ ). Calcular el factor solar que se obtiene para este mes, si el área de captación solar es de 60 m<sup>2</sup>.

Requerimiento de energía mensual para agua caliente:

$$\begin{aligned} Q_{L,mes} &= m_{aguareq,dia} N C p_{agua} (T_{req} - T_{red}) \\ &= 10000 \text{ kg/día } 31 \text{ días/mes } 4186 \text{ J/kg } ^\circ\text{C} \\ &\quad (60-20) ^\circ\text{C} = 51.906 \text{ GJ} \end{aligned}$$

El parámetro X representa la relación entre el total de energía perdida por el sistema y la energía total demanda por el usuario,

$$\begin{aligned} X &= F_R U_L \frac{F_R}{F'_R} \frac{X_c}{X} (T_{ref} - T_a) \Delta t \frac{A_c}{Q_L} \\ &= (4 \text{ W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C } 1 (2)^{-0.25} (100-20) ^\circ\text{C } 86400 \text{ s } 31 \text{ días} \\ &\quad 60 \text{ m}^2) / 51.906 \text{ GJ} = 43.242 \text{ GJ} / 51.906 \text{ GJ} = 0.833 \end{aligned}$$

El parámetro Y representa la relación entre la energía total absorbida por el sistema solar y la energía total demanda por el usuario

$$\begin{aligned} Y &= F_R (\tau\alpha)_n \frac{F_R}{F'_R} \frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n} H N \frac{A_c}{Q_L} \\ &= (0.74 \ 1 \ 0.96 \ 16.6 \times 10^6 \text{ J/m}^2 \text{ día } 31 \text{ días } 60 \\ &\quad \text{m}^2) / 51.906 \text{ GJ} = 21.934 \text{ GJ} / 51.906 \text{ GJ} = 0.422 \end{aligned}$$

Finalmente, el factor de aporte mensual se calcula con la siguiente ecuación,

$$\begin{aligned} f &= 1.029 Y - 0.065 X - 0.245 Y^2 + 0.0018 X^2 + \\ &\quad 0.0215 Y^3 = 1.029 (0.422) - 0.065 (0.833) - 0.245 \\ &\quad (0.422)^2 + 0.0018 (0.833)^2 + 0.0215 (0.422)^3 \\ &= 0.3393 \end{aligned}$$

Por lo tanto, el factor solar para el mes de octubre sería de 33.93%.

Cabe resaltar que, si se requiere hacer una evaluación anual de este sistema para saber la energía que entrega y su factor solar, es necesario hacer el procedimiento descrito en el ejercicio 2 para cada mes del año. Esto debido a que las condiciones meteorológicas varían a lo largo del año y por lo tanto los resultados que se obtienen en este análisis van cambiando. El factor solar anual sería calculado en función de la suma de las aportaciones de energía del sistema solar en cada mes dividido entre el requerimiento anual de energía del usuario.

### Sector industrial

El cálculo de la demanda energética y el factor solar son iguales a los del sector servicios en el caso de que el agua caliente a utilizar sea desechada una vez utilizada.

En el caso de procesos con ciclos cerrados de agua caliente, lo que se tendrá que calcular es el carga térmica mensual requerida por el usuario con base a la disminución de la temperatura que sufre la misma en el proceso industrial a utilizar y el número de horas en que se lleva a cabo mensualmente y se puede aplicar el F-chart que ya se describió cambiando únicamente esta variable.

**Ejemplo 3.** Considere los mismos datos del ejercicio 2, pero aplicado al caso de un sistema en el sector industrial donde se tiene un ciclo cerrado que da energía a través de un intercambiador de calor al proceso industrial, el cual opera durante 8 horas al día con un flujo másico de 2.775 kg/s y una diferencia de temperatura entre la entrada y la salida del intercambiador de calor de 10°C.

Calcule el factor solar que da el sistema para el mes de octubre.

Requerimiento de energía mensual para agua caliente:

$$Q_{L,mes} = m_{aguareq,día} N C p_{agua} \Delta T_{req} = 2.775 \text{ kg/s} \\ 3600 \text{ s/h } 8 \text{ h/día } 31 \text{ días } 4186 \text{ J/kg } ^\circ\text{C } 10 \text{ } ^\circ\text{C} \\ = 103.71 \text{ GJ}$$

El parámetro X,

$$X = F_R U_L \frac{F_R}{F'_R} \frac{X_c}{X} (T_{ref} - T_a) \Delta t \frac{A_c}{Q_L} \\ = (4 \text{ W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C } 1 (2)^{0.25} (100-20) ^\circ\text{C } 86400 \text{ s } 31 \text{ días} \\ 60 \text{ m}^2) / 103.71 \text{ GJ} = 43.242 \text{ GJ} / 103.71 \text{ GJ} \\ = 0.417$$

El parámetro,

$$Y = F_R (\tau\alpha)_n \frac{F_R}{F'_R} \frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n} H N \frac{A_c}{Q_L} \\ = (0.74 \ 1 \ 0.96 \ 16.6 \times 10^6 \text{ J/m}^2 \text{ día } 31 \text{ días} \\ 60 \text{ m}^2) / 103.71 \text{ GJ} = 21.934 \text{ GJ} / 103.71 \text{ GJ} = 0.211$$

Finalmente, el factor de aporte mensual se calcula con la siguiente ecuación,

$$f = 1.029 Y - 0.065 X - 0.245 Y^2 + 0.0018 X^2 + \\ 0.0215 Y^3 = 1.029 (0.211) - 0.065 (0.417) - 0.245 \\ (0.211)^2 + 0.0018 (0.417)^2 + 0.0215 (0.211)^3 \\ = 0.1796$$

Por lo tanto, el factor solar para el mes de octubre sería de 17.96%.

Al igual que en el ejercicio 2, este cálculo se debe hacer para cada mes del año para obtener el aporte solar anual.

## Piscinas

En el caso de piscinas la demanda energética y el factor solar aportado o temperatura de la piscina a lo largo del año (dependiendo de si la piscina tiene o no tiene un sistema de respaldo) se obtendrán de acuerdo a los datos de entrada mencionados en la sección 3.4 criterios de diseño de un sistema y sus componentes. Para esto se tiene que tener adicionalmente un modelo matemático que contemple las pérdidas y ganancias de la piscina a lo largo del día y de la noche para diferentes condiciones ambientales y de operación. El modelo en términos generales se representa en la figura 3.14.

En dicho modelo lo que se tiene en cuenta son las ganancias (del sistemas solar y directas en la alberca) y pérdidas térmicas (del tipo conductivo, convectivo, radiativo y por reposición de agua) durante su operación. Esto utilizando el siguiente balance de energía,

$$V_p \rho_w C p_w \frac{dT_w}{dt} = Q_{gain} - Q_{losses}$$

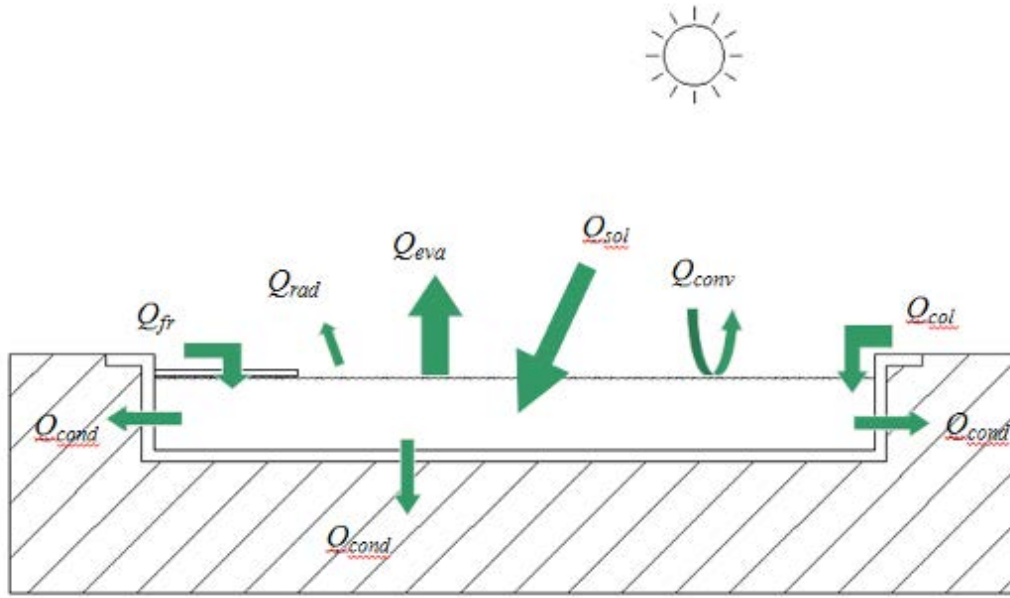
$$Q_{gain} = Q_{sol} + Q_{sol}$$

$$Q_{losses} = Q_{eva} + Q_{rad} + Q_{conv} + Q_{fr}$$



Crédito: Savosolar · País: Francia · Sector: Industrial (papel) · Tipo: Colector solar de placa plana.

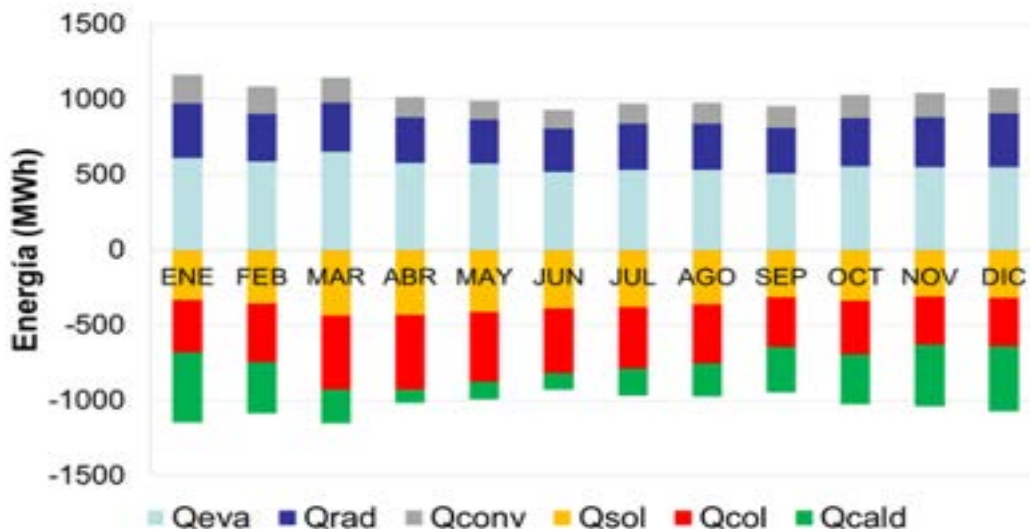
Figura 3.14 Modelo matemático de pérdidas y ganancias en una piscina.



El modelo anterior lo que nos permitirá es diseñar el tamaño del sistema de colectores para que se pueda reponer la energía perdida por la alberca a lo largo del año y poder obtener las temperaturas de confort deseadas. Una muestra de lo que se puede obtener en un análisis en cuanto a ganancias y pérdidas se muestra en la figura 3.15. Las barras por debajo de cero representan ganancias térmicas y por arriba de cero pérdidas en la alberca.

Como se puede corroborar, las pérdidas evaporativas son las más importantes en una alberca y las ganancias de energía por los rayos que llegan directamente a la alberca ( $Q_{sol}$ ) contribuyen también de forma importante en el balance de energía. Ambas barras deben ser iguales para tener un sistema en condiciones estables de funcionamiento y poder mantener una temperatura de confort de acuerdo a las necesidades del cliente final.

Figura 3.15 Ganancias y pérdidas térmicas en una piscina.





## CONCLUSIONES

Se explicó los principios de conversión térmica solar y las formas en que se pueden minimizar en los captadores solares las pérdidas conductivas, convectivas y radiativas con el ambiente.

Se abordó el funcionamiento típico de los sistemas solares termosifónicos utilizados en vivienda, los sistemas solares de calentamiento de agua para el sector servicios y el calentamiento del agua en piscinas (tanto domésticas como comerciales).

Se mencionaron y detallaron algunas otras aplicaciones industriales de los SCSA como son: en sistemas acuícolas, criaderos, biodigestores y el deshidratado de alimentos.

Han sido descritos los criterios para el diseño de SCSA en el sector residencial, servicio e industrial. Aunado al cálculo detallado de como calcular la demanda térmica y el factor solar para este tipo de sistemas. Se mencionó brevemente el caso de los criterios de diseño para el caso de piscinas y se da una corta explicación del modelo a utilizar para el cálculo de pérdidas y ganancias de energía en ellas.

## CUESTIONARIO CAPÍTULO 3

**1. ¿Cómo se disminuyen las pérdidas convectivas en un captador solar plano?**

- a) Con una cubierta transparente.
- b) Con aislamiento.
- c) Con una superficie selectiva.
- d) Con un material alta conductividad en el absorbedor.

**2. ¿Cuál es el sistema de CSA más utilizado en vivienda?**

- a) Sistemas solares autocontenidos.
- b) Sistemas solares termosifónicos.
- c) Sistemas solares en convección forzada.
- d) Sistemas solares de concentración.

**3. ¿Cuál es el sistema de CSA más utilizado en el sector servicios e industrial?**

- a) Sistemas solares autocontenidos.
- b) Sistemas solares termosifónicos.
- c) Sistemas solares en convección forzada.
- d) Sistemas solares de concentración.

**4. ¿Qué tipo de captadores son los más utilizados para el calentamiento de piscinas?**

- a) Captador solar de tubos evacuados.
- b) Captador solar plano.
- c) Captador solar autocontenido.
- d) Captador solar plano descubierto.

**5. Calcular la energía necesaria de agua caliente para calentar 1,000 litros de agua diarios a 50°C, si el agua de la red municipal está a 20°C**

- a) 62.79 MJ.
- b) 83.72 MJ.
- c) 125.58 MJ.
- d) 209.3 MJ.

**6. Calcular el factor solar del sistema para el caso de una familia de 4 personas que consume 160 litros de agua caliente por**

**persona a 45°C, los 4 integrantes se bañan en por la noche. Tomar en cuenta los siguientes datos: la irradiación solar diaria es de 18 MJ/m<sup>2</sup> día, la temperatura ambiente diurna y nocturna del lugar es de 25 y 18°C respectivamente, el agua de la red se encuentra a 15°C y el sistema solar termosifónico de 150 litros y 2 m<sup>2</sup> de área del captador, tiene los siguientes coeficientes obtenidos experimentalmente de acuerdo a la norma UNE12976) para su ecuación rendimiento térmico diurno ( $a_1=0.96$  m<sup>2</sup>,  $a_2=0.47$  MJ/K día,  $a_3=-1.37$  MJ/día) y un coeficiente de pérdidas  $U_s=1.8$  W/K registrada durante las 10 horas que dura la noche.**

- a) 79.2%.
- b) 100%.
- c) 88.3%.
- d) 65.3%.

**7. Un sistema solar directo (sin intercambiador de calor) ha sido diseñado para cierta ciudad. Usando un colector solar con la siguiente curva de eficiencia determinado de acuerdo al protocolo de la norma ISO9806:2017:**

$$\eta = 0.78 - 3.5 \frac{T_i - T_a}{I}$$

**La radiación en el mes de abril promedio en el plano del colector es de 19 MJ/m<sup>2</sup> día y la temperatura ambiente promedio 20°C. Los requerimientos del usuario son de 1,000 litros de agua caliente diarios a 50°C y la temperatura del agua de la red son 20°C. El colector tiene una cubierta y se considera que el factor**

$$\frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n} = 96$$

**y la relación entre la capacidad actual del tanque y la capacidad estándar del fchart es de 1 ( $C_A/75 = 1$ ). Calcular el factor solar que se obtiene para este mes, si el área de captación solar es de 8 m<sup>2</sup>.**

- a) 100%.
- b) 65.7%.
- c) 85.4%.
- d) 73.3%.

## CAPÍTULO 4 CONOCIMIENTO DE PRINCIPIOS BÁSICOS DE INSTALACIÓN Y MANTENIMIENTO



Crédito: Termosolar UNEP · País: Panamá · Sector: Salud Pública · Tipo: Colector solar de placa plana.

### 4.1 MONTAJE DE EQUIPOS Y COMPONENTES

Previo a iniciar los trabajos, se debe verificar la disponibilidad de los equipos de seguridad o protección personal para realizar los trabajos correspondientes. No está permitido realizar ningún trabajo en caso de que alguno de los equipos de seguridad (Tabla 4.1) o protección personal falte o esté en mal estado.

#### Verificación herramientas

El instalador debe tener un mínimo de herramientas básicas (Tabla 4.2) a su disposición para la realización de los trabajos.

#### 4.1.1 Interconexionado

El interconexionado es la forma en que se conectan los captadores solares dentro de una instalación termosolar para cubrir los requerimientos del usuario en cuanto a cantidad de agua y temperatura a utilizar.

La instalación de los colectores debe asegurar que el recorrido hidráulico sea el mismo para todos, de forma que se obtengan similares pérdidas de carga y en consecuencia, flujos similares en todos los captadores. De otra forma, los incrementos térmicos en los captadores serán diferentes, reduciéndose el rendimiento global. Para asegurar lo anterior se propone la utilización del retorno

**Tabla 4.1. Equipos de seguridad**

Nombre de equipo	Características que debe cumplir
<b>Botas de seguridad</b>	Refuerzo de zona delantera Suela anti resbalante Usar durante todo el tiempo de los trabajos
<b>Casco</b>	Zona de amarre o ajuste de posición Usar durante todo el tiempo de los trabajos
<b>Lentes de seguridad</b>	Protección frontal y lateral de los ojos Sistema ajustable o elástico Usar durante todo el tiempo de los trabajos
<b>Gautes</b>	Simples y que permitan manipular herramientas Tener otro modelo más resistente para otro tipo de trabajos Usar durante todo el tiempo de los trabajos
<b>Chaleco u otro reflectante</b>	Sin desgaste o rasgaduras Puede ser parte de la vestimenta Usar durante todo el tiempo de los trabajos
<b>Arnés para trabajo en altura</b>	Amarres en buen estado Con línea de vida con sistema de amortiguación Usar solo en trabajo en altura
<b>Equipo para espacio confinado</b>	Con protección facial total y respirador Usar solo en situaciones específicas



Crédito: Termosolar UNEP · País: Panamá · Sector: Salud Pública · Tipo: Colector solar de placa plana.

**Tabla 4.2. Herramientas de trabajo**

Tipo de herramienta
Juego de desarmadores
Pinzas mecánicas y de corte
Llave tipo "Steelson"
Juego de llaves
Matraca con dados
Arco con segueta
Taladro con brocas de diferentes diámetros
Martillo de cabeza metálica y de goma
Máquina de termofusión (por calor)
Tijera de corte de tubería PPR
Máquina de soldadura eléctrica
Pinza para sujetar tubería

invertido, de forma tal que la parte más corta del circuito primario corresponda a los tramos de la salida caliente de los captadores.

La longitud de las tuberías debe ser lo más reducida posible con el fin de disminuir las pérdidas hidráulicas y térmicas. Los captadores solares pueden conectarse entre ellos de tres formas: en paralelo, en serie o una combinación de ambas (serie-paralelo).

### **Interconexión en paralelo**

Este conexionado proporciona un funcionamiento similar en todos los colectores, proporciona buen rendimiento, pero incrementa el diámetro necesario, al ser el flujo total la suma de los flujos en todos los captadores. Con el conexionado en paralelo se pretende hacer circular el mismo caudal de fluido a través de cada captador. En general el conexionado en paralelo el caudal total de circulación es bastante elevado, se obtienen elevaciones moderadas de temperatura y la pérdida de carga en captadores corresponde exclusivamente a la de un captador. La interconexión en paralelo proporciona buen rendimiento, pero incrementa la longitud de tuberías y el diámetro necesario, al ser el flujo total la suma de los flujos en todos los captadores. Aumenta también el número de accesorios (codos, tes, etc.). Todo ello incrementa el costo de la instalación y del bombeo, la cantidad de fluido en el circuito y las pérdidas de calor.



Crédito: Termosolar UNEP · País: Panamá · Sector: Salud Pública · Tipo: Colector solar de placa plana.

En función de que los tubos distribuidores horizontales sean interiores o exteriores se diferencia entre dos posibles formas de conexión: el externo (Fig. 4.1) y el interno (Fig. 4.2).

En el conexionado paralelo externo (Fig. 4.1) se debe calcular los diámetros de las tuberías externas de alimentación y retorno para que se distribuya de manera uniforme el flujo en todos los captadores. En el conexionado paralelo interno (Fig. 4.2), no se usan tuberías exteriores, lo que disminuye considerablemente el costo de la instalación. Para un determinado caudal el número de captadores que se pueden conectar es función del diámetro de estos conductos distribuidores de los captadores a utilizar.

### Interconexión en serie

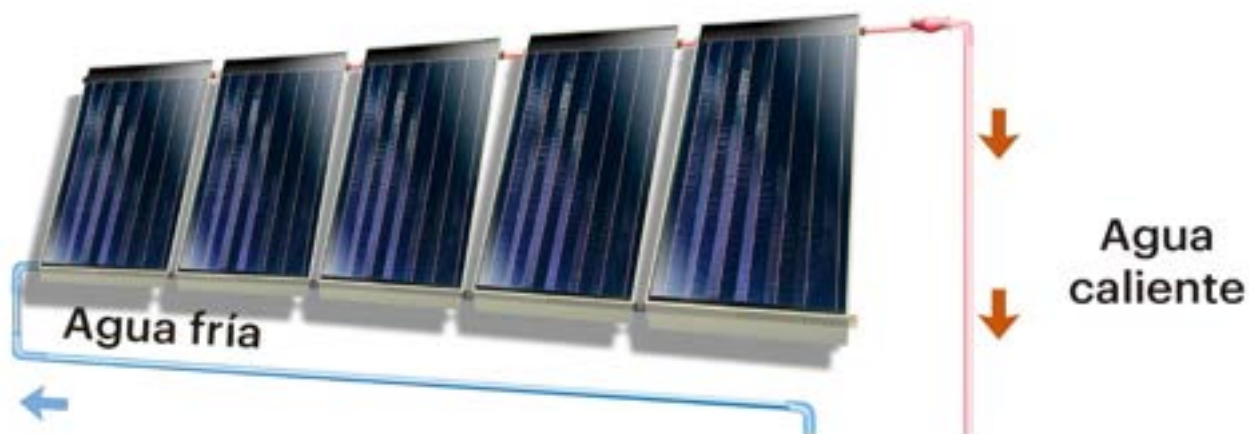
La conexión en serie permite menores flujos y secciones de tubería y recorridos más cortos. Esto reduce los costos de instalación y operación. Mediante este tipo de conexión el mismo fluido y caudal de circulación pasa a través de todos los captadores. Por tanto el caudal total coincide con el caudal que circula por cada uno de los captadores. Por lo que se obtienen aumentos de temperatura relativamente grandes.

El fluido se va calentando a medida que pasa a través de los captadores por lo que, de acuerdo a la curva de rendimiento de un captador, este va disminuyendo. En este tipo de conexión, la pérdida de carga corresponde a la suma de la

Figura 4.1 Conexión paralelo externo



Figura 4.2 Conexión paralelo interno



Cortesía Módulo Solar S.A de C.V

Figura 4.3 Conexión en serie



pérdida de carga de cada uno de los captadores conectados entre sí, por lo que se recomienda utilizar captadores con pequeña pérdida de carga, para minimizar este efecto. La pérdida de carga en este arreglo es superior a las del conexionado en paralelo. Si no se sobrepasa un número de 3 o 4 colectores en serie, las ventajas del sistema superan los inconvenientes.

#### Interconexión mixta (serie-paralelo)

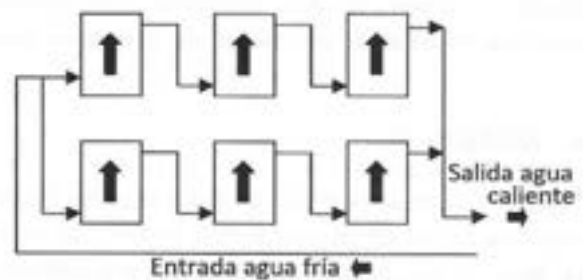
En las grandes instalaciones, es común emplear los dos tipos de conexionado, normalmente se conectan en paralelo entre sí y estos se conectan entre sí bien en serie o en paralelo.

En caso de arreglos de captadores que se conecten entre sí en paralelo los conductos de distribución horizontales se colocan en el exterior, por lo que aumentan significativamente el costo.

Si las baterías se conectan en serie entre sí, va disminuyendo el rendimiento de estas a medida que aumenta la temperatura de entrada a los mismos. Sin embargo, se necesita un menor trazado al exterior de tuberías para conectarlas entre sí que en el caso en paralelo.

En cuanto a las pérdidas térmicas, si bien la temperatura es mayor en el conexionado en serie, y por tanto será mayor la pérdida térmica por unidad de longitud, al ser de menor longitud el trazado de las tuberías en la conexión en serie, puede resultar que las pérdidas térmicas globales sean inferiores en comparación con el conexionado en paralelo.

Figura 4.4 Interconexión mixta (serie-paralelo)



#### Elementos de interconexión

Conexiones metálicas rígidas. Soportan bien las altas temperaturas, pero pueden crear problemas de dilataciones y alineamiento. Su utilización requiere considerar las fijaciones del captador que permitan los posibles movimientos producidos por dilataciones del conjunto del campo.

Fig. 4.5 Interconexión. a) metálicas rígidas, b) metálicas flexibles, c) mangueras flexibles.



**Conexiones metálicas flexibles.** Las conexiones metálicas flexibles no presentan problemas, pero su costo es elevado.

**Mangueras flexibles.** Estas conexiones eliminan los problemas de dilatación y alineamiento, pero hay que considerar los problemas derivados de la resistencia del material de la tubería a temperaturas elevadas y la calidad de las conexiones. Las mangueras para agua caliente con conexiones en los extremos disponibles en el mercado pueden proporcionar buenos resultados, pero debe darse especial atención a las juntas utilizadas.

### Soporte y fijación

Previamente al montaje de los colectores solares, deberá comprobarse que el apoyo de la estructura es apto para soportar las sobrecargas que el sistema de captación puede generar. Deben considerarse las cargas que puedan producirse durante el montaje y durante las operaciones de mantenimiento. La estructura soporte debe estar calculada y construida de forma que resista todos los esfuerzos los que pueda estar sometida (cargas estáticas y dinámicas).

En el diseño estructural se debe tomar en cuenta el ángulo de inclinación, su orientación y la facilidad de montaje y desmontaje, así como el acceso a los captadores. Las estructuras metálicas deben estar protegidas superficialmente para garantizar su durabilidad frente a las acciones ambientales. Se recomienda utilizar con precaución los perfiles tubulares huecos en los que es difícil vigilar los procesos de corrosión interna.

## 4.2 LECTURA DE PLANOS, INSTRUCCIONES Y MANUALES

El instalador debe revisar los planos de montaje, así como los esquemas de la instalación. Los planos de montaje deben incluir los siguientes detalles:

- Distribución del campo de colectores.
- Sistema de fijación de la estructura de soporte de los captadores.
- Ubicación del sistema de acumulación (termostanque).
- Sistema de fijación de la estructura de soporte del sistema de acumulación.
- Acometida de agua de red.
- Diámetro de tubería del sistema de distribución.
- Tipo de material de la tubería del sistema de distribución.
- Puntos de conexión entre distintos tipos de materiales de tubería.

Fig 4.6 Soportes de los colectores solares





- Detalle de interconexión en cuarto de máquinas.
- Detalle de conexión eléctrica del sistema de control.
- Detalle de conexión eléctrica del sistema de bombeo.

De la misma forma debe contar y verificar en su caso las instrucciones y manuales de los fabricantes de los diferentes equipos que va utilizar para asegurar que se instalen de acuerdo a las instrucciones que se indican para cada caso.

### 4.3 CRITERIOS PARA EL CORRECTO MONTAJE DEL SISTEMA HIDRÁULICO

La estructura de soporte de los ramales hidráulicos tiene por finalidad soportar la deformación horizontal que se presenta con el paso del agua caliente a través de la tubería. Por lo tanto, la clave de la instalación es la rigidez vertical. El elemento más común es el riel unicanal fijado directamente a la losa o a un bloque de obra civil. También pueden usarse como elementos de fijación para tubería:

- Abrazaderas de uña
- Abrazaderas omega
- Abrazaderas de pera con tirantes al techo
- Obra civil (pollos o durmientes).



Para instalar componentes hidráulicos, los cuidados que se deben tener son:

- No sobrecalentar en la termofusión.
- Proteger conexiones plásticas o material flamable al soldar con soplete.
- Limpiar antes y después de las uniones para evitar excedentes.
- Instalar tuercas unión en uniones roscadas

Se colocará una válvula eliminadora de aire (VEA) y válvula de alivio de presión (VAP) en el mismo lado de la alimentación de agua fría (ver Figura 4.6). La VEA con especificación de 180°C y la

**Figura 4.8 a) Válvula Liberadora de Aire y b) Válvula de Alivio de Presión**



**Figura 4.9 Válvula de drenaje o drenado**



VAP con set de 150 psi (1 MPa) y 210°F (99°C). El número y la posición se especificarán en proyecto. Válvula de drenaje. Se dejarán válvulas tipo esfera  $\frac{3}{4}$ " en cada banco de colectores para drenar el sistema cuando sea necesario, el número y ubicación será determinado en el proyecto. Válvulas corte. Se deberán colocar en la entrada y salida de cada colector (en cabezales) una válvula de corte para independizar la operación de cada banco de colectores, por mantenimiento y reparaciones.

La transición de materiales, deberán ser conectores macho-hembra. El material de mayor resistencia es el macho y el que recibe es el conector hembra. La línea de carga es la tubería que entrega el agua del termotanque a los colectores para que absorba

**Figura 4.10 Válvulas de corte por banco**



el calor al pasar a través de su absorbedor. La línea de carga del termotanque a los colectores suele tomarse de la parte inferior del termotanque para aprovechar la estratificación del agua caliente y se conecta con la parte inferior del colector.

La línea de descarga es la que sale del último banco de colectores y regresa el agua precalentada al termotanque. La línea de descarga de los colectores hacia el termotanque suele salir de la parte superior del colector y entregarse en la parte superior del termotanque.

Es muy importante cuidar los cambios de diámetro o los retornos inversos que el proyecto establezca en estos ramales.

De la misma forma y para aprovechar la estratificación en el tanque, el agua caliente al usuario se toma de la parte superior del tanque y el agua fría de la red municipal se inyecta al tanque en su parte baja.

#### **4.4 PRINCIPIOS DE OPERACIÓN**

Los captadores del sistema se instalan en las azoteas cuidando que no queden bajo sombras (y que no se sombreen entre sí) y que estén orientados hacia el Ecuador (nunca en sentido opuesto) con una inclinación igual a la latitud del lugar  $\pm 10^\circ$

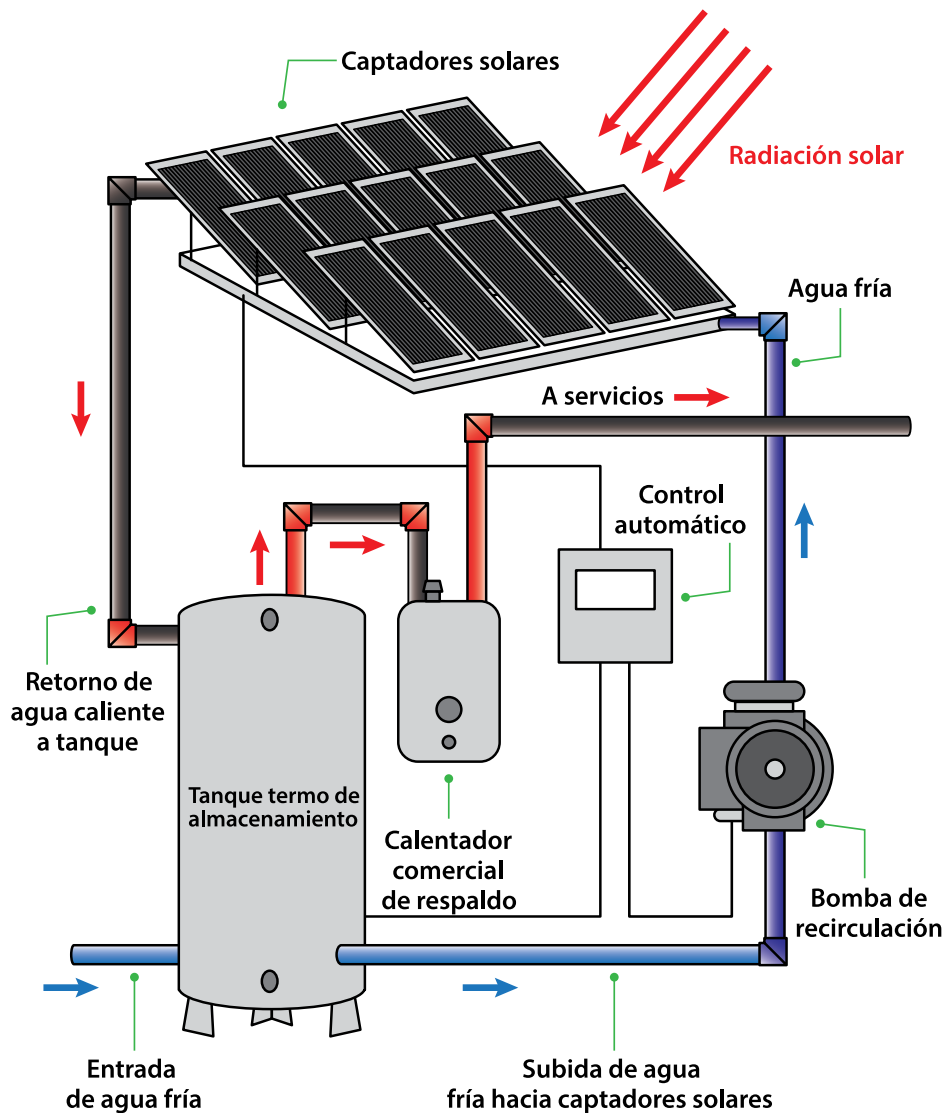
**Figura 4.11 Líneas de carga y descarga**



para lograr la mayor ganancia de energía a lo largo del año. En casos muy particulares, ya sea porque no hay área suficiente disponible en la azotea o bien esta no resiste el peso de los captadores, este sistema se podría instalar en el suelo, si existe área disponible. Se requiere un control automático de arranque y paro de la bomba para que el sistema pueda dar la mayor cantidad de energía de acuerdo con los requerimientos de volumen y temperatura de agua caliente. Estos sistemas tienen que ir conectados en serie a una caldera o calentador de gas de respaldo con el objetivo de que el usuario final disponga siempre de agua caliente para los requerimientos que se le puedan presentar (ver Figura 4.10). En estos sistemas es muy importante diseñar con

cuidado la red hidráulica para asegurar que el flujo de agua se reparte equitativamente entre todos los captadores, ya que en caso contrario se reduce por un lado la eficiencia del sistema y por el otro se corre el riesgo de que a causa del bajo flujo en algunas zonas se alcancen temperaturas de evaporación que aumenten la presión y hagan reventar las tuberías (adicionalmente como ya se comentó se instalan válvulas de seguridad o alivio para temperatura y presión). Debido a su tamaño y peso (superior en general a una tonelada), los termotanques de este tipo de sistemas se instalan generalmente en el piso dentro de un cuarto de máquinas donde también se encuentra la bomba y los calentadores de gas de respaldo o la caldera. Para este sector, el sistema solar se diseña para

**Fig 4.12 Instalación típica de un sistema solar de convección forzada para el sector comercial [35]**



#### 4.13 Instalación de sistema solar para sector servicios



Cortesía Módulo Solar S.A de C.V

que aporte un cierto porcentaje de la energía, el restante lo sigue aportando la caldera o calentador de gas de respaldo, en función de los requerimientos de agua caliente (cantidad de litros y temperatura deseada), verificando si estos consumos son más o menos constantes o presentan una estacionalidad marcada (como en el caso de los hoteles en temporadas vacacionales). Una muestra de este tipo de instalaciones aparece en la Fig. 4.13 a continuación.

### 4.5 TAREAS DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y CORRECTIVO

**Mantenimiento preventivo.** Las acciones aquí indicadas tienen el objetivo de mantener dentro de límites aceptables las condiciones de funcionamiento, prestaciones, protección y durabilidad de la instalación. Son tareas sencillas que permiten poder ser llevadas a cabo por el usuario.

Comprobar si existen fugas en el circuito hidráulico (1 vez al mes).

Observar si las pinturas o protecciones de los

diferentes elementos se encuentran en buen estado (1 vez cada 3 mes).

Revisar si la estructura se encuentra en buen estado (corrosión, deformaciones, etc.) y que los tornillos se encuentran correctamente ajustados (1 vez cada 3 mes).

Bajo condiciones de aguas duras se pueden crear depósitos de incrustaciones causando daños en las partes internas en casos extremos. Limpiar las partes internas nos asegurarán un correcto funcionamiento de las mismas, también puede ser necesario limpiar el asentamiento de la válvula y/o cambiar el termostato. En este caso se recomienda drenar el sistema una vez al año o con mayor o menos periodicidad dependiendo de la dureza del agua que se tenga.

**Mantenimiento Correctivo.** Existen otra serie de tareas de mantenimiento que deben realizarse por personal cualificado que conozca la tecnología solar térmica y las instalaciones mecánicas en general.

Revisión y cambio si procede del ánodo de

sacrificio (de magnesio) que se encuentra en los tanques de acero al carbón para disminuir los problemas de corrosión.

Revisión anual de la instalación.

La instalación tendrá un libro de mantenimiento en el que se reflejen todas las operaciones realizadas, así como el mantenimiento correctivo.

Las operaciones de mantenimiento que deben realizarse en las instalaciones de energía solar térmica para producción de agua caliente, su periodicidad y observaciones se reflejan en las siguientes tablas: sistema de captación (Tabla 4.3), sistema de acumulación (Tabla 4.4), circuito hidráulico (Tabla 4.5) y sistema eléctrico y control (Tabla 4.6).

**Tabla 4.3 Mantenimiento correctivo sistemas de captación**

Equipo	Frecuencia (meses)	Descripción
Captadores	6	* Diferencias sobre original * Diferencias entre captadores
Cristales	6	* Condensaciones, suciedad
Juntas	6	* Agrietamientos, deformaciones
Absorbedor	6	*Corrosión y deformaciones
Carcasa	6	*Deformación, oscilaciones, ventanas de respiración
Conexiones	6	*Aparición de fugas
Estructura	6	*Degradación, indicios de corrosión y apriete de tornillos

\*Inspección visual.

**Tabla 4.4 Mantenimiento correctivo sistemas de acumulación**

Equipo	Frecuencia (meses)	Descripción
Depósito	12	Presencia de lodos en el fondo
Ánodos de sacrificio	12	Comprobación del desgaste
Aislamiento	12	Comprobar que no hay humedad

**Tabla 4.5 Mantenimiento correctivo circuito hidráulico**

Equipo	Frecuencia (meses)	Descripción
Fluido refrigerante	12	Comprobar su densidad y pH
Estanqueidad	24	Efectuar prueba de presión
Aislamiento al exterior	6	*Degradación, protección de uniones y ausencia de humedad
Aislamiento al interior	12	*Uniones y ausencia de humedad
Purgador automático	12	Control de funcionamiento y limpieza
Purgador manual	6	Vaciar el aire del botellín
Bomba	12	Estanqueidad
Vaso de expansión	6	Comprobado de la presión
Sistema de llenado	6	Control de funcionamiento y actuación
Válvula de corte	12	Control de funcionamiento y actuaciones para evitar agarrotamiento
Válvula de seguridad	12	Control de funcionamiento y actuación

\*Inspección visual.

**Tabla 4.6 Mantenimiento correctivo sistema eléctrico y de control**

Equipo	Frecuencia (meses)	Descripción
Cuadro eléctrico	12	Comprobar que está siempre bien cerrado para que no entre polvo
Control diferencial	12	Control de funcionamiento y actuación
Verificación del sistema de medida	12	Control de funcionamiento y actuación

## CONCLUSIONES

El capítulo detalla los equipos de seguridad y herramental mínimo para poder realizar la instalación de un sistema solar de calentamiento de agua.

El interconexiónado puede existir entre los colectores solares dependiendo si lo que se requiere es una mayor cantidad de agua o una mayor temperatura. Con lo que su conexiónado puede ser en serie, paralelo o serie-paralelo. Se explican las ventajas y desventajas de cada uno de ellos y se detalla la importancia de utilizar para estas instalaciones un retorno invertido.

Un plano de instalación de este tipo de sistemas, debe incluir, los criterios para un correcto montaje del sistema hidráulico, donde se detallan las válvulas a utilizar y el conexiónado para un sistema de convección forzada.

Finalmente, se puntualizan las tareas de mantenimiento preventivo y correctivo de las instalaciones, así como la periodicidad con la que se deben de hacer.

## CUESTIONARIO CAPÍTULO 4

**1. ¿Con este interconexiónado se obtiene un mayor volumen de agua recirculando en la instalación?**

- a) Interconexiónado paralelo.
- b) Interconexiónado serie.
- c) Interconexiónado serie-paralelo.
- d) Retorno invertido.

**2. ¿Con este interconexiónado se obtiene una mayor temperatura del agua en la instalación?**

- a) Interconexiónado paralelo.
- b) Retorno invertido.
- c) Interconexiónado serie.
- d) Interconexiónado serie-paralelo.

**3. ¿Con este interconexiónado se obtiene una mayor caída de presión en el agua y la eficiencia de los captadores también se disminuye?**

- a) Interconexiónado paralelo.
- b) Interconexiónado serie.
- c) Interconexiónado serie-paralelo.
- d) Retorno invertido.

**4. ¿En qué parte del tanque se entrega la línea de agua caliente de salida del sistema de colectores solares?**

- a) En la parte inferior.
- b) Es indistinto.
- c) En la parte intermedia.
- d) En la parte superior.

**5. ¿En el hemisferio norte hacia dónde tienen que estar orientados los captadores solares?**

- a) Hacia el este.
- b) Hacia el oeste.
- c) Hacia el sur.
- d) Hacia el norte.

## CAPÍTULO 5 ANÁLISIS DE COSTOS Y AHORROS



### 5.1 COSTOS DE EQUIPOS, MONTAJE Y MANTENIMIENTO

Para realizar un análisis financiero de cualquier sistema, pero en particular de un sistema de CSA, es necesario conocer los costos de los equipos a utilizar, de la instalación de los mismos y de su mantenimiento a mediano y largo plazo. En cada uno de los análisis técnico- económicos que se desarrollarán en este capítulo se detalla la información que se requiere para cada sistema de CSA para poder evaluar el costo inicial del sistema.

### 5.2 ANÁLISIS FINANCIERO Y AMBIENTAL

En la sección 3.2 Cálculo de la demanda y factor solar se obtuvo por diferentes métodos la energía requerida por el usuario a lo largo de un año y la energía entregada para diferentes sistemas termosolares.

Una vez calculada la energía anual entregada por el sistema termosolar en cada uno de los casos ( $Q_{\text{solar}}$ ), este se debe pasar al equivalente de combustible que se requeriría para poder cubrir



esta energía entregada por el sistema solar. Para lo cual se requiere utilizar la siguiente fórmula:

$$\text{Combustible equivalente} = \frac{Q_{\text{solar}}}{\text{Eficiencia}_{\text{sistema de respaldo}} \cdot PC_{\text{combustible}}} \quad (5.1)$$

Donde **Eficiencia**<sub>sistema de respaldo</sub> es la eficiencia en las condiciones de uso del sistema de respaldo convencional que se utiliza (este sistema puede ser un boiler, una caldera, una bomba de calor, etc., normalmente traen una placa donde especifica su eficiencia instantánea a nivel del mar) y **PC**<sub>combustible</sub> es el poder calorífica del combustible utilizado en este sistemas de respaldo (gas LP, gas natural, diésel, electricidad, etc.)

Algunos valores que se pueden obtener del PCcombustible como ejemplo son:

$$\text{podercal, gas natural} = 41.338 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3 \text{ gas natural}}$$

$$\text{podercal, gas lp en México} = 47.92 \frac{\text{MJ}}{\text{kg gas lp}}$$

En el caso de la electricidad es solo convertir la energía entregada en J en kWh (3.6 MJ/kWh).

A partir de estos datos en esta sección se detallará como realizar el cálculo del análisis financiero y ambiental.

**Análisis ambiental.** Una vez obtenido la cantidad de combustible equivalente anual requerido para aportar la energía dada por el sistema solar, se puede calcular las emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> evitadas a la atmósfera de la siguiente manera:

$$CO_2 = \text{combustible equivalente} \cdot F_{\text{combustible-CO}_2} \quad (5.2)$$

Donde **F**<sub>combustible-CO<sub>2</sub></sub> es una constante que representa la cantidad de CO<sub>2</sub> emitida a la atmósfera por cada unidad de combustible utilizado. Un ejemplo de los valores que podemos encontrar son,

$$\text{Factor de emisión, gas natural} = 2.27 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{m}^3 \text{ gas natural}}$$

$$\text{Factor de emisión, gas lp, México} = 3.0 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{kg gas lp}}$$

En el caso de la electricidad en cada país y dependiendo como se produce la misma se tienen diferentes factores de emisiones por kWh, adicionalmente este valor puede variar año con año. En el caso de Panamá en un estudio del 2017, se tiene que son 0.191 tCO<sub>2</sub>e por megavatio-hora (MWh)

## Análisis financiero

**Ahorro monetario.** Una vez que se tiene el equivalente de combustible ahorrado anual (ec. 5.1), el ahorro anual en la moneda de cada país se determina como,

$$\$_{\text{ahorro}} = \text{combustible equivalente} \$_{\text{combustible}} \quad (5.3)$$

Donde **\$**<sub>combustible</sub> es el precio del combustible por unidad actualizado a la fecha del estudio (ej. USD/kg de gas lp, USD/m<sup>3</sup> gas natural, USD/kWh, etc.)

A continuación se describen parámetro que se utilizarán para el análisis económico del sistema termosolar.

**Valor Presente Neto (VPN).** Es la diferencia entre el valor presente de las entradas de efectivo y el valor presente de las salidas de efectivo a lo largo de un período de tiempo. El VPN se utiliza en el presupuesto de capital para analizar la rentabilidad de una inversión o proyecto proyectado.

$$VPN = -C_T + \sum_{n=1}^n \frac{A_{\text{anual},n}}{(1+I_{bm})^n} \quad (5.4)$$

Donde n es la vida útil que se le da al sistema, **C<sub>T</sub>** el costo inicial del sistema incluida su instalación, **I<sub>bm</sub>** es la tasa de inflación anual y **A<sub>anual,n</sub>** es el ahorro anual de dinero obtenido con el sistema.

Un valor actual neto positivo indica que las ganancias proyectadas generadas por un proyecto o inversión (en dólares u otra moneda actuales) exceden los costos anticipados (también en dólares actuales). En general, una inversión con un VPN positivo será rentable y una con un VPN negativo generará una pérdida neta.

**Tasa Interna de Retorno (TIR).** Es también una buena forma de juzgar la inversión. La TIR se usa para evaluar este parámetro teniendo en cuenta que  $NPV=0$  y obtener el valor  $I_{bm} = TIR$  que convierte a 0 el segundo miembro de la ecuación 5.4,

$$0 = -C_T + \sum_{n=1}^n \frac{A_{anual,n}}{(1+IRR)^n} \quad (5.5)$$

La TIR representa el % anual que daría de rendimiento tu inversión en caso de hacerla.

**Periodo de Retorno de la Inversión (PRI) en meses y/o años.** Es un indicador que mide en cuánto tiempo se recuperará el total de la inversión a valor presente. Puede revelarnos con precisión, en años, meses y días, la fecha en la cual será cubierta la inversión inicial, se usa la siguiente fórmula:

$$PRI = a + \frac{(b-c)}{d} \quad (5.6)$$

Donde **a** es el año inmediato anterior en que se recupera la inversión, **b** es la inversión inicial, **c** es el flujo de efectivo acumulado del año inmediato anterior en el que se recupera la inversión y **d** es el flujo de efectivo del año en el que se recupera la inversión.

**Ejercicio 1.** Calcular el periodo de retorno de la inversión para un sistema solar cuyo costo total es de 2,000 USD y genera unos ahorros en el primer año de 700 USD, en el segundo de 800 USD, en el tercero de 900 USD y en el cuarto de 1000 USD.

	Inicio	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4
Flujo de caja (USD)	-2000	700	800	900	1000
Flujo acumulado (USD)	-2000	-1300	-500	400	1400

$$PRI = 2 + (|-500|/900) = 2.55 \text{ años}$$

## 5.2.1 Análisis Técnico-Económico de Sistemas Termosifónicos en Vivienda

Para poder determinar el análisis económico de un sistema termosifónico para vivienda es necesario determinar los criterios de diseño de un sistema y sus componentes (mencionados en la sección 3.4) así como determinar la demanda energética y el factor solar que nos puede dar un determinado sistema termosifónico seleccionado, mismo que debe contar con las curvas características obtenidos mediante la norma UNE 12976.

El factor solar determinará para esta familia el porcentaje de aportación del sistema solar con respecto al consumo total de agua caliente de la vivienda, en cada mes y el promedio anual. En caso de que este factor solar sea bajo (< 50%) se puede optar por un sistema más grande que exista en el mercado o en su caso se puede considerar la instalación de 2 sistemas termosifónicos en paralelo, realizando el mismo procedimiento ya mencionado pero considerando el doble el aporte de energía del sistema solar.

Una vez determinado el sistema solar y su aporte energético anual, se determina el equivalente en combustible que se usaría para generar la aportación del sistema solar, las emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas a la atmósfera, el ahorro monetario del sistema. Con estos datos y teniendo en cuenta el costo del sistema termosifónico instalado (que incluye el costo del sistema + instalación), el costo

del combustible actualizado, la tasa de inflación del combustible anual se procede a determinar el análisis financiero mediante el VPN, TIR y PRI tomando en cuenta la vida útil del sistema y de acuerdo a las ecuaciones mencionadas en la sección 5.2.

### **5.2.2 Análisis Técnico-Económico de Sistemas de calentamiento de Agua en Convección Forzada (F-chart)**

Para poder determinar el análisis económico de un sistema en convección forzada para calentamiento de agua es necesario determinar los criterios de diseño de un sistema y sus componentes (mencionados en la sección 3.4) así como determinar la demanda energética y seleccionar un factor solar deseado. Con lo anterior se obtiene el número de captadores solares necesarios (mediante el método del fchart) para obtener el factor solar deseado. Los captadores solares deben de tener la información de su curva de eficiencia instantánea obtenida mediante la norma internacional ISO9806:2017.

Una vez determinado el tamaño del sistema solar y su aporte energético anual, se determina el equivalente en combustible que se usaría para generar la aportación del sistema solar, las emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas a la atmósfera, el ahorro monetario del sistema. Con estos datos y teniendo en cuenta el costo del sistema termosolar en convección forzada instalado (que incluye el costo de los captadores + costo del tanque termo + costo de controles + costo de

bombas + instalación), el costo del combustible actualizado, la tasa de inflación del combustible anual se procede a determinar el análisis financiero mediante el VPN, TIR y PRI tomando en cuenta la vida útil del sistema y de acuerdo a las ecuaciones mencionadas en la sección 5.2.

Mediante un proceso iterativo se puede realizar una serie de análisis para diferentes factores solares seleccionados de cara a obtener un valor óptimo desde el punto de vista del análisis económico.

### **5.2.3 Análisis Técnico-Económico de Sistemas de Calentamiento de Agua en Convección Forzada para Piscinas**

Para poder determinar el análisis económico de un sistema en convección forzada para una piscina es necesario determinar los criterios de diseño de un sistema y sus componentes (mencionados en la sección 3.4) así como determinar la demanda energética con el modelo matemático de pérdidas y ganancias de una piscina y seleccionar un factor solar deseado en conjunto con una temperatura de confort esperada por el usuario en los meses de uso de la misma. Con lo anterior se obtiene el número de captadores solares necesarios para cumplir con estas condiciones. Los captadores solares deben de tener la información de su curva de eficiencia instantánea obtenida mediante la norma internacional ISO9806:2017.

Una vez determinado el tamaño del sistema solar y su aporte energético anual, se determina el equivalente en combustible que se usaría



para generar la aportación del sistema solar, las emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas a la atmósfera, el ahorro monetario del sistema. Con estos datos y teniendo en cuenta el costo del sistema termosolar en convección forzada instalado (que incluye el costo de los captadores + costo de controles + costo de bombas + instalación), el costo del combustible actualizado, la tasa de inflación del combustible anual se procede a determinar el análisis financiero mediante el VPN, TIR y PRI tomando en cuenta la vida útil del sistema y de acuerdo a las ecuaciones mencionadas en la sección 5.2.

### 5.3 HERRAMIENTAS DE FINANCIACIÓN (PRÉSTAMO, ESCO)

Las ESCOs son Empresas de Servicios Energéticos que diseñan, desarrollan, instalan y financian proyectos de eficiencia energética, cogeneración y aprovechamiento de energías renovables (solar, eólica, etc.) con el objeto de reducir costos operativos y de mantenimiento y mejorar la calidad de servicio del cliente. Asumen los riesgos técnicos y económicos asociados con el proyecto. Típicamente los servicios ofrecidos por estas empresas son:

- a) Desarrollo, diseño y financiamiento de proyectos.
- b) Instalación y mantenimiento del equipo eficiente.
- c) medición, monitoreo y verificación de los ahorros generados por el proyecto.
- d) Asumir los riesgos del proyecto.

El esquema ESCO permite que los consumidores de energía continúen enfocando sus recursos a su actividad principal, mientras que la ESCO se encarga de la modernización de los equipos e instalaciones, mediante la integración de proyectos con ahorros energéticos y económicos garantizados. La figura central para el desarrollo de estos proyectos es el contrato de desempeño, que especifica las condiciones en las que se desarrollará el proyecto, con el objetivo de brindar certidumbre a ambas partes.

Protocolo de medición y verificación: la cuantificación correcta de estos ahorros, y su aceptación por parte de la ESCO y el cliente, es una de las actividades más importantes a desarrollar durante el proyecto. Sin embargo, la existencia de factores que inciden en esta estimación y la hacen debatible, hace necesario contar con una metodología, aceptada por ambas partes desde antes del inicio del proyecto, para la medición y verificación de los ahorros.

Existen ya un número importante de metodologías de medición y verificación desarrolladas por diversos organismos, siendo la más conocida el Protocolo Internacional de Medición y Verificación, desarrollado en Octubre de 2000 por un conjunto de instituciones de diversos países, bajo los auspicios de la Oficina de Eficiencia Energética y Energías Renovables del Departamento de Energía de los Estados Unidos. Sin embargo, y en vista de la gran diversidad de características de las empresas (tanto ESCOs como usuarios de energía), las tecnologías y su uso, es necesario diseñar especificaciones de Medición y Verificación adecuadas para cada caso. La Medición y Verificación de los ahorros energéticos es una actividad de gran trascendencia en el desarrollo de los proyectos y puede representar una fracción importante de los costos de operación, por lo que su diseño deberá ser tomado con la mayor seriedad.

Outsourcing: este esquema consiste en la contratación, por parte del usuario de energía, de un servicio específico cuya provisión recaerá en la ESCO. Este servicio puede consistir en proporcionar energía (agua caliente) u operar un proceso (calentamiento de agua, calefacción, etc.). Estos contratos son, generalmente, de largo plazo, y la ESCO es dueña de los equipos y sistemas, a pesar de que pueden estar localizados dentro de la propiedad del usuario de energía. En los proyectos de Outsourcing la empresa que proporciona el servicio, en este caso la ESCO, se encarga de operación y mantenimiento de los equipos y sistemas, y el cliente recibe el servicio de acuerdo con las condiciones especificadas en el contrato. Eventualmente, el contrato puede incluir la opción de compra - venta.

## CONCLUSIONES

Este capítulo muestra fórmulas para hacer el análisis económico y ambiental de un SCSA, dando los valores del poder calorífico del gas LP y el gas natural, así como su factor de emisiones de CO<sub>2</sub> al ambiente.

Se detalla la obtención del ahorro monetario del sistema y las fórmulas para, dado este ahorro y teniendo en cuenta el costo inicial del sistema, obtener los parámetros financieros siguientes: valor presente neto, tasa interna de retorno y el periodo de retorno de inversión. Se narra cómo obtener estos datos financieros para SCSA en vivienda, en sistemas de convección forzada y en piscinas.

Finalmente, se mencionan algunas herramientas de financiación como son los préstamos o las ESCOs.

## CUESTIONARIO CAPÍTULO 5

**1. Calcular los kg de gas LP equivalentes a una energía de 100 MJ, si se considera que el poder calorífico del gas LP es de 48 MJ/kg gas LP y la eficiencia del calentador de gas es del 85%.**

- a) 2.45 kg de gas LP.
- b) 2.08 kg de gas LP.
- c) 0.41 kg de gas LP.
- d) 1.27 kg de gas LP.

**2. Calcular las emisiones de CO<sub>2</sub> producidas por un calentador eléctrico que calienta agua y aporta una energía de 1500 MJ mensuales y que tiene una eficiencia del 95%, sabiendo que las emisiones en Panamá eléctricas son de 0.191 tCO<sub>2</sub>e por MWh.**

- a) 75.60 kg de CO<sub>2</sub>
- b) 125.45 kg de CO<sub>2</sub>
- c) 79.58 kg de CO<sub>2</sub>
- d) 53.89 kg de CO<sub>2</sub>

**3. Calcular el valor presente neto de una inversión en un SCSA con un costo inicial de 8,000 dólares, de los que se obtendrán en un periodo de 3 años los siguientes ahorros anuales: 3,000, 4,000 y 5,000 dólares.**


- a) 6,683 dólares.
- b) 3,258 dólares.
- c) 11,250 dólares.
- d) 8,358 dólares.

**4. Calcular la tasa interna de retorno que nos ofrece un sistema solar que cuesta llave en mano 5.000 dólares y nos prometen que ahorraremos en gas LP 2.000 dólares el primer año y 4.000 dólares el segundo año.**

- a) 32%.
- b) 6%.
- c) 24%.
- d) 12%.

**5. Calcular el periodo de retorno de la inversión para un sistema solar cuyo costo total es de 10,000 USD y genera unos ahorros en el primer año de 3500 USD, en el segundo de 4000 USD, en el tercero de 4500 USD y en el cuarto de 5000 USD.**

- a) 2.45 años.
- b) 2.25 años.
- c) 2.75 años.
- d) 2.55 años.



## **CAPÍTULO 6** **MEDIDAS RELACIONADAS CON** **EDIFICIOS VERDES Y SUS MECANISMOS** **DE EVALUACIÓN**

### **6.1 MODERNIZACIÓN EFICIENTE CON CSA**

Una parte muy importante de energía (en el caso de Europa 1/3) es fruto del uso de agua caliente sanitaria y calefacción en los edificios. Por lo que uso de energías renovables en este sector puede suponer un ahorro importante y una forma de ralentizar el cambio climático.

La energía solar térmica puede ser utilizada en cualquier edificio que se necesite una calefacción de baja intensidad: para agua caliente sanitaria, para contribuir a la producción de calefacción y para generar sistemas térmicos climatizados.

En apartamentos se usan en su mayoría para proporcionar agua caliente sanitaria. En edificios públicos como instalaciones deportivas, las residencias para ancianos y las piscinas suelen ser apropiados para la energía solar térmica, pues necesitan grandes cantidades de agua caliente. Uno de los sectores idóneos son los hoteles por la gran cantidad de agua caliente que pueden usar en habitaciones, lavandería y restaurantes.

Una lección importante que se desprende de la experiencia, es que el diseño de grandes sistemas solares térmicos no puede estandarizarse. Cada sistema debe ser desarrollado individualmente teniendo en cuenta circunstancias y las necesidades del usuario, una tarea y un desafío para todos los arquitectos e ingenieros que participan.

Aun cuando es más sencillo y puede ser más barato diseñar nuevos edificios que cuenten con este tipo de sistemas, su uso en edificios existentes se puede realizar haciendo un diseño óptimo en la instalación del campo de captadores, tanques de almacenamiento y en la subida y bajada de tuberías en la edificación.

### **6.2 GUÍA DE CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE PARA EL AHORRO DE ENERGÍA EN EDIFICACIONES**

Publicada en la gaceta oficial de Panamá el 24 de noviembre de 2016. Aprobada con la resolución No. 3142 del 17 de noviembre de 2016. El objetivo de la Guía es proporcionar una herramienta

para la implementación de estrategias de construcción sostenible para ser aplicadas en los Municipios de todo el país. La guía pretende promover eficiencia energética durante el uso de las edificaciones. Se entiende por construcción sostenible el conjunto de medidas pasivas y activas, en diseño y construcción de edificaciones, que permiten alcanzar los porcentajes mínimos de ahorro de energía señalados en la presente resolución, encaminadas al mejoramiento de la calidad de vida de sus habitantes y al ejercicio de actuaciones con responsabilidad ambiental y social.

Dentro de las medidas de eficiencia energética activa se encuentra el Agua Caliente Solar con sistemas diseñados para dar agua caliente casi todo el año usando ganancias solares como fuente combustible.

Las medidas fueron clasificadas según su potencial de ahorro de energía, su costo de implementación, el periodo de retorno de la inversión, la disponibilidad en el mercado y la facilidad de inclusión. El resultado es una herramienta de toma de decisiones denominada Matriz de Implementación, la cual correlaciona cada medida y el tipo de edificación. La Matriz de Implementación contiene las medidas recomendadas para lograr los porcentajes de ahorro en energía dispuestos en la Resolución. Las medidas se encuentran diferenciadas según el tipo de edificación.

Las medidas recomendadas son aquellas que cumplen los siguientes criterios: el potencial de ahorro de energía de al menos 5%, que no costarán más del 5% del total del costo de la edificación y que los costos fueran recuperados en menos de 5 años. En la Matriz de Implementación, las medidas se clasifican según su eficacia de la siguiente manera:

- **Altamente recomendable:** Estas son medidas que deben ser incluidas en la guía de construcción sostenible y que tienen un efecto mínimo en los

costos de construcción. Su potencial en ahorro de energía es más del 5% mientras el impacto en el costo es menor al 1% del costo total de la edificación con una recuperación del costo en menos de 3 años. Esto significa que las medidas proveerán máximos ahorros con mínimos impactos en el costo.

- **Moderadamente recomendable:** Muchas de estas medidas pueden ser más costosas de lo que pueden pagar muchos de los dueños de las edificaciones. El potencial de ahorro de recursos está entre el 3% y el 5% con un impacto en el costo entre el 1% y el 5% y una recuperación del costo entre 3 y 5 años.

- **Poco / No recomendable:** Estas son medidas que no tienen un gran impacto en el ahorro de energía y es mejor dejarlas por fuera del alcance de la guía. El potencial de ahorro de recursos es menor al 3% con un impacto en el costo mayor al 5% y una recuperación del costo en un periodo mayor a 5 años.

Entre las medidas recomendables para hoteles y hospitales está el agua caliente solar no así en vivienda.

Dentro del agua caliente solar se encuentran los sistemas ya descritos dentro de este manual (termosifónicos y de convección forzada). Entre los beneficios que se menciona que el uso de sistemas de agua caliente solar puede alcanzar ahorros importantes de energía, entre 5.4% para edificios de salud, 16.4% para vivienda y hasta 19.4% para hoteles. Esta medida es recomendable para viviendas, hoteles y edificios de salud; 50% de los requerimientos de agua caliente para estos tipos de edificaciones deben ser cumplidos por los calentadores solares de agua.

En la Figura 6.1. se muestra el consumo de energía de la línea base, y el consumo de energía exigible (índice línea de la base -15% de ahorro) para cada tipo de edificación dentro del primer año de implementación de esta guía.

Fig 6.1 Energía de la línea base y consumo de energía exigible en el primer año

	LÍNEA DE BASE	CON UN AHORRO DE 15%
 VIVIENDA	80 kWh/m <sup>2</sup> por año	68 kWh/m <sup>2</sup> por año
 OFICINA	202 kWh/m <sup>2</sup> por año	172 kWh/m <sup>2</sup> por año
 HOTEL	172 kWh/m <sup>2</sup> por año	146 kWh/m <sup>2</sup> por año
 COMERCIAL	290 kWh/m <sup>2</sup> por año	246 kWh/m <sup>2</sup> por año
 SALUD	376 kWh/m <sup>2</sup> por año	320 kWh/m <sup>2</sup> por año
 EDUCACION	100 kWh/m <sup>2</sup> por año	85 kWh/m <sup>2</sup> por año

### 6.3 LA CERTIFICACIÓN LEED

La Certificación LEED (Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental, por sus siglas en inglés) es un sistema de certificación con reconocimiento internacional para edificios sustentables creado por el Consejo de Edificación Sustentable de Estados Unidos (U.S. Green Building Council). Entre los beneficios que proporciona esta evaluación se encuentran:

- Espacios con mejores condiciones para la salud y productividad.
- Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.
- Acceso a incentivos fiscales.
- Disminución en los costos de operación y residuos.
- Incremento del valor de sus activos.
- Ahorro energético y de recursos.

Para alcanzar la certificación, existe una serie de lineamientos que se deben cumplir. Éstos lograrán soluciones de alta eficiencia energética y ambiental, con base en los requerimientos de la normatividad LEED.

A través de un sistema de sumatoria de puntos, donde prerequisites obligatorios (que no dan puntos) y créditos (opcionales) permiten alcanzar uno de los cuatro niveles de certificación posibles:

- Certificado, al obtener de 40 a 49 puntos
- Plata, al alcanzar de 50 a 59 puntos
- Oro, al lograr de 60 a 79 puntos
- Platino, si se obtiene 80 puntos o más

#### Categorías de evaluación

Como el sistema toma en cuenta el ciclo de vida completo del edificio y su entorno urbano, existe una certificación distinta para cada tipo de proyecto. Cada categoría cuenta con subdivisiones específicas y las más importantes son:

- Nuevas Construcciones: para evaluar edificios recién construidos.
- Edificios Existentes: busca maximizar la eficiencia de los edificios y reducir al mínimo los costos de operación y los impactos ambientales.
- Viviendas: promueve el diseño y la construcción de alto rendimiento en casas.





- **Desarrollo de Barrios:** evalúa el crecimiento inteligente, el urbanismo y el respeto por el medio ambiente.
- **Educación:** integra los principios de diseño inteligente que debiera tener una institución educacional.
- **Salud:** debe enfocarse en la salud del paciente junto al cuidado del medio ambiente.

Los requerimientos para la certificación se adecúan a las necesidades particulares de cada tipo de proyecto. El número total de créditos es de 110: los primeros 100 son por cumplimiento adecuado de las categorías y los 10 son bonos por innovación en la ejecución. Los créditos se clasifican en siete familias y cada una reúne créditos relacionados con su categoría. Las familias son:

**Ubicación y transporte.** Presta atención en incentivar de transporte alternativo (bicicletas, autos híbridos, transporte público) enfocado a la disminución del uso del auto común.

**Sitios Sustentables.** Los créditos de esta categoría se refieren a los agentes que impactan dentro del entorno exterior, como evitar la sedimentación y erosión, restauración del hábitat, tratamiento de agua de lluvia, entre otras estrategias.

**Eficiencia del agua.** Los créditos de esta familia se basan en el aprovechamiento óptimo del agua, su tratamiento, captación, reutilización, ahorro y su desecho correcto.

**Energía y atmósfera.** Esta familia es la que toma más créditos dentro de la escala LEED. Procura una utilización óptima de la energía, la fuente de la misma y cómo la eficiencia energética impacta en la comunidad. Para reducir aún más los impactos ambientales de la generación de energía, los edificios ecológicos con frecuencia utilizan tecnologías de energía renovable que generan energía en el sitio, como energía solar, eólica, biomasa o energía ecológica comprada a un proveedor de servicios públicos o en el mercado abierto.

**Materiales y recursos.** Esta familia de créditos toma en cuenta el origen de los materiales en la construcción, dando prioridad a materiales reutilizados. Además, evalúa la manera en que los residuos propios de la construcción son manejados.

**Calidad de ambiente interior.** Familia enfocada en el bienestar de los ocupantes del inmueble a través de estrategias que influyan en su salud y bienestar, así como acciones que procuren una renovación del aire interior a través de una adecuada ventilación, libre de químicos o humo de tabaco; el aseguramiento de un ambiente interior con una temperatura confortable, entre otros aspectos considerables en los edificios LEED.

**Innovación.** Esta familia de créditos se basa en el compromiso constante de mejora de las estrategias implementadas.

**Prioridad regional.** Con la finalidad de eliminar que la huella de carbono aumente debido al transporte de materiales que se fabrican a distancias largas y promover el desarrollo sustentable las estrategias empleadas con materiales y soluciones regionales merecieron una familia de créditos.

Si bien es posible construir un edificio con certificación LEED sin la ayuda de la energía solar, las aplicaciones solares adecuadas pueden ayudar a un nuevo edificio a ganar puntos adicionales. La Energía Solar cumple un rol importante para construcciones o desarrollos que desean obtener la certificación, puesto que el ahorro y eficiencia energética se consolidan con el uso de energías renovables. Los SCSA pueden puntuar en los siguientes aspectos:

**Reducción de isla de calor.** Los efectos de la isla de calor ocurren cuando las áreas experimentan temperaturas elevadas como resultado de estructuras o desarrollos artificiales. Las áreas de estacionamiento pavimentadas con asfalto, por ejemplo, absorben y retienen el calor, aumentan las temperaturas y potencialmente dañan la vida silvestre local. Los nuevos proyectos de construcción que siguen la especialización de diseño y construcción de edificios pueden recibir hasta dos puntos para reducir los efectos de las islas de calor mediante la construcción de sistemas de energía renovable, incluidos los paneles solares, para dar sombra a las áreas de alto calor [36].

**Calentamiento eficiente de agua.** Las casas pueden recibir hasta tres puntos por instalar calentadores de agua de alta eficiencia. Instalar un SCSA da 1 punto, un SCSA que de al menos el 40% del agua caliente requerida da 2 puntos y un SCSA que de al menos el 60% del agua caliente requerida da 3 puntos [37].

**Energía renovable.** La aplicación más popular de la energía solar, la producción de energía renovable, tiene el potencial de generar una amplia gama de puntos dependiendo del porcentaje de uso de energía de un edificio suministrado por una fuente renovable, como la energía solar. En estructuras seleccionadas, por ejemplo, si el 1% de la generación de energía anual de una estructura

proviene de la energía solar, incluida la generada por las matrices tradicionales y las tejas solares, la estructura califica para un punto [36].

**Orientación solar.** En una escala de planificación de vecindario, un proyecto puede ganar hasta un punto para optimizar la alineación para la eficiencia solar. Esto significa que los edificios deben estar dispuestos con sus lados más largos alineados dentro de los 15 grados del eje este-oeste, donde podrán recibir una cantidad máxima de luz solar para los captadores solares en la azotea [36].

**Diseño solar activo.** Las casas que no reciben puntos por calentadores de agua solares o energía renovable pueden recibir hasta un punto por tener un diseño listo para la energía solar que permitirá la fácil instalación de un sistema fotovoltaico o calentador de agua solar en el futuro [36].

## CONCLUSIONES

Este capítulo enfatiza la importancia de modernizar construcciones existentes con SCSA y describe los mecanismos de la guía de construcción sostenible para el ahorro de energía en edificaciones de Panamá.

Finalmente, se explica en que consiste la certificación internacional LEED (Liderazgo en energía y diseño ambiental, por sus siglas en inglés). Los SCSA pueden cumplir un rol importante para construcciones o desarrollos que desean obtener la certificación, puesto que el ahorro y eficiencia energética se consolidan con el uso de energías renovables. Los SCSA puntúan en aspectos como son la reducción de isla de calor, el calentamiento eficiente de agua, el uso de energías renovables, la orientación solar y en el diseño solar activo.

## CUESTIONARIO CAPÍTULO 6

**1. ¿Cómo se realizan las grandes instalaciones de calentamiento solar de agua?**

- a) Se hacen a medida, caso por caso.
- b) Se hacen diseños por paquete.
- c) Se reproducen n veces pequeñas instalaciones.
- d) Se compran por internet.

**2. De acuerdo con la Guía de Construcción Sostenible para el Ahorro de Energía en Edificaciones. ¿Cuál es el consumo de línea base para los hoteles?**

- a) 80 kWh/m<sup>2</sup>
- b) 202 kWh/m<sup>2</sup>
- c) 172 kWh/m<sup>2</sup>
- d) 376 kWh/m<sup>2</sup>

**3. De acuerdo con la Guía de Construcción Sostenible para el Ahorro de Energía en Edificaciones. ¿Qué porcentaje de requerimientos de agua caliente deben ser cubiertos por sistemas de calentamiento solar de agua para viviendas, hoteles y edificios de salud?**

- a) 25%.
- b) 40%.
- c) 50%.
- d) 75%.

**4. ¿Cuántos puntos puede uno obtener con para la certificación LEED con un sistema de calentamiento solar de agua que de más del 60% del agua caliente que se requiere anualmente?**

- a) 1 punto.
- b) 3 puntos.
- c) 2 puntos.
- d) 4 puntos.

## CAPÍTULO 7 PRÁCTICAS DE SISTEMA DE CSA



Crédito: Mexico Solar / Heliocol de Mexico SA DE CV

### 7.1 PRÁCTICA PARA LA OBTENCIÓN DE LA CURVA DE RENDIMIENTO TÉRMICO DE CAPTADORES SOLARES PLANOS (ISO9806:2017)

En esta sección se realizará la evaluación de la curva de rendimiento térmico instantáneo de un captador solar para calentamiento de agua de acuerdo al protocolo de la norma ISO9806:2017, que se explicó en la sección 1.5.2.1 Pruebas de rendimiento térmico (rendimiento térmico instantáneo)

#### Equipo requerido

Captador solar plano de tubos evacuados

Unidad experimental que cuenta con: medidor de flujo de agua, sensores de temperatura colocados a la entrada y salida del captador solar, piranómetro colocado en el mismo plano del captador, sensor de temperatura ambiente y velocidad de viento.

#### Requisitos para la prueba

Los rayos solares deben ser perpendiculares a la superficie del colector con una desviación máxima del  $\pm 2\%$ , irradiancia total  $> 700 \text{ W/m}^2$ , la irradiancia difusa no debe de exceder en más del 30% a la

irradiancia total, velocidad del viento paralela al eje del colector de  $3 \pm 1 \text{ m/s}$ . El flujo másico de agua a menos que se indique lo contrario es de  $0.02 \text{ kg/s}$  por  $\text{m}^2$  del área bruta del captador.

Para que un punto de prueba sea válido se debe de cumplir con las condiciones de pruebas y que el colector permanezca en condiciones de estado estable por al menos 15 minutos.

El rendimiento térmico instantáneo, para cada punto de prueba experimental se calcula con la siguiente ecuación:

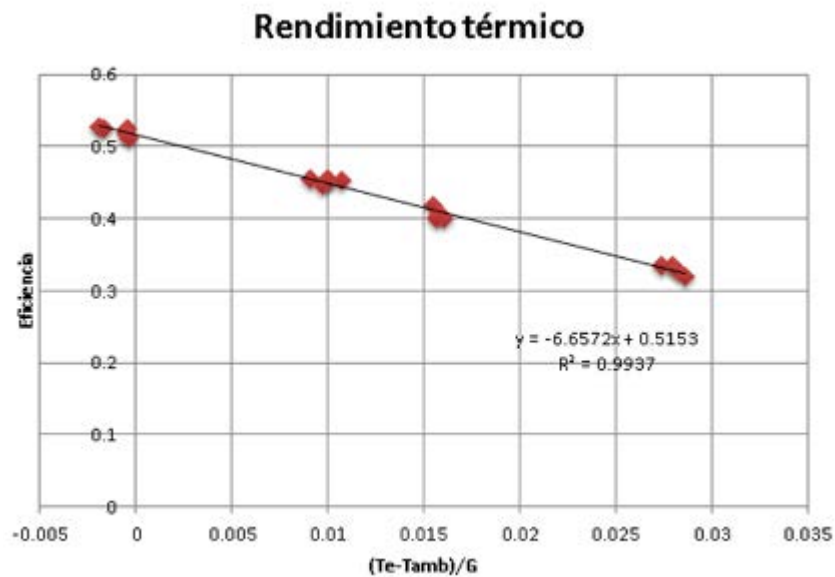
$$\eta = \frac{\dot{Q}}{G'' A_G} = \frac{\dot{m} C_f \Delta T}{G'' A_G}$$

Donde  $\dot{Q}$  es la energía transferida al agua,  $G''$  la irradiancia neta,  $A_G$  el área bruta, el flujo másico del fluido,  $C_f$  el calor específico del fluido a la temperatura media del fluido en su interior y  $\Delta T$  la diferencia de temperaturas del fluido entre la salida y entrada del captador.

Se deben obtener al menos 4 puntos para temperaturas del agua a la entrada del captador distribuidas de manera uniforme en el rango de operación especificado por el fabricante. De cada uno de estos 4 puntos se necesita sacar 4 puntos independientes.

## REPORTE A ENTREGAR

1) Gráfica de la curva de rendimiento instantáneo. Como la que se muestra a continuación



2) Regresión lineal de la curva obtenida y su coeficiente de determinación ( $R^2$ )

3) Gráfica y regresión lineal de la curva obtenida con base en el área de apertura del captador y la temperatura de entrada del mismo (curva utilizada en el método del F-chart).



## RESPUESTAS A LOS CUESTIONARIOS DE CADA CAPÍTULO

### CAPÍTULO 1

1. b
2. d
3. a
4. b
5. c
6. d
7. e
8. a
9. b
10. b

### CAPÍTULO 2

1. b
2. d
3. a
4. b
5. c
6. a

### CAPÍTULO 3

1. a
2. b
3. c
4. d
5. c
6. a
7. b

### CAPÍTULO 4

1. a
2. c
3. b
4. d
5. c

### CAPÍTULO 5

1. a
2. c
3. b
4. d
5. d

### CAPÍTULO 6

1. a
2. c
3. c
4. b

## REFERENCIAS

- [1] <https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/cambio-climatico/>
- [2] World Energy Balance 2018, International Energy Agency.
- [3] <https://www.concienciaeco.com/2012/04/09/que-es-el-efecto-invernadero/>
- [4] <http://scrippsco2.ucsd.edu/>
- [5] <https://www.climate.gov/teaching/resources/changes-global-average-surface-temperature-global-average-sea-level-and-northern>
- [6] <https://www.fundacionaquae.org/wiki-aquae/sostenibilidad/los-gases-de-efecto-invernadero/>
- [7] IRENA, A New World, the Geopolitics of the Energy Transformation, 2019.
- [8] <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [9] O. García Valladares, I. Pilatowsky, Aplicaciones térmicas de la energía solar en los sectores residencial, servicios e industrial. UNAM, 1 ed., 2017. ISBN 978-607-02-8952-0
- [10] W. Weiss, M. Spörk-Dür (2019 edition), Solar Heat Worldwide, Global Market Development and Trends in 2018, Solar Heating and Cooling Programme, International Energy Agency.
- [11] ISO 31-6:1992, Quantities and units - Part 6: Light and related electromagnetic radiations.
- [12] ISO-9488-1999, Solar Energy-Vocabulary.
- [13] ISO 9806:2017 Solar energy - Solar thermal collectors - Test methods
- [14] UNE 12976-2:2000 Thermal solar systems and components - Factory made systems - Part 2: Test methods
- [15] ISO 9459-2, Solar heating - Domestic water heating systems - Part 2: Outdoor test methods for system performance and yearly performance prediction of solar-only systems.
- [16] NMX-ES-003-NORMEX-2008 Energía solar. Requerimientos mínimos para la instalación de sistemas solares térmicos, para calentamiento de agua
- [17] O. García Valladares, I. Pilatowsky, Aplicaciones térmicas de la energía solar en los sectores residencial, servicios e industrial. UNAM, 1 ed., 2017. ISBN 978-607-02-8952-0
- [18] J.A. Duffie, W.A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons, 4a. Edición, 2013.
- [19] <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/EnergyBalance/page6.php>
- [20] <https://sam.nrel.gov/weather>
- [21] <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- [22] <http://globalsolaratlas.info/>
- [23] <http://www.meteonorm.com>
- [24] <https://www.monsolar.com/separacion-paneles-solares>

[25] <http://pvsol-online.valentin-software.com/>

[26] <https://www.sketchup.com/es>

[27] O. García Valladares, I. Pilatowsky, Aplicaciones térmicas de la energía solar en los sectores residencial, servicios e industrial. UNAM, 1 ed., 2017. ISBN 978-607-02-8952-0

[28] J.A. Duffie, W.A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons, 4a. Edición, 2013.

[29] S. R. Almanza, G.F. Muñoz, Ingeniería de la Energía Solar, El Colegio Nacional, 1994.

[30] J.A. Manrique, Energía solar: fundamentos y aplicaciones fototérmicas, Harper & Row Latinoamericana, 1984.

[31] R.J. Fuller, Solar heating systems for recirculation aquaculture, Aquacultural Engineering 36 (2007) 250-260.

[32] Termosolar Panamá, Análisis potencial del desarrollo del mercado de calentadores de agua en Panamá.

[33] Y. Liu, K.C. Chang, W.M. Lin, K.M. Chung, Solar thermal application for the livestock industry in Taiwan, Case Studies in Thermal Engineering 6 (2015) 251-257.

[34] R. Jeantet, T. Croguennec, P. Schuck, G. Brulé, Ciencia de los Alimentos (Bioquímica - Microbiología - Procesos - Productos), Editorial ACRIBA, España (2007), ISBN 978-84-200-1149-3.

[35] O. García Valladares, I. Pilatowsky, Aplicaciones térmicas de la energía solar en los sectores residencial, servicios e industrial. UNAM, 1 ed., 2017. ISBN 978-607-02-8952-0

[36] <https://www.gbcs.com/blog/solars-impact-on-lead-certifications/>

[37] <https://www.usgbc.org/credits/homes/v4-draft/eac12>