

Universidad de Matanzas
Sede “Camilo Cienfuegos”
Departamento Ingeniería Mecánica
Facultad de Ciencias Técnicas



**ANÁLISIS COMPARATIVO DE CALENTADORES SOLARES TÉRMICOS PARA UNA
ENFRIADORA DE AGUA DE ABSORCIÓN.**

Ejercicio Culminación de Estudios

Autor: Mario Sergio González Llanes.

Tutor: M.Sc. Ing. Jorge Luis Lamas Acevedo.

Matanzas, 2020

RESUMEN

Se realiza un estudio comparativo entre calentadores solares para calentar agua a una temperatura menor de cien grados Celsius, que sirva como fuente térmica de alimentación al generador de un sistema de refrigeración por absorción. Se analizan las pérdidas térmicas que ocurren en los colectores solares y se determina la cantidad de estos a instalar y el área que ocupan para climatizar una zona determinada con una demanda frigorífica de cien toneladas de refrigeración. La introducción de enfriadoras de agua por absorción con energía solar reducirá el consumo de energía eléctrica, dando paso a la utilización de la energía solar térmica en la climatización de edificios y grandes locales, contribuyendo a la erradicación de refrigerantes con altos índices de calentamiento global que provocan el perjudicial efecto invernadero al hacer usos de refrigerantes inocuos al medio ambiente.

Palabras claves: calentadores solares; energía solar térmica; sistema de absorción; climatización; eficiencia térmica.

ABSTRACT

A comparative study is carried out between solar heaters to heat water to a temperature less than one hundred degrees Celsius, which serves as a thermal power source for the generator of an absorption cooling system. The thermal losses that occur in the solar collectors are analyzed and the quantity of these to be installed and the area they occupy to air conditioning a determined area with a refrigeration demand of one hundred tons of refrigeration are determined. The introduction of absorption water chillers with solar energy will reduce the consumption of electrical energy, giving way to the use of thermal solar energy in the air conditioning of buildings and large premises, contributing to the eradication of refrigerants with high rates of global warming that they cause the harmful greenhouse effect by making use of environmentally friendly refrigerants.

Key words: solar heaters; Thermal solar energy; absorption system; air conditioning; thermal efficiency.

INTRODUCCIÓN

Sin dudas una de las tecnologías más respetuosas con el medio ambiente y que ha aportado tanto al desarrollo de la humanidad, es la que se basa en la utilización de métodos de aprovechamiento de la luz solar. Uno de los problemas que más afectan la economía de un país y en especial en Cuba es el encarecimiento y el déficit de recursos energéticos, por lo que se hace imprescindible llevar a cabo una política de ahorro en todos los sectores.

El desarrollo económico actual se encuentra basado en el uso de recursos energéticos de origen fósil, provocando un gran impacto medioambiental y desequilibrios socioeconómicos. Estos dos efectos obligan a definir un nuevo modelo de desarrollo sostenible. El desarrollo sostenible es aquél que garantiza que se cumplan de manera simultánea el crecimiento económico, el progreso social y el uso racional de los recursos.

La economía cubana tiene una fuerte dependencia del petróleo y al ser insuficiente la producción nacional, depende de importaciones para garantizar su desarrollo económico y social.

Dentro de los Programas de la Revolución Energética en Cuba se han trazado varios objetivos estratégicos de la nación para cambiar su matriz energética. Aumentar la utilización de las fuentes renovables de energía, no incrementar la dependencia de importaciones de combustibles para la generación eléctrica, reducir los costos de la energía entregada por el sistema energético nacional y reducir la contaminación medioambiental, (gCO₂/kWh) son algunos de los objetivos en desarrollo para afrontar problemas fundamentales de la energía en Cuba.

La producción de energía a partir de la quema de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural representaba el 45% de la Huella Ecológica global. La disminución sustancial en la quema de combustibles fósiles y en las emisiones asociadas de dióxido de carbono es vital para evitar un peligroso cambio climático,

En la región del Caribe, una edificación destina más del 60% de su demanda energética a satisfacer los requerimientos de climatización. Nuestro país prevé construir 48 mil nuevas habitaciones para el año 2030 en el sector del turismo lo cual demanda un elevado consumo de energía.

La refrigeración con energías renovables representa una cuestión clave en la política energética de países de la región. Las altas temperaturas alcanzadas en el Caribe y generalmente atribuidas al cambio climático, continúan incrementando la demanda energética para producir aire acondicionado durante el verano. Empleando la energía solar (Figura 1) se pueden reducir los picos de energía eléctrica sustancialmente durante los meses de verano y por consiguiente reducir las emisiones de CO₂.(Bravo, González et al. 2018)

Los motivos del incremento en la demanda de refrigeración y aire acondicionado a nivel mundial son diversos. Entre ellos se tienen el aumento de los hábitos de bienestar, los todavía bajos costos energéticos, tendencias arquitectónicas de aumentar las áreas acristaladas y, en una gran medida, las condiciones climáticas. La creciente demanda de refrigeración y aire acondicionado en edificios implica el aumento del consumo de combustibles fósiles. Por ello, es interesante reconsiderar los conceptos de construcción para lograr la reducción de las cargas de climatización y por otro lado el uso de tecnologías alternativas que permitan cubrir la demanda de climatización y refrigeración en edificios.

Es importante observar que en el mismo momento en el que se produce la demanda pico de frío, es que se dispone de grandes cantidades de radiación solar que podrían usarse para accionar sistemas de refrigeración y climatización. La refrigeración y climatización generadas térmicamente se ha aplicado durante las últimas décadas en nichos de mercado, preferentemente en categorías de gran capacidad, usando el calor residual o el calor procedente de la producción combinada de calor y energía (cogeneración). Sin embargo, la combinación de esta tecnología con calentamiento solar hace más complicado el proceso. Hasta la fecha, la refrigeración solar y el aire acondicionado solar se han probado en unos pocos centenares de instalaciones. (Ramírez 2013)

Este ECE tiene como objetivo el análisis de los colectores solares térmicos de baja temperatura, hasta 100 °C, para el calentamiento de agua como fuente de energía para ser utilizadas en el generador de los sistemas de refrigeración por absorción solar.

DESARROLLO

La energía solar es la energía obtenida mediante la captación de la luz y el calor emitidos por el Sol.

La energía solar es limpia, renovable y está disponible en todo el planeta. Para usarla eficientemente es necesario tomar en cuenta factores tales como: el desarrollo tecnológico y las variaciones de la cantidad de radiación solar. Es una de las fuentes renovables por excelencia, es la energía proveniente de la estrella del sistema solar. La energía solar se aprovecha en procesos naturales como: calentamiento e iluminación de la tierra, crecimiento de las plantas, evaporación de las aguas, etc. Se ha aprendido a usarla en sustitución de los combustibles fósiles para las más diversas funciones como: calentamiento de agua, cocción de alimentos, obtención de corriente eléctrica, todas estas funciones sin contaminar el medio ambiente, ni destruir la naturaleza.

En la década de los 1990, con la instauración del “período especial” a consecuencia del desplome del campo socialista y desaparición de la Unión soviética y por la intensificación del criminal y genocida bloqueo impuesto por los Estados Unidos de Norteamérica, Cuba viene realizando grandes esfuerzos para solucionar el problema energético y entre sus planes incluyó la intensificación de la utilización de energía solar, fundamentalmente en zonas de difícil acceso donde no llega el sistema electroenergético nacional, utilizando paneles solares . Estos sistemas comenzaron a instalarse fundamentalmente en consultorios del médico de la familia, hospitales rurales, círculos sociales, salas de televisión y escuelas.

La Gaceta Oficial No. 95 (ordinaria) publicó el Decreto Ley No. 345, “Del desarrollo de las fuentes renovables y el uso eficiente de la energía”, acompañado de resoluciones complementarias de los Ministerios de Energía y Minas y de Comercio Interior y una instrucción del Banco Central, que establece las prioridades y regulaciones que regirán

este sector e introduce, entre otras, novedades referentes al sector estatal y residencial, la venta de excedentes de energía a la Unión Eléctrica (UNE) y la comercialización de equipos, partes y piezas.

Entre los objetivos principales incluidos en el decreto ley están la elevación del aporte de las fuentes renovables de energía en la generación de electricidad (se prevé superen el 24% del total en 2030), la sustitución progresiva de los combustibles fósiles, la diversificación de la estructura de los combustibles fósiles empleados en la generación, y la elevación de la eficiencia y el ahorro energéticos.

Igualmente, son prioridades la estimulación de la inversión y la investigación, y el desarrollo de la producción de equipos, partes y piezas de repuesto por la industria nacional.

El Decreto Ley No. 345 declara como un objetivo de la industria nacional la producción de equipos, medios y piezas para el desarrollo de las fuentes renovables de energía y los destinados a elevar la eficiencia energética.(Martín 2019)

Existen actualmente en Cuba potencialidades para generar aproximadamente cinco kilovatios/hora (KWh) diario por metro cuadrado a partir de la energía solar, lo que implica la instalación, hasta 2030, de 700 MW en parques solares fotovoltaicos conectados al Sistema Eléctrico Nacional.

De acuerdo con las estimaciones, una vez instalada toda la potencia prevista se producirán más de 1 000 GWh/año y se evitará la emisión de más de 874 000 toneladas de dióxido de carbono a la atmósfera.

Como parte de la política aplicada por parte del gobierno cubano con el objetivo de alcanzar el 24% del total de energía producida en el país sea renovable, se ha firmado varios contratos y colaboraciones con varios países (China, Reino Unido, Alemania, entre otros) y empresas extranjeras; como son los casos de; EFF Solar SA quienes en junio de 2019 pusieron en marcha un parque solar fotovoltaico en la provincia de Mayabeque con una generación de 5 MW, así como la Agencia Internacional de Energías Renovables financió el montaje de un parque fotovoltaico en el municipio Cárdenas perteneciente a

nuestra provincia Matanzas, esta instalación forma parte del programa de 10 MW en el que también se incluyen otros tres parques ubicados en Sancti Spíritus y Camagüey. Otro de los proyectos novedosos es el llevado a cabo, por la empresa Mariel Solar S.A, corporación del Reino Unido con un filial 100% cubana, en la Zona Especial de Desarrollo Mariel que, en materia de contribución energética es el primero de gran escala en Cuba y el más grande de la región y está aportando 50 MW al sistema electro energético nacional. El parque se servirá de una tecnología de rastreo capaz de seguir los rayos solares, por lo que se prevé que este resulte 20% más productivo que otros emplazamientos similares.

En la actualidad se han construido y ya se encuentran funcionando más de 65 parques para la obtención de energía solar, que generan más de 185 MW y se prevé la construcción de otros 15 emplazamientos solares que aumentarán en 42 MW la capacidad de generación actual por esta vía, estos proyectos abarcan todo el territorio nacional. Ejemplo de territorios que avanzan a diario en este sentido son las provincias; entre otras, Camagüey, Las Tunas, Holguín, Granma y Pinar del Río, esta última entregó en 2019, más de 25 MW a la red electroenergética nacional, la electricidad generada en ellos permitió un ahorro de unas 6000 toneladas (t) de combustible, y dejar de emitir a la atmósfera alrededor de 3 720 t de CO₂.

También se trabaja en la implementación y montaje de calentadores solares tanto en el sector estatal como en el particular. Así lo demuestra el hecho de que en el mes de enero de 2020 se inició la comercialización en nuestro país, por parte de la marca cubana Rensol, de calentadores solares, los que en el tiempo que llevan en venta podemos catalogar de muy exitoso su lanzamiento teniendo en cuenta su gran aceptación y repercusión tanto en el sector residencial como en el sector estatal. Además, la marca cubana de calentadores pretende ampliar sus ventas en todo el país, así como adentrarse en la exportación del producto. Estos equipos ya se habían estado utilizando en centros estatales y de uso público como hospitales y hoteles, y se pretende generalizar más su uso, teniendo en cuenta las garantías y el servicio de gran valor económico que ofrecen.

Aunque se trabaja a diario en el montaje y la proyección de futuras instalaciones de aprovechamiento de la energía solar, se considera que todavía es poco el aporte de esta fuente renovable en el país; considerando las magníficas condiciones de radiación solar que nos ofrece el astro rey. Aunque hay que tener en cuenta lo anteriormente planteado el país, con recursos limitados producto del arreciamiento del embargo económico impuesto por Estados Unidos; se proyecta a corto y largo plazo con programas de desarrollo contundentes y progresistas, que pretenden propiciar una situación más favorable en los próximos años.(Noticias 2019)

La energía solar térmica consiste en el aprovechamiento de la energía procedente del Sol para transferirla a un medio portador de calor, generalmente agua, esto de la manera más económica y eficaz posible. Se trata de una forma de energía renovable, sostenible y respetuosa con el medio ambiente. Las aplicaciones del aprovechamiento solar pueden ser directas, en forma de calor, o bien indirectas, utilizando este calor para obtener trabajo mecánico en un eje y finalmente electricidad.

La generación de energía a partir de fuentes convencionales tiene un enorme impacto en el entorno. Es por ello que las energías renovables se presentan como la alternativa sostenible y ecológica que vela por el cuidado del planeta.

Hoy en día la energía eléctrica es una necesidad de primer orden y no podemos prescindir de ella. La necesidad imperiosa de generar electricidad de cualquier forma conlleva un impacto medioambiental catastrófico a nivel mundial, es por este motivo que debemos conseguir energía de una manera sostenible para un futuro respetuoso con el medioambiente.

Antaño, para generar energía, se utilizaba la madera y el carbón. Conforme las grandes ciudades crecían hacía falta una producción mayor ya que la demanda también iba en aumento. Es en este contexto es en el que se empiezan a utilizar fuentes de energía más productivas y también más perjudiciales para el planeta como el petróleo y algunas otras. El uso sostenido en el tiempo y cada vez más en aumento del petróleo, entre otras, deriva en esta situación actual de insostenibilidad energética y de un alto componente contaminante. Los combustibles fósiles conforman el 97% de la energía primaria que se

consume en el mundo, 38% es carbón, 40% es petróleo y 19% es gas natural. Estas generan contaminación y enviando a la atmósfera grandes cantidades de dióxido de carbono (CO_2), gas metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), además de tres gases industriales fluorados: Hidrofluorocarbonos (HFC), Perfluorocarbonos (PFC) y Hexafluoruro de azufre (SF_6), estos que son los principales causantes del efecto de invernadero, figura #1, y del calentamiento global desmedidos que se presenta en la actualidad. (Villarig 2018)

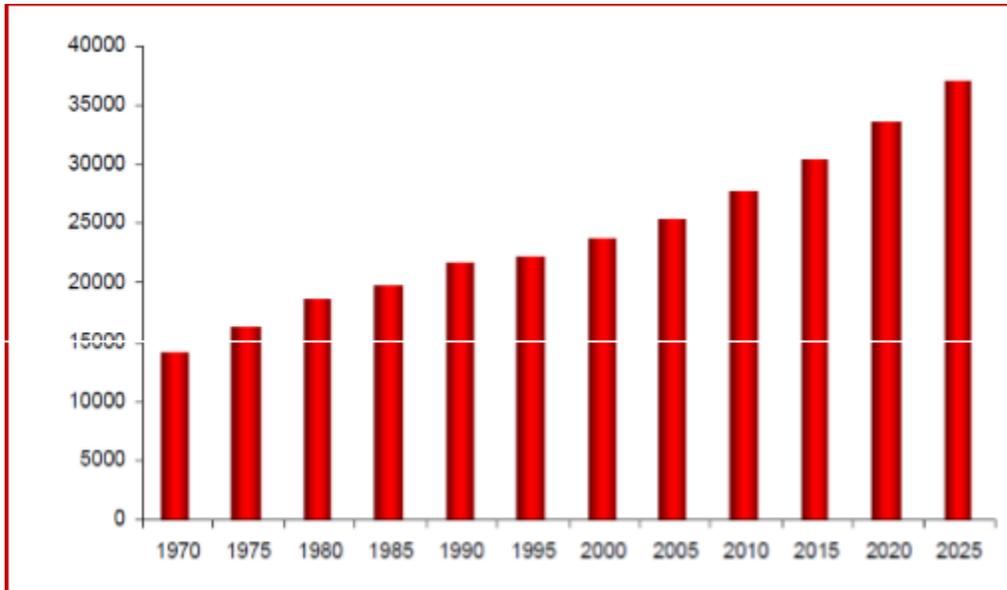


Figura #1: Emisiones de Dióxido de Carbono por producción de energía (Millones de toneladas). Fuente: Revista Energía Solar y Medio Ambiente

Esta situación ya es reconocida a nivel mundial como un problema que pudiera acabar con el medio ambiente y la humanidad en general, es por ello que se aboga cada día más porque se haga mayor el uso de las energías renovables, estas que sustituyen estos combustibles fósiles que son fuentes agotables y que, aunque emiten gases contaminantes, el propio medio ambiente los degrada debido a que esta emisión se realiza en pequeñísimas cantidades.

Tipos de energías renovables:

- Energía hidráulica. Es la producida por la caída del agua. Las centrales hidroeléctricas utilizan el agua retenida en pantanos a gran altura. El agua en su

caída pasa por turbinas hidráulicas, que transmiten la energía a un alternador y la transforma en energía eléctrica.

- Energía eólica. Es la energía producida por el viento. A través de los Aero-generadores o molinos de viento se aprovechan las corrientes de aire y se transforman en electricidad. Dentro de la energía eólica, podemos encontrar la llamada eólica marina, aprovechando estos poderosos vientos que suceden casi continuamente son instalados estos parques eólicos que se encuentran mar adentro.
- Energía solar. Este tipo de energía nos la proporciona el sol en forma de radiación electromagnética (luz, calor y rayos ultravioleta principalmente). El uso de la energía del sol se puede derivar en energía solar térmica (para producir agua caliente a partir del calor emitido por el sol); y energía solar fotovoltaica (para producir electricidad con la radiación solar).
- Energía geotérmica. Es una de las fuentes de energía renovable menos conocidas. Se encuentra almacenada bajo la superficie terrestre en forma de calor. Es la misma energía que provoca los volcanes, las aguas termales, las fumarolas y los géiseres. Es una energía que proviene del interior de la Tierra.
- Energía mareomotriz. El movimiento de las mareas y las corrientes marinas son capaces de generar energía eléctrica, aunque también el mar nos ofrece la llamada energía undimotriz, que se obtiene a través del movimiento de las olas. La diferencia de temperatura entre la superficie y las aguas profundas del océano (maremotérmica); el gradiente térmico oceánico y la salinidad también son condiciones que ofrecen la posibilidad de obtención de energía a partir de su aprovechamiento.
- Energía biomasa. Es la procedente del aprovechamiento de materia orgánica animal y vegetal o de residuos agroindustriales. Incluye los residuos procedentes de las actividades agrícolas, ganaderas y forestales, así como de la

agroalimentarias y de transformación de la madera. De esta variante se deriva los biocombustibles o combustibles orgánicos.

Cada vez son más los lugares donde se implantan estructuras para la generación de las energías renovables anteriormente mencionadas. Aunque al principio la instalación requiera de una gran inversión, a largo plazo todo son ventajas; primero porque se consume una energía renovable y, por tanto, respetuosa con el medioambiente, de tal forma que se contribuye a la sostenibilidad y mejora del planeta; y segundo, porque el ahorro económico es real. A lo largo de los años se amortiza la inversión inicial por completo y disminuye en grandísima medida el costo final de producción de energía. (Laino 2009)

El cambio en la utilización de energías convencionales a renovables no prosperará si no cambiamos nuestro ritmo de vida por un modelo más sostenible no solo energéticamente, sino en todos los aspectos que puedan contribuir a la mejora de un planeta cada vez más dañado por nuestros consumos irresponsables de materias primas.

La energía solar posee numerosas aplicaciones donde puede ser utilizada. Estas se clasifican en tres grupos:

1. Generación térmica: contiene la generación de calor para calefacción, agua caliente sanitaria y desecación
2. Generación de trabajo: se puede dar de forma térmica, en plantas generadoras de electricidad para mover turbinas a partir del vapor.
3. Generación fotovoltaica: comprende la generación de energía eléctrica mediante celdas fotovoltaicas.

Esta forma de generar energía puede aplicarse en viviendas e instalaciones pequeñas, pero también en grandes centrales de energía solar térmicas. Entre las distintas aplicaciones de esta fuente de energía renovable existe la posibilidad de generar electricidad mediante una central termosolar. La tecnología actual permite calentar agua con la radiación solar hasta producir vapor y posteriormente obtener energía eléctrica.

Aunque el rendimiento termodinámico no es muy elevado comparado con otros sistemas, el precio del combustible es nulo.

- Producción de frío: se utiliza generalmente en grandes edificios q necesitan de acondicionamiento de la temperatura, esto se logra mediante las enfriadoras de agua por absorción. Estos mecanismos son utilizados comúnmente con otro tipo de fuente de energía, pero con el aumento de la utilización de la energía solar se ha puesto en práctica varios proyectos para utilizar paneles solares como fuente principal de suministro de calor, trayendo consigo resultados muy alentadores si nos referimos al rendimiento y buen funcionamiento. Actualmente en nuestro país existen diferentes estudios en curso de cómo implementar esta tecnología con eficiencia, en hoteles y demás instalaciones que puedan requerir de este servicio.
- Producción de agua caliente sanitaria: esta aplicación, de la energía solar, actualmente se utiliza mucho, debido a su gran aceptación por parte de los consumidores y además su gran eficiencia y economía. Su uso va en aumento constante, cada vez son más las personas, sobre todo en países que se intenta incrementar su implementación, que utilizan esta tecnología. A pesar de tener aspectos en su contra como pueden ser la variación en la intensidad de la radiación solar en días nublados; son muchas más sus ventajas: no utiliza ningún tipo de combustible, solo la energía solar; es rápido y eficiente; no emite contaminantes a la atmósfera y es de fácil manejo y colocación. La producción de agua caliente sanitaria mediante la energía solar no solo es usada en viviendas privadas, sino también en grandes hoteles y lugares públicos en los que se requiera la utilización de este servicio. En nuestro país se aboga por la utilización de este método, tanto en viviendas como en centros estatales como hoteles y hospitales; una muestra de ello es la instalación de calentadores solares de la marca cubana Rensol, que se extiende cada día más a todo el territorio nacional y ya son muchos los que pueden contar sus buenas experiencias.

- Lavanderías de ropa: algunas prendas necesitan ser lavadas con una temperatura entre los 40 y 60 °C, por lo que es beneficioso el uso de plantas de energía solar que en su capacidad pueden alcanzar dichos grados.
- Lavados de autos: mismo requerimiento existe en los túneles de los autos lavados, donde la temperatura óptima es de 60 °C.
- Lavado industrial: en el lavado de botellas, piezas de autos, etc. Es indispensable que el agua esté a bajas temperaturas que se pueden lograr con la energía solar térmica.
- Deshidratadores de vegetales: las frutas, verduras, flores o granos también requieren de agua a bajas temperaturas. Usando la planta de energía sola, se hace circular el aire caliente en el producto para su deshidratación.
- Sistemas de calefacción: la energía solar también es aplicable a la calefacción de espacios que requieren temperaturas elevadas, como invernaderos, así como corrales de crianza de aves y cerdos.
- Climatización de piscinas: la energía solar térmica también puede ser usada en la destilación del mar o piscinas con la utilización de destiladores solares.

El sol, es clasificado por la ciencia como una estrella “enana amarilla” de acuerdo con sus dimensiones, temperatura y tiempo de existencia; está compuesta por grandes cantidades de hidrógeno y helio en estado plasmático; la fotosfera, superficie brillante del sol, tiene una temperatura de unos 6.000 K. Debido a las reacciones nucleares de fusión $H \rightarrow He$ que tienen lugar en el interior del sol, unos 4 millones de toneladas de materia se transforman en energía cada segundo, similar a lo que sería un gigantesco reactor nuclear del orden de unos 100.000 billones de centrales nucleares convencionales.

La potencia solar que recibe el planeta Tierra (fuera de la atmósfera) es cerca de 173×10^{12} kWh una energía de 15×10^{17} kWh por año. Al atravesar la atmósfera, cerca del 53% de esta radiación es reflejada y absorbida por el nitrógeno, oxígeno, ozono, dióxido de carbono, vapor de agua, polvo y las nubes. Por lo tanto, al pasar esta radiación por una

distancia de 150 millones de km, se reduce esta cantidad y al final el planeta recibe una energía promedio a 3×10^{17} kWh al año, equivalente a 4 000 veces el consumo del mundo entero en un año. La irradiancia solar es la magnitud empleada para indicar el valor de la radiación incidente en una superficie. En el caso del Sol, se define como la energía solar recibida por cada m^2 en un segundo.(-Cózar 2006)

Una parte de la irradiancia solar que incide en el suelo proviene directamente del disco solar (irradiancia solar directa) y otra proviene del cielo y las nubes (irradiancia solar difusa). Para cielos despejados, la irradiancia directa predomina en las horas centrales del día, y varía con el coseno del ángulo cenital del sol (ley de coseno). Cuando el sol está oculto por las nubes o en los crepúsculos, casi toda la irradiancia es difusa. La suma de la irradiancia solar directa y difusa se llama irradiancia solar global y suele medirse con piranómetros en los observatorios meteorológicos.

Además de la intensidad de la radiación (energía por unidad de superficie, por unidad de tiempo y por unidad de ángulo sólido que transporta la radiación electromagnética), interesa conocer su longitud de onda o intervalo espectral, fundamental para conocer los efectos de la radiación. El sol emite un amplio espectro de radiaciones, desde rayos gamma hasta longitudes de onda largas, de tipo infrarrojo. La energía solar tiene longitudes de onda entre 0.15 micrómetros y 4 micrómetros, por lo que puede ionizar un átomo, excitar electrones, disociar una molécula y hacerla vibrar.

La atmósfera de la tierra constituye un importante filtro que hace inobservable, radiaciones de longitudes de onda inferiores a los 0.29 micrómetros por la fuerte absorción del ozono y el oxígeno. Ello nos libera de la ultravioleta más peligrosa para la salud. La atmosfera opaca a toda radiación infrarroja de longitud de onda superior a 24 micrómetros. Esto no afecta a la radiación solar, pero si a la energía emitida por la tierra que llega hasta los 40 micrómetros y que es absorbida. Este efecto se conoce como efecto de invernadero.

Hablando propiamente de nuestro país podemos afirmar que el sol nos ofrece cada día la energía equivalente a 0,5 litros de petróleo en cada metro cuadrado de la isla, si calculamos la cantidad para 110 mil kilómetros cuadrados que tiene Cuba, llegamos a la

conclusión que el país recibe diariamente en energía solar el equivalente a 55 millones de toneladas de petróleo, o lo que es lo mismo el potencial de radiación solar en Cuba es de aproximadamente (5 kWh/m²); parece increíble, pero estamos diciendo “en cada día”. Otra de las características de la radiación solar en Cuba es que su valor resulta casi igual en todo el país, ya que la diferencia en latitud desde el lugar más al Norte hasta el más al Sur es de sólo tres grados; por lo tanto, es utilizable en todo el territorio de igual manera en casi todo el territorio nacional. (Lorente)

En la actualidad existen varios tipos de calentadores solares, conforme avance la tecnología veremos más y más tipos de calentadores solares, pero hoy existen 4 tipos básicos de los que puedes disponer.

Cabe mencionar que los diferentes tipos de calentadores solares tienen el mismo objetivo, calentar agua con energía solar.(Alcubierre 2015)

❖ Calentador solar plano

También son conocidos como colectores solares planos, mucha gente los puede confundir con los paneles solares fotovoltaicos por su parecido. Los calentadores solares planos se dividen en dos tipos, con cubierta y sin cubierta, aunque estos últimos son mucho menos utilizados que los que presentan cubierta. El colector está compuesto por un plato absorbedor formado por una placa metálica, gran conductora de calor y de baja capacidad calórica, que tiene la función de absorber toda la energía solar posible. Esta placa tiene acoplada tubos por donde circula el agua que es calentada con la radiación solar que recibe el plato. Este colector tiene, además, una envoltura aislante y una cubierta transparente, figura #2.

La superficie del plato de absorción debe tener las características necesarias para que la mayor parte de la radiación que reciba sea absorbida, y muy poco reflejada, lo que se logra aplicándole diferentes tratamientos químicos y físicos, y finalmente un acabado de color negro mate. Actualmente se fabrican colectores con platos de superficie selectiva, la que absorbe un máximo de energía solar, y emite un mínimo de radiación infrarroja.

La cubierta del colector está destinada a dejar pasar la radiación solar hacia el plato de absorción, y disminuir la pérdida de calor por convección y radiación. Para facilitar el efecto aislante, la cubierta está formada por una o dos planchas de material transparente, vidrio o plástico, separadas convenientemente. La cubierta y la envoltura aíslan del medio ambiente al plato absorbedor. El material más frecuentemente usado para la cubierta es el vidrio, ya que posee la propiedad de dejar pasar casi toda la radiación solar y, por el contrario, es opaco a la radiación infrarroja emitida por el plato de absorción. También se usa el plástico (últimamente se emplea con mayor frecuencia el policarbonato). El colector va acoplado a un tanque-termo comúnmente confeccionado con metal y aislante de poliuretano. Con este tipo de calentadores puedes alcanzar temperaturas entre (30 y 70) °C, aunque dependiendo del diseño puedes alcanzar hasta los 100 °C. (PÉREZ and GONZÁLEZ 2008)



Figura#2: Calentador Solar Plano. Fuente: Cubasolar

❖ Calentadores solares de tubos de vacío

Actualmente son los más utilizados para el calentamiento de agua en los hogares, los calentadores de tubos al vacío tienen el mismo principio de trabajo que los colectores de plato plano, es decir, la radiación es recibida por el absorbedor y llevada en forma de calor hacia un tanque acumulador. La diferencia consiste en que el absorbedor está formado por tubos en los cuales se ha hecho vacío para disminuir las pérdidas de calor, y dentro del tubo van colocados las secciones del absorbedor. Algunos modelos están formados por tubos sencillos de vidrio, los cuales tienen en su interior un sector de plato

plano de absorción acoplado a un tubo metálico por donde fluye el líquido. En otros modelos, el absorbedor suele ser un tubo interior con tratamiento óptico selectivo, lo que mejora todavía más la eficiencia del colector. Entre el tubo interior y el exterior, ambos concéntricos, existe vacío. Existen varios modelos de colectores de tubos al vacío, en dependencia del movimiento del fluido y el método de transferencia de calor utilizado.

En todos los casos, los tubos van directamente acoplados al tanque-termo, o a un cabezal por donde fluye el agua o líquido que se desea calentar. En el caso de los tubos termosifónicos, el agua del tanque-termo fluye directamente por dentro del tubo interior, y su movimiento dentro del mismo se debe al cambio de densidad del agua más caliente (la cual sube) y la menos caliente (la cual baja). En este caso, la presión del termo-tanque se transmite al tubo de vidrio, figura #3.

Otra variante es el calentador de tubos al vacío con tubos calóricos, que ha significado un gran avance en la tecnología de transferencia de calor, aplicada en este caso al calentador solar. En este modelo por dentro del tubo de vidrio no fluye el agua, sino que tiene en su eje central un tubo calórico para transmitir el calor solar ganado al agua del tanque-termo o cabezal.

El tubo calórico forma un sistema cerrado de evaporación-condensación, y suele ser un tubo metálico largo y fino, herméticamente cerrado, el cual contiene un líquido en equilibrio con su vapor (gas) a determinada presión (vacío) y temperatura. Si la temperatura aumenta, aumenta la fase gaseosa; y si disminuye, aumenta la fase líquida. La presión (vacío) dentro del tubo se selecciona de tal forma que empiece la evaporación a 25 °C, lo que garantiza el funcionamiento del colector solar aún con baja radiación. La parte superior del tubo calórico va introducida en el agua del tanque-termo o cabezal. De esta forma, cuando la parte que está expuesta a la radiación solar (dentro del tubo de vidrio al vacío) se calienta, genera vapor y éste sube. Cuando el vapor se pone en contacto con el agua del tanque-termo, la cual está más fría, se condensa, bajando en forma líquida por gravedad a la parte baja del tubo calórico. De esta forma se completa el ciclo

Una de las mayores ventajas es que gracias a su diseño se reduce al máximo la dispersión de calor hacia el exterior. Sin embargo, su mayor desventaja es que los tubos son frágiles y duran menos que los calentadores solares de colector plano. Dependiendo del tamaño y el diseño, con este tipo de calentadores puedes alcanzar temperaturas entre los 50 °C y los 190 °C.(PÉREZ and GONZÁLEZ 2008)



Figura#3: Calentador Solar de Tubos al Vacío. Fuente: Cubasolar

❖ Calentadores solares de concentración

Este tipo de calentadores son totalmente diferentes a los dos anteriores. De hecho, se utilizan más en las industrias, el objetivo es proyectar la concentración de la energía solar hacia un punto determinado. Existen muchos campos solares que utilizan esta tecnología como medio de generación de energía térmica y eléctrica debido a su gran eficiencia y alto aprovechamiento de la luz solar. Dentro de estos existen cuatro tipos de colectores utilizados: Colectores Parabólicos Compuestos (CPC); Colector Cilíndrico Parabólico (CCP); Disco Parabólico y Torre Central.

❖ Colectores Parabólicos Compuestos (CPC)

Esencialmente consta de reflectores parabólicos que redirigen la radiación desde la apertura hasta el absorbente, como si se tratase de un embudo, es decir, todos los rayos incidentes son dirigidos al absorbedor.

En la figura #4, las mitades derecha e izquierda pertenecen a diferentes parábolas. El eje derecho de la parábola forma un ángulo θ_a con el plano medio del colector y el eje izquierdo forma un ángulo $-\theta_a$ con dicho plano, y sus focos son A y B respectivamente. En los puntos C y D la inclinación es paralela al plano medio del colector. Una de las características angulares de este diseño, es que todos los rayos que inciden sobre la apertura con ángulo de aceptación angular, que sean $|\theta| > \theta_a$ serán reflejados entre las dos superficies y expulsados al exterior. Esta propiedad implica que la concentración (si se asume que la reflectividad es igual a 1) es igual al límite termodinámico. (Serrano 2019)

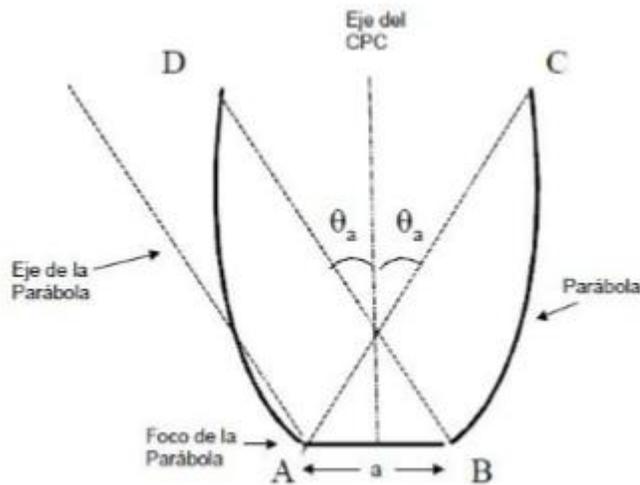


Figura #4: Colector Parabólico Compuesto. Fuente: Cubasolar

❖ Colector Cilíndrico Parabólico (CCP)

Los Colector Cilíndrico Parabólico son captadores concentradores solares de foco lineal, que transforman la radiación solar directa en energía térmica, gracias al calentamiento de un fluido de trabajo que puede llegar hasta los 400 °C en casos muy favorables. Por tanto, están englobados dentro de los colectores solares de media temperatura y constan de tres partes fundamentales:

- a. El Reflector Cilíndrico Parabólico: su misión es la de reflejar y concentrar sobre el Receptor la radiación solar directa incidente sobre la superficie. A grandes rasgos es un espejo curvo que forma en una de sus dimensiones una parábola, de forma que concentra sobre su línea focal toda la radiación reflejada. Entre los materiales usados para la reflexión, encontramos plásticos recubiertos con películas de plata o aluminio, chapas metálicas, o el más usado: vidrios sobre los que se depositan una capa de plata junto con un protector de base de cobre y pintura epoxi.
- b. El tubo de absorción o Receptor: es un elemento fundamental en un CCP, pues el rendimiento global del colector depende en gran parte de la calidad termodinámica del absorbente. Puede constar de un solo tubo o de dos tubos concéntricos. En este último caso, el tubo interior es metálico de elevada absorción ($> 90\%$) y de baja emisividad ($< 30\%$) en el espectro infrarrojo, lo que se traduce en un elevado rendimiento térmico. Por otro lado, el tubo exterior es de cristal y tiene el objetivo de reducir las pérdidas térmicas por convección del tubo metálico, así como de protegerlo frente a las condiciones meteorológicas adversas. Ambos tubos suelen llevar un tratamiento para aumentar la transmisividad de la radiación solar, lo que causa un aumento del rendimiento óptico del colector.

El seguimiento del Sol se hace con el objetivo de aprovechar la mayor parte de horas posibles de luz, de forma que la radiación solar llegue lo más perpendicularmente posible al colector y se mantengan en el foco lineal continuamente. Los CCP pueden tener seguimiento a dos ejes o a un único eje. Normalmente el seguimiento se realiza a un eje pues mecánicamente es más sencillo, esto implica menos costos y menores pérdidas térmicas por no haber tuberías pasivas. La orientación puede ser Norte-Sur o Este-Oeste. Los mecanismos de accionamiento que mueven al colector pueden ser eléctricos, hidráulicos y mecánicos

Este tipo de colectores, figura #5, tienen una eficiencia termodinámica muy buena en comparación con otros, y es por ello por lo que se usan en algunos procesos industriales

como en la producción de acetona, el procesado de residuos, en la industria láctea, así como en la producción de electricidad, donde existe gran madurez en investigación.

Aun así, una de las mayores desventajas de este diseño de colector es que sólo hace uso de la radiación directa, siendo incapaz de captar la radiación difusa. Por culpa de ello los costes se incrementan, pues es necesario un instalar un sistema de seguimiento solar que necesita un aporte secundario de energía. (Chamorro, Arellano et al. 2017)

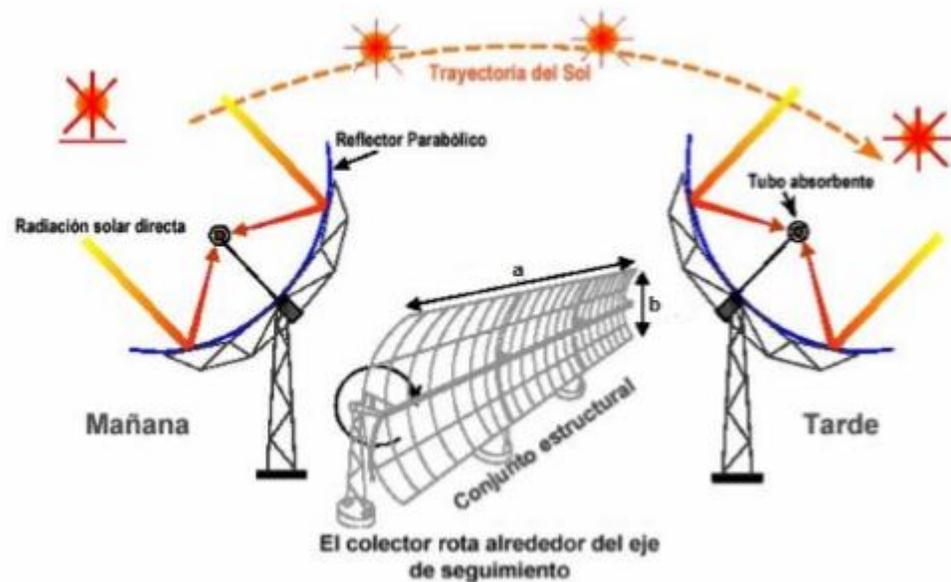


Figura #5: Captador Cilíndrico Parabólico. Fuente: Cubasolar

❖ Colector Solar Discos Parabólicos

Los sistemas de discos parabólicos, figura #6, se componen básicamente en un reflector o en un conjunto de reflectores, que tienen forma de paraboloides de revolución. Además, poseen un receptor situado en el foco puntual de dicho paraboloides, y de un sistema de generación eléctrica compacto (un motor o una turbina más un alternador). Por lo general, receptor y sistema de generación suelen formar parte de un mismo conjunto.

El principio de funcionamiento es el mismo que para los CCP, es decir, la radiación concentrada por el paraboloide incide sobre el receptor, donde se convierte energía térmica (pudiendo alcanzar los 1500 °C) que permite generar electricidad. Al igual que los CCP constan de tres partes principales que son:

- **Concentrador:** La forma de la superficie reflexiva en este tipo de sistema, es la de un paraboloide de revolución, cuyo tamaño depende de la potencia nominal y de la energía que se desea generar en un determinado tiempo y bajo unas condiciones de radiación determinadas.
- **Receptor:** Es un sistema de discos parabólicos que tienen dos funciones fundamentales, por un lado, la de absorber la radiación solar reflejada por el concentrador, y por el otro transferir la energía absorbida al fluido de trabajo de la máquina asociada. Hasta la fecha existen dos tipos de reflectores: tubos directamente iluminados por la reflexión de los rayos, y receptores de reflujo.

Con objeto de seguir la posición del sol en todo momento, los discos parabólicos realizan un seguimiento de éste en dos ejes. Se realiza según dos tipos de montaje:

- **Seguimiento en acimut-elevación,** en el que el movimiento se realiza según dos ejes, el vertical y el horizontal.
- **Seguimiento polar,** en el que el movimiento en un eje es muy lento, pues solo se debe seguir las variaciones estacionales del sol, y el movimiento en el otro eje es a velocidad constante.

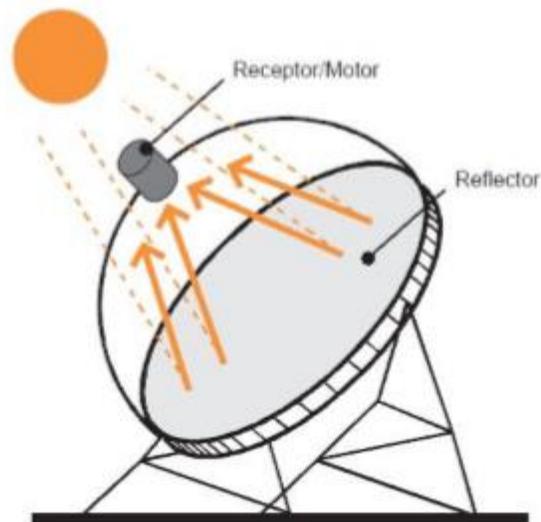


Figura #6: Captador de Disco Parabólico. Fuente Cubasolar

❖ Sistemas de Torre Central (CTC)

Este sistema se caracteriza porque el conjunto colector está compuesto por un grupo, más o menos numeroso, de concentradores planos individuales llamados helióstatos, los cuales dirigen la radiación solar concentrada hacia un receptor central situado en lo alto de una torre. Por tanto, la concentración de la radiación se produce en tres dimensiones, por lo que el valor de la razón de concentración es muy elevado, así como las temperaturas que se alcanzan, pudiendo llegar éstas a los 1500 °C. Este sistema, figura #7, está compuesto por:

- La torre: La función de la torre es la de servir de soporte al receptor, que normalmente debe situarse a una cierta altura sobre el nivel del campo de helióstatos para reducir las sombras y bloqueos entre éstos, y a diversos elementos auxiliares (blancos lambertianos, sistemas de medida, etc.). Hasta hoy, las torres construidas han sido de estructuras metálicas o de hormigón.
- El receptor: Es el dispositivo donde se produce la conversión de la radiación solar concentrada, en energía térmica

A parte de los componentes principales del sistema funcionamiento del sistema, se requieren una serie de equipos y sistemas auxiliares, como el sistema de caracterización de imágenes, blancos lambertianos para evaluación de imágenes, ajustes de offset, etc.

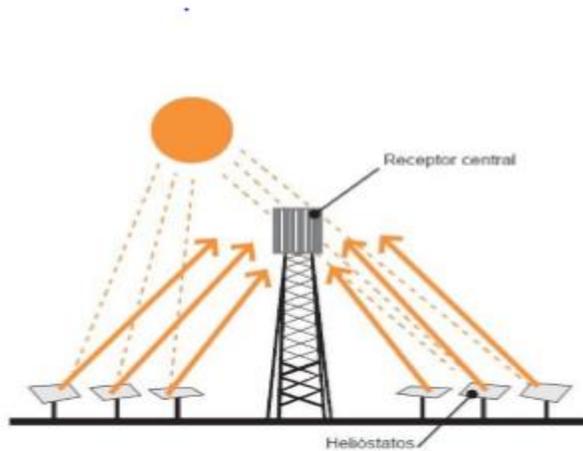


Figura #7: Sistema Torre Central. Fuente: Cubasolar

❖ Calentador compacto

Un calentador solar compacto o casero, figura #8, como también se le conoce debido a su relativa facilidad de fabricación, muchas personas han construido calentadores de este tipo desde sus propios hogares logrando gran efectividad en el producto. Está formado, en esencia, por un recipiente cerrado pintado de negro, con una entrada y una salida de agua. Este recipiente está convenientemente aislado por el fondo y los lados con cualquier material aislante, y por arriba (por donde le llega la radiación solar), con un vidrio u otro material transparente. El recipiente puede tener cualquier forma, pero preferentemente debe hacerse con un tubo de un diámetro adecuado, pues tolera más presión y es más fácil taponarlo por los extremos.

La envoltura o caja aislante del calentador solar puede hacerse también con materiales de la construcción, tales como ladrillos, bloques, etc. Como se muestra en la figura #7.

Como a veces el sellado de la cubierta no puede ser perfecto, debe dejarse la posibilidad de que salga el agua, en caso de que entre, mediante un pequeño agujero situado en la parte inferior de la base. Un calentador compacto bien construido y aislado, puede conservar el agua caliente inclusive por la noche.(Ruz 2017)

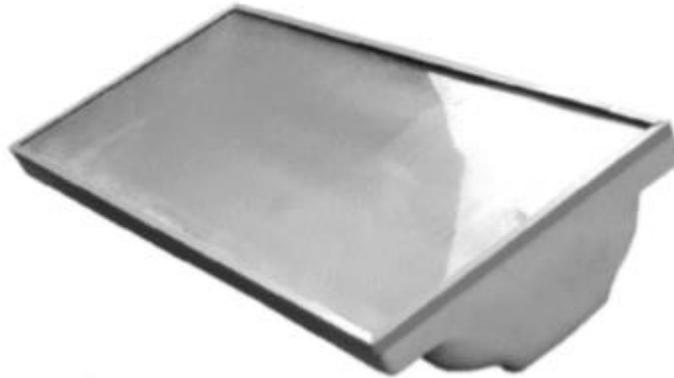


Figura #8: Calentador Compacto. Fuente: Cubasolar

Componentes de una instalación solar térmica

La función de una instalación de energía solar térmica es aprovechar la energía solar para generar calor. Los captadores solares de estas instalaciones capturan el calor de la radiación solar que incide sobre ellos para calentar un fluido. Las distintas maneras de aprovechar este fluido caliente permiten utilizar este tipo de energía renovable en múltiples aplicaciones.

➤ Captador solar

El captador solar es un tipo de panel solar diseñado para el aprovechamiento de la energía solar térmica, también recibe el nombre de colector solar. Los captadores solares son los elementos que capturan la radiación solar y la convierten en energía térmica, en calor

Los colectores solares se componen de los siguientes elementos:

- Cubierta: Es transparente, puede estar presente o no. Generalmente es de vidrio, aunque también se utilizan de plástico, ya que es menos caro y manejable, pero

debe ser un plástico especial. Su función es minimizar las pérdidas por convección y radiación y por ello debe tener una transmitancia solar lo más alta posible.

- Canal de aire: Es un espacio (vacío o no) que separa la cubierta de la placa absorbente. Su espesor se calculará con el fin de equilibrar las pérdidas por convección y las altas temperaturas que se pueden producir si es demasiado estrecho.
- Placa absorbente: La placa absorbente es el elemento que absorbe la energía solar y la transmite al líquido que circula por las tuberías. La principal característica de la placa es que debe tener una gran absorción solar y una emisión térmica reducida. Como los materiales comunes no cumplen con este requisito, se utilizan materiales combinados para obtener la mejor relación absorción / emisión.
- Tubos o conductos: Los tubos están tocando (a veces soldados) la placa absorbente para que el intercambio de energía sea lo más grande posible. Para los tubos circula el líquido que se calentará e irá hacia el tanque de acumulación.
- Capa aislante: La finalidad de la capa aislante es recubrir el sistema para evitar y minimizar pérdidas. Para que el aislamiento sea lo mejor posible, el material aislante deberá tener una baja conductividad térmica.

➤ Circuito primario

El circuito primario de una instalación de energía solar térmica, es circuito cerrado, transporta el calor desde el captador hasta el acumulador (sistema que almacena calor). El líquido calentado (agua o una mezcla de sustancias que puedan transportar el calor) lleva el calor hasta el acumulador. Una vez enfriado, retorna al colector para volverse a calentar, y así sucesivamente.

➤ Intercambiador de calor

El intercambiador de calor calienta el agua de consumo a través del calor captada de la radiación solar. Se sitúa en el circuito primario, en su extremo. Tiene forma de serpentín, ya que así, se consigue aumentar la superficie de contacto y, por tanto, la eficiencia.

El agua que entra en el acumulador, siempre que esté más fría que en el serpentín, se calentará. Esta agua, calentada en horas de Sol, nos quedará disponible para el consumo posterior.

➤ Acumulador

El acumulador es un depósito donde se acumula el agua calentada útil para el consumo. Tiene una entrada para el agua fría y una salida para la caliente. La fría entra por debajo del acumulador donde se encuentra con el intercambiador, a medida que se calienta se desplaza hacia arriba, que es desde donde saldrá el agua caliente para el consumo.

Internamente dispone de un sistema para evitar el efecto corrosivo, del agua caliente almacenada, sobre los materiales. Por fuera tiene una capa de material aislante que evita pérdidas de calor y está cubierto por un material que protege el aislamiento de posibles humedades y golpes.

➤ Circuito secundario

El circuito secundario o de consumo, (circuito abierto), entra agua fría de suministro y por el otro extremo el agua calentada se consume (ducha, lavabo, etc.). El agua fría pasa por el acumulador, primeramente, donde calienta el agua hasta llegar a una cierta temperatura. Las tuberías de agua caliente del exterior, deben estar cubiertas por aislantes.

➤ Bombas hidráulicas

Las bombas hidráulicas, en caso de que la instalación sea de circulación forzada, son de tipo recirculación (suele haber dos por circuito), trabajando una la mitad del día, y la pareja, la mitad del tiempo restante. La instalación consta de los relojes que llevan el funcionamiento del sistema, hacen el intercambio de las bombas, para que una trabaje las 12 horas primeras y la otra las 12 horas restantes. Si hay dos bombas en funcionamiento,

existe la ventaja de que en caso de que un deje de funcionar, está la sustituya, de modo que así no se puede parar el proceso ante el fallo de una de estas. El otro motivo a considerar, es que gracias a este intercambio la bomba no sufre tanto, sino que se la deja descansar, enfriar, y cuando vuelve a estar en buen estado (después de las 12 horas) se vuelve a poner en marcha. Esto ocasiona que las bombas puedan alargar durante más el tiempo de funcionamiento sin tener que hacer ningún tipo de mantenimiento previo.

En total, y tal como se define anteriormente, suele haber 4 bombas, dos en cada circuito. Dos en el circuito primario que bombean el agua de los colectores y las otras dos en el circuito secundario que bombean el agua de los acumuladores, en el caso de una instalación de tipo circulación forzada. Nada que ver con las bombas hidráulicas utilizadas en un sistema híbrido de energía solar y energía hidráulica.

➤ Vaso de expansión

El vaso de expansión absorbe variaciones de volumen del fluido caloportador, el cual circula por los conductos del captador, manteniendo la presión adecuada y evitando pérdidas de la masa del fluido. Es un recipiente con una cámara de gas separada de la de líquidos y con una presión inicial la que va en función de la altura de la instalación.

Lo que más se utiliza es con vaso de expansión cerrado con membrana, sin transferencia de masa en el exterior del circuito.

➤ Tuberías

Las tuberías de la instalación se encuentran recubiertas de un aislante térmico para minimizar la pérdida termodinámica con el entorno.

➤ Panel de control

Se dispone también de un panel principal de control en la instalación solar térmica, donde se muestran las temperaturas en cada instante (un regulador térmico), de modo que pueda controlarse el funcionamiento del sistema en cualquier momento. Aparecen también los relojes encargados del intercambio de bombas.

El llamado aire acondicionado solar utiliza la energía solar térmica como fuente de energía para conseguir refrigeración, esto es posible gracias a la técnica de refrigeración por absorción. Se trata de una de las aplicaciones con energía solar en la que mejor se adapta la oferta con la demanda ya que es precisamente cuando más calor hace, cuando más frío necesitamos generar.(Planas 2015)

Este sistema también tiene la capacidad de generar agua caliente o calentar espacios, por lo tanto, puede utilizarse durante todo el año, incluso con sistemas de calefacción solar térmica

El funcionamiento de cualquier máquina de absorción se basa en tres fenómenos físicos elementales:

- ❖ Cuando un fluido se evapora absorbe calor y cuando se condensa cede calor.
- ❖ La temperatura de ebullición de un líquido varía en función de la presión, es decir, a medida que baja la presión, baja la temperatura de ebullición.
- ❖ Hay establecidas parejas de productos químicos que tienen cierta afinidad a la hora de disolver el uno al otro.

Los sistemas de refrigeración por absorción, accionados con energía solar requieren de la unión de varios componentes para que se obtenga un adecuado funcionamiento. Entre los componentes principales se encuentran: los colectores solares, la máquina de absorción, la torre de enfriamiento, un tanque de agua caliente, un calentador auxiliar, un tanque de agua helada y el sistema de control.

El sistema de refrigeración por absorción basa su principio en la afinidad de ciertas sustancias que se absorben la una a la otra al entrar en contacto. Dos pares de sustancias son utilizados comúnmente en este tipo de instalaciones: bromuro de litio-agua (LiBr-H₂O) y amoníaco-agua (NH₃-H₂O). La primera de esas combinaciones es mayormente utilizada para aplicaciones asistidas por energía solar debido a las propiedades no tóxicas y no inflamables del agua como refrigerante y por la eficiencia en términos del gasto energético. (R. 2012)

Como se dijo anteriormente la combinación, bromuro de litio-agua (LiBr-H₂O), suele ser la más utilizada en estas máquinas y su ciclo en un sistema de refrigeración por absorción es:

El agua pasa por un circuito a baja presión y se evapora debido al calor (proceso de evaporación, seguidamente el vapor es absorbido por el bromuro de litio (proceso de absorción y esto provoca una solución concentrada o diluida que pasa por el generador. En el generador la solución se separa, disolvente y soluto, a través de una fuente de calor externa (energía térmica), a continuación, el agua va al condensador, otro intercambio donde se da el calor recibido del generador, después, al ser una solución concentrada en agua pasa por la válvula de expansión y vuelve al proceso de absorción, repitiéndose el ciclo nuevamente. En la figura #9, se muestra una representación esquemática del proceso y los componentes de estas enfriadoras.(R. 2012)

El uso de la energía solar en sistemas de acondicionamiento de aire requiere probar o desarrollar equipos novedosos de captación de radiación solar económicos y eficientes; ciclos termodinámicos adaptados especialmente para funcionar en las condiciones de operación propuestas, refrigerantes o mezclas de refrigerantes y absorbentes con aditivos especiales que permitan alcanzar altos rendimientos en el funcionamiento del ciclo, evaluar, simular y mejorar los procesos específicos del ciclo, tales como el propio proceso de absorción; además de sistemas de control que permitan una excelente integración de los sistemas de: captación solar, almacenamiento de energía, producción de frío, rechazo de calor, almacenamiento de frío y el subsistema auxiliar o de respaldo.

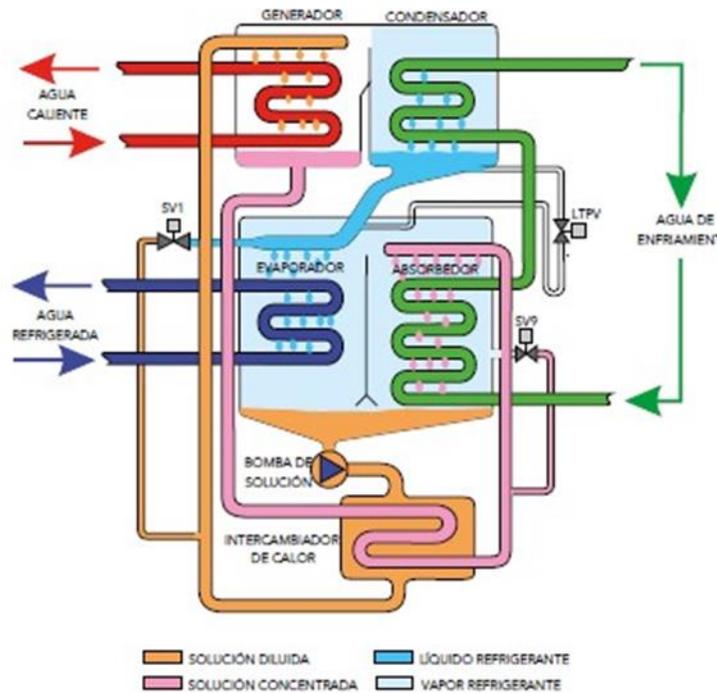


Figura # 9: Componentes de una enfriadora por absorción. Fuente: Catálogo General Yasaki.

La tecnología actual para acondicionamiento de aire consume mucha energía eléctrica, por lo que es necesario establecer principios y estrategias conducentes al uso eficiente de la energía, en este tema influiría de manera directa la técnica de control inteligente que se aplique al sistema. Es sabido que ciertos refrigerantes, como los freones, producen un impacto ambiental al liberarse al ambiente, lo cual afecta a la capa estratosférica de ozono y contribuye al efecto invernadero.

En las enfriadoras de agua por absorción el mayor consumo energético está localizado en el generador, pues es en este, donde se consume energía, como ya se ha hablado, de cualquier origen, fósil o renovable. Su demanda está en dependencia de la potencia frigorífica de la instalación donde se encuentra instalada, por eso es necesario un minucioso cálculo de cargas térmicas para que esta demanda sea lo más reducida posible y con ello se disminuir el consumo energético.

Según Thermax Cogenie(2015) y Catálogo general Yazaki por cada kW de frío producido con agua caliente, se necesitan a la entrada del generador una potencia térmica de 0,7 kW, equivalente a un flujo de 0.168 kg/s, con una temperatura de entrada entre (85 y 90) °C, con una diferencia de temperatura entre (5 y 5.6) °C, por lo que reviste suma importancia el dimensionamiento del campo solar. El vencimiento de la carga térmica y la eficiencia de la enfriadora dependen completamente de ella.(YAZAKI 2019)

➤ Análisis de la radiación solar.

En el análisis de la radiación solar media en los 12 meses del año, se tuvieron en consideración varios factores que afectan a esta directamente como: factor de corrección H para calidad del aire, intensidad de la radiación en el día y el factor correctivo K dependiente de la latitud e inclinación del captador, los resultados se introdujeron en una hoja de cálculo Excel, dando como resultado la radiación solar efectiva mostrada a continuación en la tabla # 1 y en la figura #10, se muestra la relación entre dicha radiación corregida y las temperaturas ambientes mensuales.

Tabla # 1: Valores de radiación solar efectiva. Elaboración propia.

Meses	Radiación Solar Media Sobre Superficie Plana (kWh/m ² /día)	Radiación solar efectiva
Enero	4,11	4,52
Febrero	5,09	5,26
Marzo	6,10	5,85
Abril	7,03	6,15
Mayo	7,16	5,86
Junio	6,85	5,41
Julio	7,08	5,79
Agosto	6,74	5,96

Septiembre	5,96	5,83
Octubre	5,14	5,56
Noviembre	4,25	4,87
Diciembre	3,71	4,25

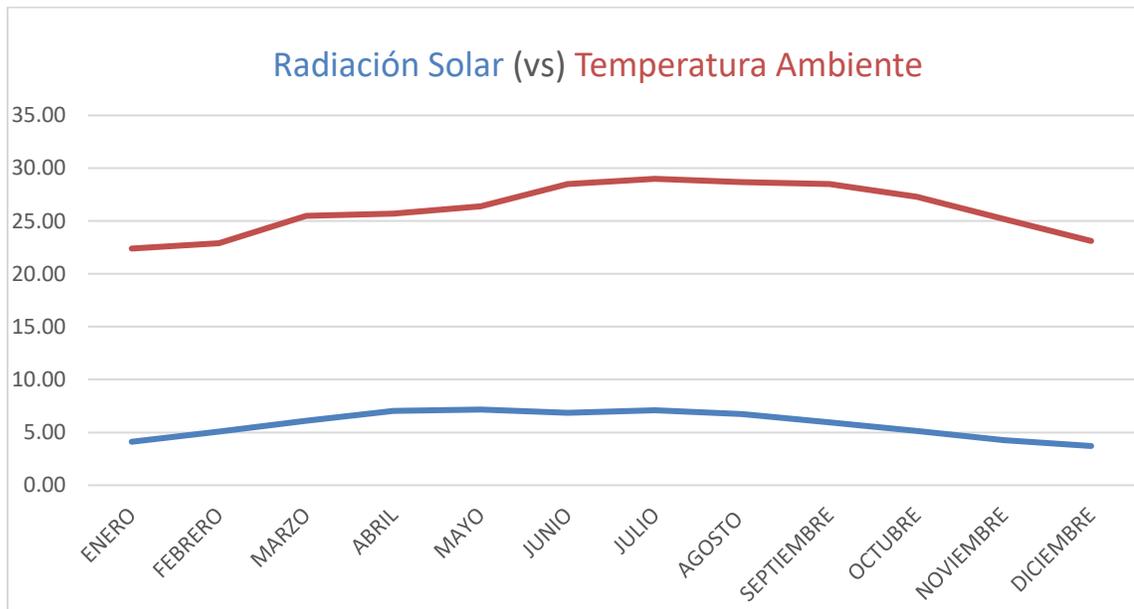


Figura #10: Relación entre la temperatura ambiente y la radiación solar efectiva mensual. Fuente Elaboración propia.

De la figura anterior se concluye que será una opción viable el empleo de máquinas enfriadoras por absorción ya que se observa que los mayores valores de radiación solar coinciden con los meses de mayor temperatura ambiente.

➤ Cálculo de la eficiencia de un colector solar plano

La eficiencia de los colectores solares se define como el cociente entre la energía térmica extraída por el fluido térmico a su paso por el colector y la radiación incidente sobre la superficie colectora. Como veremos, no deja de ser un concepto a explicitar con mayor detalle pues para cada colector cabe discutir que radiación (global, directa) y superficie

(total, apertura, absorbadora) debe utilizarse. La eficiencia depende del balance de energía que se produce en el colector y viene determinada por pérdidas de dos tipos: ópticas y térmicas. Las pérdidas ópticas son responsables de que solo una parte de la radiación recibida sea absorbida por el colector y, por tanto, potencialmente transferible al fluido. Las pérdidas térmicas, por convección y radiación del colector hacia sus alrededores, conllevan que solo una parte de dicho potencial sea aprovechado para calentar el fluido. Otra consideración importante es la temperatura a la que el colector suministra energía térmica al fluido caloportador. En general, conseguir temperaturas elevadas implica mayores pérdidas térmicas que solo pueden compensarse con diseños de colectores más sofisticados y caros, incluyendo colectores de concentración en los que la superficie de captación solar es distinta y mayor que la de absorción. La temperatura máxima alcanzable aumenta con la razón de concentración,(Serrano 2019).

Para aplicaciones que requieren un fluido a baja temperatura (<100 °C) los sistemas con captadores de placa plana son los más utilizados, empleándose también los de tubos de vacío. Los captadores de tubos de vacío se distinguen de los de placa plana, por sus menores pérdidas térmicas y mayor rendimiento, al encerrarse el absorbente solar en cápsula de vidrio de la que se extrae el aire; tiene en contra el coste, que es superior a los de placa plana. Por tanto, y dado que el interés de la investigación es el de aplicaciones de la calefacción doméstica e industrial para su utilización masiva, los estudios se plantearon con este tipo de colectores, dejando atrás los cilindro-parabólicos o los fabricados con otras tecnologías y empleados para media y altas temperaturas (superiores a 100 °C).

En la literatura consultada,(PÉREZ and GONZÁLEZ 2008), se plantea que el rendimiento de un colector se define de manera general como:

$$\eta_g = \eta_o - \frac{\alpha_1 \times (T_m - T_a)}{H_p} - \frac{\alpha_2 \times (T_m - T_a)^2}{H_p} \quad (1)$$

Donde:

η_g = Rendimiento total del colector solar,

η_o = Rendimiento óptico del colector, %

α_1 = Coeficiente de pérdidas lineales del colector, W/ (m²·K)

α_2 = Coeficiente de pérdidas cuadráticas del colector, W/ (m²·K)

T_m = Temperatura media de trabajo del colector, °C

T_a = Temperatura ambiente, °C

H_p = Radiación solar global, w/m²

La Norma ISO 9806:2017 propone un modelo estándar para describir el comportamiento térmico de los captadores de calentamiento de líquido. El modelo puede aplicarse a una gran variedad de colectores y tienen en cuenta otros efectos sobre el rendimiento de estos como: la velocidad del viento, la temperatura del cielo y la capacidad térmica efectiva. Los efectos del ángulo de incidencia se detallan para radiación directa y difusa, y para la radiación directa se consideran por separado cuando es necesario los ángulos longitudinal y transversal. La expresión general para la producción instantánea del captador es:

$$\frac{Q_u}{A_{cap}} = \eta_o \times [K_b \times (\theta L, \theta T) \times H_b + K_d \times H_d] - \alpha_1 \times (T_m - T_a) - \alpha_2 \times (T_m - T_a)^2 + \alpha_3 \times u' \times (T_m - T_a) + \alpha_4 \times (EL - \sigma \times T_a^4) - \alpha_5 \times \frac{dt_m}{d\theta} - \alpha_6 \times u' \times H_p - \alpha_7 \times u' \times (EL - \sigma \times T_a^4) - \alpha_8 \times (T_m - T_a)^4 \quad (2)$$

donde:

a_1 = Coeficiente de pérdidas lineales del colector, W/ (m²·K)

a_2 = Coeficiente de pérdidas cuadráticas del colector, W/ (m²·K)

a_3 = Coeficiente de velocidad del viento del coeficiente de pérdidas de calor, J/(m³·K)

a_4 = Coeficiente de pérdidas de calor por la irradiancia de onda larga

a_5 = Coeficiente de capacidad térmica efectiva, $J/(m^2 \cdot K)$.

a_6 = Coeficiente de la velocidad del viento del coeficiente de pérdidas cero, s/m.

a_7 = Coeficiente de la velocidad del viento de las pérdidas de calor por irradiancia de onda larga, s/m

a_8 = Coeficiente de pérdidas por radiación, $W/(m^2 \cdot K^4)$

η_o = Rendimiento óptico del colector sometido a radiación directa normal, %

$Kb(\theta L, \theta T)$ = es el modificador del ángulo de incidencia (IAM) para la radiación directa

Kd = es el modificador del ángulo de incidencia (IAM) para la radiación difusa

u' = velocidad reducida del aire $u'=u-3$, [m/s]

EL = Radiación de onda larga ($\lambda > 3 \mu m$), W/m^2

σ = Constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,6697 \times 10^{-8}$), $W/(m^2 \cdot K^4)$

Aunque en la práctica se acostumbra evaluar a los calentadores solares mediante la ecuación 1, es bueno conocer como influyen los demás factores, aunque en menor cuantía, sobre el rendimiento. Aquí sucede que las pérdidas lineales y cuadráticas dependen de los materiales utilizados en la construcción de estos.

El área de un colector está directamente relacionada con la demanda térmica previamente calculada por la ecuación de la cantidad de calor transmitida o recibida como:

$$Q = m \times Cp \times \Delta t \quad (3)$$

Por otra parte, dicha área es inversamente proporcional a la radiación solar incidente y a la eficiencia global o total del colector, como se muestra en la ecuación 3:

$$A_{cap} = Q / (H_p * \eta_g) \quad (4)$$

donde:

Q → Demanda energética (KJ/día).

A_{cap} → Área de captación. (m²).

H_p → Radiación solar de los meses más desfavorables (kW/m²).

η_g → Eficiencia global diaria del sistema (%).

Por tanto, el área total del campo o cantidad de paneles a instalar para vencer la carga demandada será:

$$N_c = (A_{cap} * FS) / A_c \quad (5)$$

donde:

FS → Factor de seguridad o proyección de demanda. (1-1.5).

A_c → Área de un colector. (m²). Tomada del catálogo del fabricante.

Para ejemplificar los planteamientos [https://instalaciones y eficiencia energética.com](https://instalaciones-y-eficiencia-energetica.com), (en línea) anteriores se expone el siguiente ejemplo, Tabla #2, para una radiación solar de 800 w/m²:

Tabla #2: Características de los paneles solares. Fuente: elaboración propia.

Panel solar	η_o	α_1 (w/m ² K)
1	0.76	3.20
2	0.79	6.16

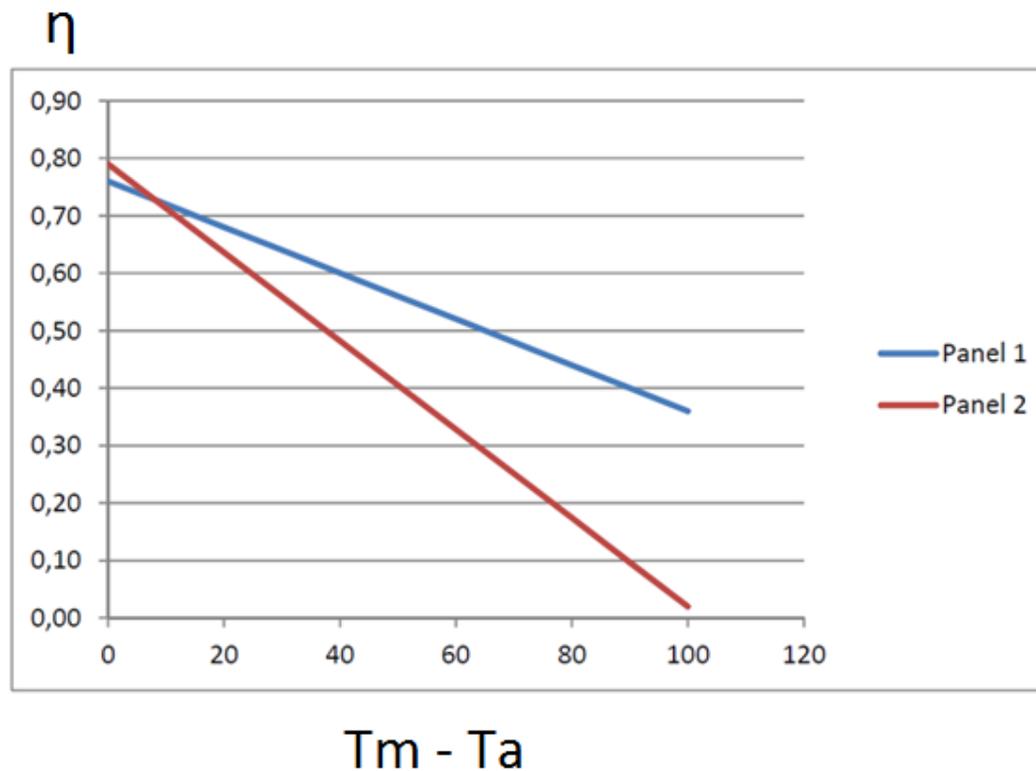


Figura # 11: Curvas de eficiencia para ambos paneles. Fuente: <https://instalaciones y eficiencia energética.com>.

Analizando la figura #11 podemos observar como la pendiente del panel 1 es menor y a medida aumenta la diferencia de temperatura entre la temperatura media del panel y la temperatura ambiente, el rendimiento de este será mayor.

Cuando se analizan estos mismos paneles para una radiación menor de 400 w/m^2 , se observa en la figura #12 mostrada a continuación, como el panel 2 a partir de los $50 \text{ }^\circ\text{C}$ su rendimiento se hace cero, es decir es incapaz de calentar el agua, sin embargo, el panel dos, aunque con muy bajo rendimiento sigue con el aporte de calor al fluido de trabajo.

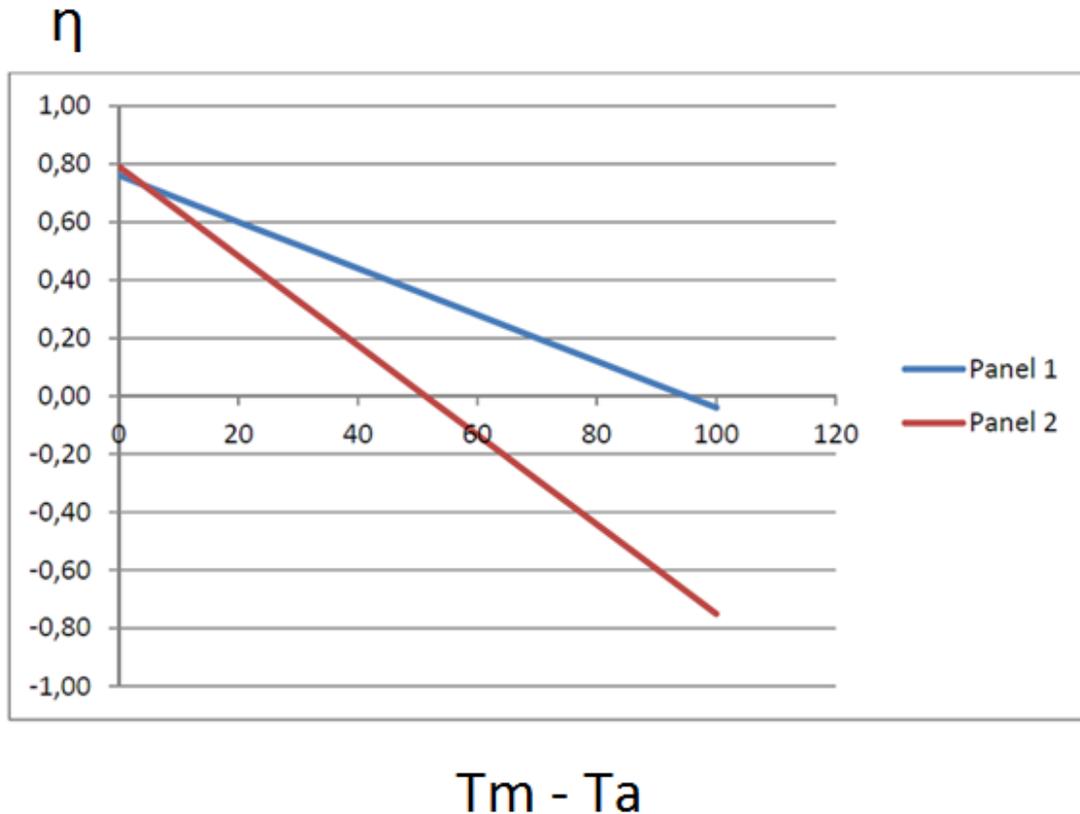


Figura #12: Rendimientos de los paneles solares para una radiación solar de 400 w/m^2 .
 Fuente: <https://instalaciones y eficiencia energética.com>.

CONCLUSIONES

Se realizó un análisis teórico sobre los calentadores solares de baja temperatura, menor de $100 \text{ }^\circ\text{C}$, para ser usados en enfriadoras de agua por absorción. Aunque las temperaturas de trabajo de estos equipos están por debajo de los $100 \text{ }^\circ\text{C}$, oscilan entre los $(85 \text{ y } 95) \text{ }^\circ\text{C}$, los colectores solares de placa plana no son eficiente para esta aplicación, ya que las pérdidas térmicas son mayores y para atenuar esto en los mismos se ubican láminas transparentes que hacen que estas disminuyan, pero en contrapartida aumenta la reflexión de la radiación incidente. Por su parte, en los colectores al vacío este problema se elimina al existir un vacío entre la cubierta y el área de captación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(2015). PLANTAS ENFRIADORAS DE AGUA THERMAX - SERIE COGENIE. Absorsistem.

Alcubierre, D. (2015). "Tipos de Calentadores Solares." Cemaer.

Bravo, D., et al. (2018). "Solar cooling in buildings. A state of the art " Revista Ingeniería de Construcción **33**(2): 115-126

Chamorro, A. L., et al. (2017). "Evaluation of a parabolic-cylinder solar water heater in Riobamba city

Avaliação de um aquecedor de água solar com cilindro parabólico na cidade de Riobamba " Polo del Conocimiento **2**(7): 958-979.

-Cózar, José Manuel L. (2006). Energía solar térmica Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.

Laino, L. D. (2009). Cambio Climático y Fuentes Alternativas de Energía en Cuba. P. Y. DESARROLLO.

Lorente, J. " La radiación solar " Curso de fotoprotección.

Martín, D. E. S. (2019). "Cuba: Entran en vigor nuevas normas jurídicas para el desarrollo de las fuentes renovables y el uso eficiente de la energía." Cubadebate.

Noticias, A. C. d. (2019). "Cuba impulsa parques solares para elevar cuota de energía renovable " Cubadebate.

PÉREZ, L. B. and M. Á. GONZÁLEZ (2008). Manual para el cálculo y diseño de calentadores solares.

Planas, O. (2015). "Componentes de una instalación solar térmica." Energía Solar.

R., C. A. I. (2012). "INTEGRACIÓN DE UN REFRIGERADOR POR ABSORCIÓN DOMÉSTICO A UN SISTEMA DE ENERGÍA SOLAR ".

Ramírez, C. A.-C. (2013). "Feasibility of the use of solar cooling of small capacity César " Feasibility of the use of solar cooling of small capacity César **35**(2): . 92 –100.

Ruz, F. C. (2017). "Comparación de herramientas de cálculo para instalaciones de agua caliente sanitaria mediante energía solar " **8**(3): 45-72.

Serrano, M. Á. L. (2019). COLECTORES SOLARES TÉRMICOS Área de Máquinas y Motores Térmicos Departamento de Ingeniería Mecánica

Villarig, J. M. (2018). "Renovable y Medio Ambiente." 91.

YAZAKI, C. e. (2019). "APROVECHAMIENTO DEL CALOR RESIDUAL PARA PRODUCIR REFRIGERACIÓN."