

*Universidad de Matanzas
Sede: "Camilo Cienfuegos"
Facultad de Ciencias Técnicas*



**USO DE LA ENERGÍA SOLAR EN SISTEMAS CENTRALIZADOS DE
AIRE ACONDICIONADO PARA CONFORT HUMANO**

Trabajo de Diploma en Ingeniería Mecánica

Autor: Eduardo Antonio Campo Rodríguez

Matanzas, 2023

*Universidad de Matanzas
Sede: "Camilo Cienfuegos"
Facultad de Ciencias Técnicas*



**USO DE LA ENERGÍA SOLAR EN SISTEMAS CENTRALIZADOS DE
AIRE ACONDICIONADO PARA CONFORT HUMANO**

Trabajo de Diploma en Ingeniería Mecánica

Autor: Eduardo Antonio Campo Rodríguez

Tutor: MsC. Jorge Luis Lamas Acevedo

Matanzas, 2022

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Por medio de la presente declaro que soy el único autor de este trabajo de diploma y, en calidad de tal, autorizo a la Universidad de Matanzas «Camilo Cienfuegos» a darle el uso que estime más conveniente.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Miembros del Tribunal:

Presidente

Secretario

Vocal

RESUMEN

En este trabajo de diploma se realiza el diseño y dimensionamiento de un campo solar térmico y otro fotovoltaico con el objetivo de suministrar agua caliente para activar el generador de una enfriadora de agua por absorción. Esta enfriadora forma parte de un sistema centralizado de aire acondicionado, cuya capacidad frigorífica es de 176 kW . Para ello se tiene en cuenta el efecto visual que provoca la instalación térmica y la fotovoltaica debido al área que ocupan, con valores de 262 m² y 528,84 m² respectivamente, lo que constituye uno de los mayores inconvenientes para su empleo en instalaciones hoteleras. Se efectúa un análisis de la radiación solar y temperatura ambiente en el lugar de estudio para un período de un año, desde octubre del año 2021 a septiembre del 2022. Este análisis muestra valores de radiación solar efectiva y temperatura ambiente media anual en la zona de estudio de 5,56 kWh/m²/día y 26,45 °C respectivamente. Mediante el análisis de factibilidad económica que se realiza, se muestra que con la implementación de estas tecnologías se logra un ahorro de 23 738,14 USD anualmente. El período de recuperación que se obtiene para el proyecto de inversión de la instalación de colectores solares térmicos y la fotovoltaica es de 3 y 16 años respectivamente.

Palabras claves: Energías renovables; refrigeración por absorción; paneles fotovoltaicos; colectores térmicos; energía solar.

ABSTRACT

In this diploma work, the design and sizing of a thermal solar field and a photovoltaic field are carried out with the aim of supplying hot water to activate the generator of an absorption water chiller. This chiller is part of a centralized air conditioning system, whose cooling capacity is 176 kW . For this, the visual effect caused by the thermal and photovoltaic installations is taken into account due to the area they occupy, with values of 262 m² and 528,84 m² respectively, which constitutes one of the biggest drawbacks for their use in hotel facilities. An analysis of solar radiation and ambient temperature is carried out in the study place for a period of one year, from October 2021 to September 2022. This analysis shows values of effective solar radiation and average annual ambient temperature in the area of study of 5,56 kWh/m²/day and 26,45 °C respectively. Through the economic feasibility analysis that is carried out, it is shown that with the implementation of these technologies, savings of USD 23,738.14 are achieved annually. The recovery period obtained for the investment project for the installation of solar thermal collectors and photovoltaic is 3 and 16 years respectively.

Keywords: Renewable energies; absorption refrigeration; photovoltaic panels; thermal collectors; solar energy.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	1
Capítulo 1 Estado del Arte.....	4
1.1 Fuentes renovables de energía.	4
1.2 Energía solar.....	7
1.2.1 Radiación solar.....	9
1.3 Tecnologías para la captación de energía solar.	12
1.3.1 Paneles solares térmicos.	12
1.3.2 Paneles solares fotovoltaicos.	18
1.4 Situación actual de la utilización de energía solar en Cuba y el mundo. 22	
1.4.1 Situación actual de la energía solar en el mundo.....	22
1.4.2 Situación actual de la energía solar en Cuba.	23
1.5 Sistemas de refrigeración por absorción.	24
1.5.1 Principio de funcionamiento y clasificación de sus ciclos.....	25
Capítulo 2 Materiales y métodos	29
2.1 Análisis de la radiación solar en la zona de estudio.....	29
2.2 Selección y características de la enfriadora de agua por absorción y sistema de alimentación.....	31
2.2.1 Activada mediante colectores solares térmicos.	31
2.2.2 Activada mediante paneles solares fotovoltaicos.	32
2.3 Dimensionamiento de la instalación solar.	32
2.3.1 Solar Térmica.....	32
2.3.2 Solar Fotovoltaica.	35
2.4 Impacto ambiental de los sistemas propuestos.	41
2.5 Costo económico de la instalación solar.	42
2.5.1 Movimiento de fondos o de caja.....	43
Capítulo 3 Análisis de los Resultados.....	47
3.1 Análisis de la radiación solar.	47
3.2 Campo de colectores térmicos.....	50
3.3 Campo de paneles solares fotovoltaicos.....	51
3.4 Análisis económico y medioambiental de los resultados.....	51
3.4.1 Sistema de colectores térmicos.	52
3.4.2 Sistema de paneles solares fotovoltaicos.	52
Conclusiones	54
Recomendaciones	55
Bibliografía	56
Anexos	60

INTRODUCCIÓN

El cambio climático es un problema real que en la actualidad, a nivel mundial, se persigue el objetivo de mitigarlo, cumpliendo con la meta de cero emisiones de gases de efecto invernadero. A pesar de esto, la temperatura media de los últimos seis años ha sido superior al nivel preindustrial.

La energía es un requisito fundamental para el desarrollo y crecimiento de cualquier país y su economía. Con el crecimiento demográfico a nivel mundial se hace necesario producir mayores cantidades de energía eléctrica, las cuales tienen gran parte de su base en la quema de combustibles fósiles. Debido al uso de estas fuentes de energía se expulsan grandes cantidades de gases contaminantes a la atmósfera aumentando el deterioro del clima a nivel mundial. Por esta razón, el desarrollo de las energías limpias es vital para combatir el cambio climático y limitar sus efectos más devastadores.

Cuba, debido a sus condiciones especiales propiciadas por el bloqueo económico y comercial, bajo el cual está sometido, debe adquirir los hidrocarburos necesarios para la producción de la energía eléctrica requerida para su desarrollo a sobreprecios considerables. Por esta razón, se encuentra en proceso de transformación de su economía con el objetivo de lograr un uso eficiente y racional de la energía. Para cumplir con estos propósitos medioambientales y económicos se promueve el uso de las fuentes renovables de energía.

En la actualidad, Cuba tiene en el turismo la principal fuente de ingresos de divisas al país y su principal renglón económico. Esto trae consigo una gran expansión de las instalaciones y edificaciones hoteleras, las que en países de clima tropical o mixto emplean más del 60% de la energía eléctrica en satisfacer las demandas de climatización. El turismo también es el responsable del 5 % de las emisiones globales de dióxido de carbono (Flensburg, 2019; González et al., 2017). Por las razones antes expuestas, se puede afirmar que no es suficiente el empleo de acciones para el uso racional de la energía sino que además se debe fomentar políticas que normen la utilización de

equipamientos más eficientes, que permitan consumir menos energía pero sin afectar la calidad del confort deseado.

La energía solar se ha introducido como una alternativa crucial para muchas aplicaciones, incluida la refrigeración y el acondicionamiento de aire para confort humano, y ha demostrado ser una fuente de energía excelente (Al-Yasiri et al., 2022). Para la producción de frío se puede utilizar la energía térmica captada del sol. Esto representa una gran ventaja, ya que principalmente en países de climas cálidos, durante el verano, es cuando se requieren mayores cantidades de producción de frío, pero también es cuando más energía térmica se puede aprovechar debido a las altas temperaturas.

Otra variante que se puede implementar para la producción de frío solar es la utilización de paneles solares fotovoltaicos para producir energía eléctrica. Esta se utilizaría luego para alimentar unas resistencias mediante las cuales se le transfiere la energía térmica requerida al fluido.

El principal uso de las fuentes de energía renovable en la refrigeración y la climatización se encuentra en una tecnología desarrollada hace más de 50 años, como son los sistemas de refrigeración por absorción. Su funcionamiento se basa principalmente en activar un fluido que contiene al refrigerante por medio de energía térmica, obtenida por cualquiera de las variantes que se expusieron con anterioridad.

En el presente trabajo se realiza una comparación de dos modalidades de suministro de energía térmica a una máquina de refrigeración por absorción. Para ello se tiene en cuenta el área de captación requerida para poder obtener la energía térmica necesaria mediante colectores solares térmicos y paneles solares fotovoltaicos, debido a que, en instalaciones hoteleras, el espacio disponible es reducido y además se requiere de un efecto visual agradable, siendo esta la **situación problemática** de esta tesis de grado.

Problema científico: ¿Cuál de las dos variantes propuestas será más factible emplear en instalaciones hoteleras teniendo en cuenta el efecto visual, área disponible e índices económicos de la inversión?

Hipótesis: Si se dimensiona la instalación solar en sus variantes térmica y fotovoltaica para las mismas condiciones energéticas se podrá conocer cuál de las tecnologías ofrece un nivel de factibilidad y empleo satisfactorio para activar una enfriadora de agua por absorción.

Objetivo general: Realizar el dimensionado de los sistemas de suministro de energía mediante colectores térmicos y fotovoltaicos que permitan realizar una comparación y análisis entre las dos variantes.

Objetivos específicos:

- Analizar el estado del arte, las características y empleos de las tecnologías que intervienen en los sistemas en cuestión.
- Analizar el comportamiento de la radiación solar en el lugar donde se realiza la investigación.
- Realizar el dimensionado de la instalación de colectores solares térmicos.
- Realizar el dimensionado del sistema de generación fotovoltaico.

Acometer el análisis de factibilidad e impacto medioambiental de los proyectos para las dos variantes.

Se aplicaron diferentes métodos teóricos y empíricos. Los **métodos teóricos** utilizados fueron:

- El histórico-lógico mediante el cual el autor transita por los antecedentes del objeto de estudio hasta llegar a la situación actual.
- El analítico - sintético que posibilita la interpretación de los datos e información de las investigaciones realizadas y los resultados obtenidos.

Entre los **métodos empíricos** utilizados se encuentra:

- La revisión de documentos que posibilita la selección y recopilación de la documentación necesaria para el desarrollo del tema en cuestión.

CAPÍTULO 1 ESTADO DEL ARTE

Durante este capítulo se realiza una revisión bibliográfica sobre las fuentes renovables de energía, haciendo especial énfasis en la energía solar. Se establecen los datos teóricos y conceptos necesarios para el estudio de un sistema de refrigeración por absorción asistido por energía solar. Se tratan los principios de funcionamiento de las tecnologías utilizadas para su aprovechamiento y empleo para el confort humano.

1.1 Fuentes renovables de energía.

Las energías renovables han sido respaldadas por la comunidad internacional con el Acuerdo de París suscrito en la Cumbre Mundial del Clima celebrada en diciembre del año 2015 en la capital francesa. El acuerdo, que entró en vigor en 2016, establece un objetivo global común, por el que los países firmantes se comprometan a reducir sus emisiones de forma que el aumento de la temperatura media del planeta a final del presente siglo quede por debajo de los dos grados, que es el límite por encima del cual, el cambio climático, tiene efectos más catastróficos, e incluso a intentar llevarlo a 1,5°C.

Ellas constituyen la solución idónea y más práctica para enfrentar el cambio climático. Debemos fijar el rumbo de la humanidad hacia un futuro de energía sostenible mediante el uso de las tecnologías existentes y la implementación de políticas fuertes y realistas (IRENA, 2019).

Una de las ventajas que proporcionan las energías renovables es la reducción de la dependencia energética. La naturaleza autóctona de las fuentes limpias implica una ventaja diferencial para las economías locales y los países con pocos recursos financieros con el objetivo de importar los combustibles fósiles necesarios para satisfacer su demanda de energía.

Las energías renovables se han convertido en el modo más económico de generación de energía para todos los mercados en el mundo. La disminución de los costos de las tecnologías de sistemas basados en generación renovable de energía se ha transformado en el pilar de los objetivos de descarbonización de la energía. Todas estas tecnologías disponibles en el mercado siguen reduciendo sus costos anualmente. En la actualidad, los

proyectos de generación de bioenergía, energía hidroeléctrica, eólica terrestre y solar fotovoltaica por lo general tienen costos inferiores a los proyectos de generación a partir de combustibles fósiles (IRENA, 2019).

Las energías renovables se definen como aquellas que se generan y regeneran de forma continua y son inagotables a escala humana, a diferencia de los combustibles fósiles, donde solo existen unas determinadas reservas, que pueden agotarse en un plazo determinado mucho menor que el plazo de su regeneración. Las principales formas de energías renovables que existen son: la biomasa, hidráulica, eólica, solar, geotérmica y las energías marinas. Las energías renovables provienen, ya sea de forma directa o de forma indirecta, de la energía del Sol. Una excepción de lo anterior es la energía geotérmica y la de las mareas (Schallenberg Rodríguez et al., 2008).

1. Biomasa.

La biomasa abarca cierta cantidad de materias orgánicas, constituye una fuente de energía renovable basada en la utilización de la materia orgánica formada por vía biológica o de los productos que se derivan de la misma. Además, el material orgánico presente en las aguas residuales, lodos de depuración, partículas orgánicas en los residuos sólidos, constituyen biomasa. En sí, el contenido energético de la biomasa proviene de la energía solar convertida por los vegetales durante el proceso de fotosíntesis. Es considerada una excelente alternativa debido a que a partir de ella se obtienen una gran variedad de productos (Vargas et al., 2022).

2. Energía hidráulica.

La energía hidráulica consiste en el aprovechamiento de la energía potencial y cinética proporcionada por los saltos de agua, ya sean naturales o construidos por el hombre, convirtiéndola en electricidad. Esta transformación ocurre por medio de unas turbinas que accionan un generador eléctrico y producen electricidad.

La hidroenergía constituye una forma de generación de electricidad económica y eficiente. A pesar de ello, la construcción de grandes hidroeléctricas requiere el estancamiento de enormes volúmenes de agua, lo que provoca un impacto ambiental en

ocasiones irreversible sobre las zonas implicadas. Sin embargo, las pequeñas, mini y micro centrales hidroeléctricas, son una solución muy satisfactoria para la generación de electricidad, tanto desde el punto de vista económico como ecológico (Bravo Hidalgo, 2015). Un ejemplo de estos estragos causados al medio ambiente lo podemos encontrar en China, donde se construyó la mayor central hidroeléctrica del mundo conocida como Las tres gargantas.

3. Energía eólica.

La energía eólica consiste en el aprovechamiento de la energía cinética de las corrientes de aire en su desplazamiento horizontal. Este desplazamiento de las corrientes de aire se produce por las diferencias de temperaturas de las masas de aire a diferentes altitudes creando diferencias de presiones, donde el aire circula de las zonas de altas presiones a las de bajas presiones. Esta energía cinética es convertida en electricidad por medio de hélices que accionan un mecanismo de engranajes conectados a un generador eléctrico.

Según Bravo Hidalgo (2015), aproximadamente el 2 % de la energía solar que llega a la tierra se transforma en energía eólica, pero solo es aprovechable una pequeña porción de ésta, ya que la mayor parte de estos vientos ocurren a grandes alturas o mar adentro.

4. Energía Geotérmica.

La geotermia es el fenómeno de generación de calor en el interior de la tierra que es transferido a la superficie. Por lo general, los lugares más apropiados para el aprovechamiento de este recurso están situados en los alrededores de los volcanes. Para su aprovechamiento es necesario conocer que existe una relación directamente proporcional entre la profundidad respecto a la corteza terrestre y el calor; es decir, a mayor profundidad la temperatura es mayor (Izquierdo Apolo & Carcelén Pacheco, 2022).

El principio físico que permite aprovechar este recurso para la generación eléctrica es la mezcla o encuentro de los fluidos con una fuente de calor existente en las profundidades, a consecuencia de ello, la temperatura y la presión de los fluidos aumentan lo que ocasiona su expulsión a la superficie, accionando turbinas para así generar energía

eléctrica. La energía geotérmica es considerada un recurso natural renovable ya que el calor de una fuente activa es restaurado continuamente de forma natural. Sin embargo, también es posible inyectar agua superficial y obtener el ciclo antes descrito (Izquierdo Apolo & Carcelén Pacheco, 2022).

5. Energía marinas.

Los océanos constituyen una enorme fuente de energía y existen varias alternativas para su aprovechamiento como son la undimotriz o energía de las olas, mareomotriz o energía de las mareas, energía de las corrientes marinas, energía del gradiente térmico y de gradiente salino. A pesar de su potencial hoy en día existe un desarrollo limitado de las tecnologías para el aprovechamiento de esta fuente renovable debido a sus altos costos.

6. Energía solar.

Es la energía generada por el sol y constituye una de las fuentes renovables más conocida y difundida en el mundo. Presenta dos formas fundamentales de captación, la energía solar térmica y la energía solar fotovoltaica. Los equipos utilizados para su aprovechamiento son de fácil traslado, montaje y mantenimiento. A pesar de las grandes ventajas que tiene su utilización, presenta también algunos aspectos que limitan su desarrollo como una tecnología completamente confiable. El carácter intermitente del sol debido a su rotación alrededor del planeta es uno de los factores que más influyen, además del porcentaje de radiación solar que se refleja, se absorbe o se dispersa y no se puede aprovechar. Otro aspecto a tener en cuenta es la intermitencia climática, fundamentalmente la nubosidad, que influye de manera directa en la cantidad de radiación directa que llega a la superficie terrestre.

1.2 Energía solar.

El sol es la fuente más abundante y permanente de energía en nuestro planeta. El astro rey es una enorme esfera de material gaseoso intensamente caliente; de hecho, es un reactor continuo de fusión. Este emite radiación de forma semejante a un cuerpo negro, a la temperatura de $5\,777\text{ °K}$ aproximadamente. Se considera que radia continuamente una potencia de $3,8 \times 10^{23}\text{ kW}$, con un flujo energético de $63,2\text{ MW/m}^2$, donde nuestro

planeta intercepta $1,7 \times 10^{14}$ kW . El Sol es el responsable de la existencia del viento, la evaporación de las aguas superficiales, la formación de nubes y las lluvias. Su calor y su luz son la base de numerosas reacciones químicas indispensables para el desarrollo de los vegetales y de los animales, cuyos restos, con el paso de los siglos, originaron los combustibles fósiles que conocemos, como son el carbón, el petróleo y el gas natural.

La energía proporcionada por el sol puede aprovecharse energéticamente de dos formas diferentes: como fuente de calor mediante energía solar térmica de media y baja temperatura y como fuente de electricidad mediante la energía solar fotovoltaica o la energía térmica de alta temperatura.

La energía solar térmica basa su funcionamiento en el calentamiento de un fluido, (generalmente agua o aire), mediante la radiación solar. Este fluido se hace circular a través de los paneles solares que captan la irradiación solar elevando la temperatura del fluido. Este se puede usar directamente, como por ejemplo, para calentar agua en piscinas o indirectamente, mediante un intercambiador de calor para la calefacción de una habitación.

Las plantas de energía solar de concentración (CSP – *Concentrating Solar Plants*, por sus siglas en inglés), basan su principio de funcionamiento en concentrar la radiación solar en un punto o línea, para dotar, de altas temperaturas, a un fluido de transferencia de calor con el objetivo de producir vapor y generar electricidad mediante ciclos de potencia convencionales utilizando turbinas de vapor, turbinas de gas o motores Stirling (Marín Silvestre, 2020).

Generalmente las sustancias utilizadas como fluido de trabajo por estas plantas de energía solar son aceites térmicos, agua, aire y sales fundidas. A pesar de utilizar las turbinas convencionales de generación de energía eléctrica, se diferencian fundamentalmente en la fuente de calor utilizada.

La energía solar fotovoltaica se basa en el efecto fotoeléctrico, es decir, en la conversión de la energía lumínica proveniente del Sol en energía eléctrica. Este efecto tiene lugar en las llamadas células fotoeléctricas, que son la unidad básica que componen los módulos o

paneles fotovoltaicos. Toda radiación de luz solar está compuesta por partículas llamadas fotones. Estas partículas presentan un valor de energía que depende de la longitud de onda de la radiación. Cuando el fotón es absorbido por la célula, la energía portada por el fotón se transfiere a los átomos que componen el material de la célula fotovoltaica. Esta nueva energía transferida permite que los electrones situados en las capas más alejadas sean capaces de desprenderse de su posición y entrar a formar parte del circuito eléctrico que se genera (López Ruiz, 2015).

Las células de los paneles fotovoltaicos están compuestas por un tipo de material, conocido como semiconductores. El principio de funcionamiento de estas células está basado en la unión (P-N), que consiste en conectar dos semiconductores. El material N se obtiene mediante el dopaje de un semiconductor para cargarlo negativamente y el material P se obtiene igualmente mediante el dopaje de un semiconductor pero cargándolo positivamente. Ambas capas separadas son eléctricamente neutras, pero al ser unidas, justamente en la unión (P-N), se genera un campo eléctrico debido a los electrones libres del semiconductor tipo N que ocupan los huecos de la estructura del semiconductor tipo P.

1.2.1 Radiación solar.

El Sol, de forma directa o indirecta, es el origen de todas las energías renovables, exceptuando la energía mareomotriz y la geotérmica. La energía del Sol se desplaza a través del espacio en forma de radiación electromagnética, llegando una parte de esta energía a la atmósfera. De toda la energía que llega a la atmósfera existe una gran porción que no es aprovechable debido a los diferentes fenómenos que enfrenta la radiación solar en su paso por esta.

La intensidad de la radiación solar en el borde exterior de la atmósfera, teniendo en cuenta la distancia promedio entre la Tierra y el Sol, se llama constante solar, y su valor medio es $1\,367,7\text{ W/m}^2$. Para describir y caracterizar la radiación solar que llega a la superficie terrestre se emplean dos términos fundamentales, irradiancia e irradiación solar.

La irradiancia se expresa en W/m^2 y es la magnitud que describe la potencia incidente por unidad de área de todos los tipos de radiación electromagnética (Pérez Martínez et al., 2017). La potencia de la radiación varía según el momento del día, las condiciones atmosféricas que la amortiguan y la latitud. Se puede asumir que en buenas condiciones de irradiación el valor es de aproximadamente $1\ 000\ W/m^2$ en la superficie terrestre.

La cantidad de esta radiación que llega a la superficie de la Tierra en un área específica y en un tiempo determinado se conoce como irradiación solar (Wh/m^2) y depende de muchos factores, tales como la hora del día, latitud, transmitancia de la atmósfera, el clima y las estaciones (Moreno Figueredo, 2021).

La radiación solar se puede clasificar según su comportamiento durante el recorrido de la atmósfera en radiación directa, difusa, reflejada y global. La radiación solar directa es aquella fracción de la irradiación solar que atraviesa la atmósfera terrestre sin sufrir ninguna modificación en su dirección original. La radiación difusa es la componente de la irradiación solar que llega a la superficie terrestre después de haber incidido con cualquier elemento de la atmósfera, ya sea polvo, nubes, gases y otros. La radiación reflejada, como dice su nombre, es la que se refleja en la superficie terrestre, tomando gran importancia en las zonas costeras o cerca de masas de agua, que es una de las condiciones a tener en cuenta en la zona de la península de Varadero, donde se fundamenta este trabajo. La radiación global es la suma de todas las radiaciones anteriores que inciden sobre una superficie. La radiación solar se reduce al llegar a la superficie del planeta aproximadamente un 30 % como promedio. El ciclo de la radiación solar se puede observar en la figura 1.1.

El planeta recibe una energía electromagnética de los rayos del Sol un promedio de $800\ kWh/m^2/año$ como mínimo en zonas más cercanas a los polos. En la medida que las zonas se acercan al ecuador, la radiación solar se incrementa hasta $1\ 700\ kWh/m^2/año$ (Stolik Novygrad, 2019). La distribución promedio anual y diaria de la radiación solar en el mundo se puede observar en la figura 1.2.

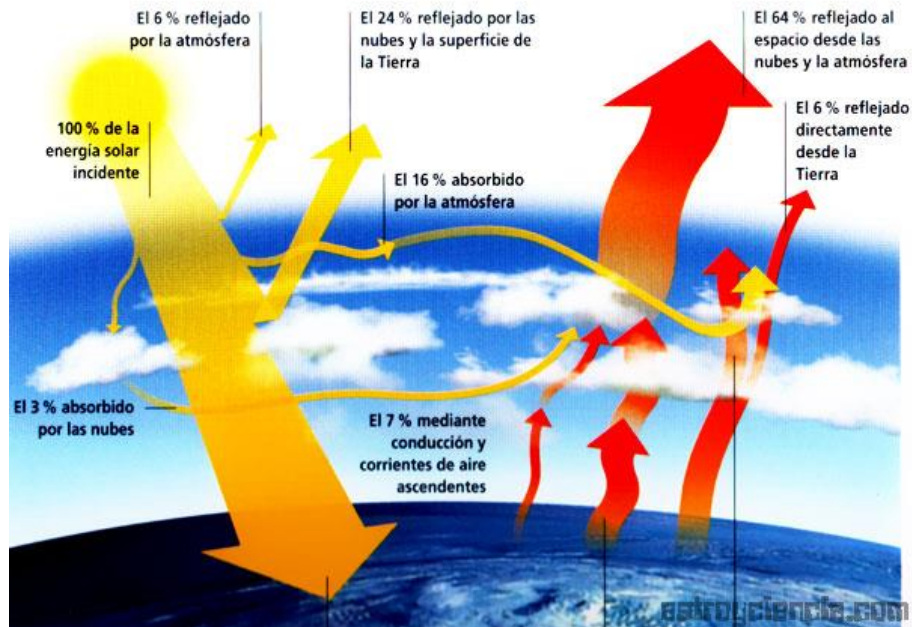


Figura 1.1 Ciclo de la radiación solar. Fuente: www.astrociencia.com.

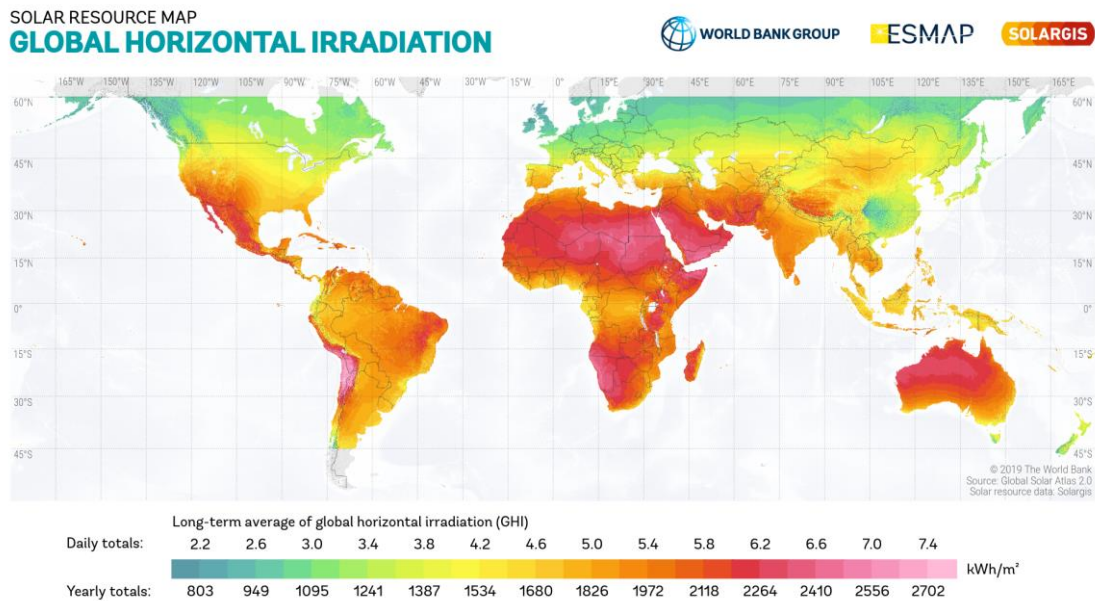


Figura 1.2 Distribución promedio anual y diaria de la radiación solar en el mundo.

Fuente: Global solar atlas 2.0

La radiación difusa es, en gran medida, menor en zonas desérticas o sin nubes, aproximadamente un 15 % en relación a la radiación total. En zonas que presentan mayor

nubosidad, como es el caso de Cuba, puede llegar hasta 40 %. La componente directa de la radiación solar en Cuba presenta un promedio de 65 % y la componente difusa es relativamente alta debido a la dispersión selectiva, que es mayor en las longitudes de onda que se corresponden con el color azul visible de los rayos del Sol. En Cuba, debido a la alta nubosidad, la radiación difusa puede llegar al 40 % del total, por lo que disminuye notablemente el rendimiento que pueden alcanzar los sistemas fotovoltaicos (Stolik Novygrad, 2019). La distribución promedio anual y diaria de la radiación solar en Cuba se puede observar en la figura 1.3.



Figura 1.3 Distribución promedio anual y diaria de la radiación solar en Cuba. Fuente: Global solar atlas 2.0

1.3 Tecnologías para la captación de energía solar.

La radiación solar puede ser aprovechada por medio de paneles solares térmicos o colectores solares y paneles solares fotovoltaicos, siendo utilizables en disímiles funciones tales como la climatización.

1.3.1 Paneles solares térmicos.

La primera referencia que se tiene de la utilización de la tecnología del colector solar data de 1767, donde Horace de Saussure inventó lo que el mismo llamó “la caja caliente”. La

misma consistía en una caja acristalada por la parte delantera donde entran los rayos solares y el interior estaba pintado de negro. Toda la superficie de la caja estaba cubierta con material aislante excepto la cara de cristal, para retener el calor en el interior. A pesar de esto, no fue hasta el siglo XIX que se optó por utilizar estas cajas negras como alternativas a los calentadores de carbón o de gas en Estados Unidos. En 1891 es patentado el primer calentador solar de agua por Clarence Kemp. Este tipo de calentador combinaba la tecnología de la caja caliente con tanques expuestos al sol. Este sistema ha evolucionado a través de la historia hasta nuestros días, buscando siempre mayor eficiencia y costos más económicos (Carbonell, 2015).

Colectores solares de baja temperatura.

Colector de placa plana:

El colector de placa plana o *flat plate collector* (FPC) transforma la energía solar en térmica por medio de un panel compuesto por una cubierta de vidrio (acristalamiento) que permite el paso de la radiación solar incidente, que es interceptada y absorbida por el revestimiento de la placa absorbente. Posteriormente, la energía térmica convertida se transfiere a la matriz de tubos y luego al fluido caloportador que circula dentro de los tubos para ser almacenado o consumido de manera inmediata (Hussain et al., 2018). La cubierta transparente reduce las pérdidas por radiación y convección del colector ya que el vidrio es transparente a la radiación de onda corta recibida del sol, pero es casi opaco a la radiación térmica de onda larga emitida por la placa absorbente (efecto invernadero). La parte inferior de la placa absorbente y el lateral de la carcasa están bien aislados para reducir las pérdidas por conducción y también por convección (Islam & Morimoto, 2018). Los FPC incluyen colectores de posición fija o estacionarios que no requieren un sistema de seguimiento solar, lo que trae como consecuencia que comparativamente recibe menos energía por unidad de área del colector. A pesar de ello, su capacidad para absorber la radiación solar directa y difusa contribuye a superar esta desventaja (Hussain et al., 2018). Estos dispositivos presentan un diseño muy simple por lo que son la tipología más económica en el mercado y trabajan en un intervalo de baja temperatura

(<100°C) (Barone et al., 2019). La composición de un colector de placa plana se presenta en el anexo 1-a.

Colector de tubos al vacío:

El colector de tubos al vacío o *evacuated tube collector* (ETC) está conformado por una serie de tubos de vidrio, en donde cada uno está compuesto por dos tubos concéntricos. El tubo interior consta de un revestimiento absorbente selectivo y está aislado del tubo exterior mediante el principio de sellado al vacío. Tanto el tubo interior como el exterior tienen propiedades mínimas de reflexión de la radiación solar (Islam & Morimoto, 2018). El sellado al vacío se utiliza para minimizar la pérdida de calor por convección y conducción, además contribuye a evitar la degradación climática de sus materiales internos (Suman et al., 2015). Gracias a esta característica, que representa una ventaja técnica respecto a los FPC, puede alcanzar temperaturas más elevadas y mejores rendimientos. La temperatura de trabajo de los colectores de tubos al vacío puede alcanzar valores de 120 °C (Kumar et al., 2021). Además, la alta eficiencia térmica y los costos relativamente bajos de los ETC constituyen las principales razones de su dominio en el mercado. Los colectores solares de tubos al vacío son del tipo más popular de colectores solares térmicos que se utilizan según el último informe publicado por la Agencia Internacional de la Energía (IEA) sobre el estado de implementación global de la tecnología solar térmica, “*Solar Heat Worldwide*” (Aramesh & Shabani, 2020). Existen dos tipos principales de colectores de tubos al vacío:

1. ETC del tipo *heat-pipe*.

Este tipo de colector basa su funcionamiento en el principio conocido como ciclo de evaporación-condensación. En este caso el tubo interior es de cobre que se llena con una pequeña cantidad de líquido altamente volátil que se evapora a bajas temperaturas. Cuando la radiación solar incide sobre la placa absorbente, el fluido de trabajo dentro del tubo se evapora, lo que hace que se eleve a la parte superior del tubo donde se encuentra el condensador (Hussain et al., 2018). Aquí el vapor se condensa liberando el calor hacia el circuito principal y el líquido regresa a la sección del evaporador o parte inferior del

tubo para completar el ciclo de circulación (Shafieian et al., 2018). El esquema de este tipo de colector se puede ver en el anexo 1-b.

2. ETC de flujo directo.

Estos colectores se caracterizan por una construcción diferente del cilindro interior. Presenta un tubo en forma de U generalmente de cobre por donde entra y sale el fluido. Estas tuberías de cobre están cubiertas con un recubrimiento selectivo para acelerar la tasa de absorción de energía solar y reducir la pérdida de calor por radiación. El líquido frío ingresa al circuito en la entrada de fluido, circula a través de las tuberías calentadas por energía solar dentro del aislamiento de vacío y se descarga en la salida de fluido (Hussain et al., 2018). Su composición se puede observar en el anexo 1-c.

Colector parabólico compuesto:

El colector parabólico compuesto o *compound parabolic collector* (CPC) está compuesto por dos reflectores parabólicos que comparten el mismo centro colocados a ambos lados del tubo absorbedor y su esquema se refleja en el anexo 1-d. La característica principal de tales colectores es su capacidad de reflejar la radiación solar recolectada a lo largo del área de apertura del concentrador y dentro del ángulo de aceptación del colector con una gran dispersión angular y concentrarla en el receptor del sistema (Barone et al., 2019). Las características particulares en su diseño permiten que este colector aproveche de manera más eficiente la componente difusa de la radiación y disminuye los ajustes de seguimiento continuo (Waghmare & Gulhane, 2019). Se han analizado varias cuestiones de diseño en estos colectores para elevar las temperaturas de trabajo y mejorar la eficiencia térmica, esto se puede lograr al añadirle la tecnología de vacío (Jiang et al., 2020).

Colectores solares de media temperatura.

Colector de placa plana de vacío:

El colector de placa plana de vacío o *evacuated flat plate collector* (EFPC) combina las ventajas del colector FPC y del colector ETC y está compuesto por una carcasa de metal

de aluminio, una placa de vidrio o acristalamiento, una placa absorbente, un serpentín de cobre para el intercambio de calor y una placa inferior, su composición se puede observar en el anexo 1-e. La placa de absorción de calor y el tubo de cobre están unidos por medio de una soldadura láser que mejora el coeficiente de transferencia de calor entre estos elementos. Gracias a su diseño y la utilización de la técnica de sellado al vacío se eliminan las pérdidas por conducción y convección de calor y además, presenta una menor área superficial que el colector ETC. En general, los EEPC están mucho más calificados que otros colectores solares para cumplir con los requisitos de aplicaciones de temperatura media (120–180 °C), incluido los enfriadores de absorción (Gao et al., 2020).

Colector cilíndrico parabólico:

El colector cilíndrico parabólico o *parabolic trough collector* (PTC) está formado por una lámina en forma de parábola que refleja la radiación solar directa y la concentra en el tubo receptor ubicado a lo largo de la línea focal. Por lo general, el tubo absorbente de metal es fabricado de cobre y cubierto de materiales selectivos que mejora la transferencia de calor al interior del tubo por donde circula el fluido caloportador. Este conducto absorbente es aislado al vacío con un tubo de vidrio para disminuir las pérdidas térmicas por convección pero pueden originarse pérdidas ópticas por efecto de la reflexión nada despreciables, aunque este problema se puede solucionar a través de un revestimiento anti reflectante (Carrión Chamba et al., 2022). Los PTC van acoplados a un sistema de seguimiento del sol y pueden estar orientados tanto en la dirección Este-Oeste siguiendo la dirección Norte-Sur, como Norte-Sur siguiendo la dirección Este-Oeste. Su orientación viene determinada por la función que desempeña o la necesidad de mejorar su rendimiento según la estación del año (Kumar et al., 2019). Para procesos industriales o en aplicaciones comerciales, estos sistemas de tamaño pequeño trabajan con una temperatura media de 300 °C y abarcan un área de recolección cercana a los 250 m². Para PTC de gran tamaño el área de recolección puede estar en el rango de 500 a 1 000 m², con una temperatura de trabajo que puede superar los 400 °C con una buena eficiencia (Zarza Moya, 2018). Según Hussain et al. (2018) estos sistemas se puede utilizar a pequeña y mediana escala, como calefacción de procesos industriales,

calefacción de espacios, calefacción doméstica y sistemas de refrigeración por absorción, con temperaturas de 100 a 250 °C. Su esquema se muestra en el anexo 1-f.

Colector lineal fresnel:

El colector lineal Fresnel o *linear Fresnel collector* (LFC) está compuesto por un receptor, formado por varios espejos lineales planos, que devuelven una parábola fragmentada debido a su diferente pendiente y un absorbedor tubular por el que circula el fluido caloportador (Barone et al., 2019). Su funcionamiento consiste en concentrar la radiación solar que incidente en el sistema de espejos al punto focal que se ubica en el absorbedor y este le transfiere la energía térmica al fluido de trabajo. En busca de optimizar el rendimiento de estos colectores se han creado algunos diseños que incluyen un CPC en la parte superior del receptor, gracias a ello se ha comprobado que la temperatura de la radiación es uniforme alrededor de casi todo el tubo o receptor (López-Núñez et al., 2020). Las principales ventajas de un LFC en comparación con un PTC son su menor costo de inversión y un mejor factor de cobertura de la tierra, mientras que la principal desventaja es una menor eficiencia debido a restricciones ópticas y geométricas como el sombreado y bloqueo de la radiación entre los espejos (Zarza Moya, 2018). Para fines industriales como la generación eléctrica, los LFC trabajan en un rango de temperatura media ($60\text{ °C} < T < 250\text{ °C}$) (Sakthivadivel et al., 2021). Su estructura se muestra en el anexo 1-g.

Colectores solares de alta temperatura.

Reflector de disco parabólico:

El reflector de disco parabólico o *parabolic dish reflector* (PDR) es un colector de tipo de punto focal y está formado por discos de espejos en forma de parábola con un sistema de seguimiento de dos ejes que concentra las radiaciones solares en el receptor que luego de absorber la radiación transmite la energía térmica al fluido caloportador circulante a través de un intercambiador de calor (Barone et al., 2019). La composición de este se muestra en el anexo 1-h. Esta tecnología puede alcanzar rangos de temperatura por encima de los 1 500°C debido a que la orientación siempre mira hacia el sol y también

tiene una relación de concentración entre 600 y 2 000 (Kumar et al., 2019). La aplicación más habitual de este tipo de concentrador es para la generación de electricidad. La energía térmica transferida al fluido de trabajo (generalmente hidrógeno o helio) se convierte en energía mecánica a través de un motor Stirling que impulsa un pequeño generador de electricidad (Zarza Moya, 2018).

Receptor de torre central:

El receptor de torre central o *central tower receiver* (CTR) se basa en un gran número de elementos reflectantes llamados helióstatos que reflejan y enfocan la radiación solar directa sobre el receptor ubicado en lo alto de una torre situada en el centro. Los helióstatos están equipados con un sistema de seguimiento solar individual para optimizar el aprovechamiento de la radiación solar (Hussain et al., 2018). La energía térmica absorbida por el receptor es transferida al fluido caloportador que se utiliza para la generación de energía térmica industrial o energía eléctrica por medio de una turbina de vapor. El receptor central es muy eficiente para altas temperaturas debido a que es uno solo en lugar de un sistema de tubos absorbedores y tiene una relación de concentración de 300 a 1 500 (Kumar et al., 2019). Esta tecnología en sistemas comerciales presenta una temperatura de trabajo cercana a los 600 °C, aunque se pueden alcanzar temperaturas por encima de los 1 000°C ya que el flujo solar que incide en el receptor es significativamente mayor que en un PTC (alrededor de 1 MW/m²) (Zarza Moya, 2018). En el anexo 1-i se puede observar la estructura de esta tecnología.

1.3.2 Paneles solares fotovoltaicos.

El efecto fotovoltaico fue descubierto en 1839 por el francés Alexandre Edmond Becquerel. En 1883 Charles Fritts fabricó la primera célula fotovoltaica de estado sólido, recubriendo una placa de cobre con selenio, esta fue recubierta con una fina capa de oro para formar el empalme. Este dispositivo solo presentaba una eficiencia rondando el 1 %. En el año 1946 Russell Ohl patentó la moderna célula solar semiconductor de unión. La era moderna de la célula fotovoltaica llegó en 1954 en los Laboratorios Bell a través de Daryl Chaplin y Gerald Pearson (Righini & Enrichi, 2020).

En la última década, la investigación y el desarrollo en las tecnologías fotovoltaicas se han centrado en nuevos materiales y diseños de celdas avanzadas con el objetivo de reducir las cantidades de materiales, aumentar las eficiencias y reducir los costes. La evolución de las tecnologías de las células solares se divide generalmente en tres generaciones.

Primera generación.

La primera generación de celdas solares se basa principalmente en cristales u obleas de silicio. Esta generación está bien establecida ahora y es comercialmente madura, cubriendo alrededor del 80 % del mercado solar. La fotovoltaica de silicio es considerada como un punto de referencia ya que el silicio cristalino es el material más común para las células solares comerciales y combina costos asequibles, una buena eficiencia, además de estabilidad y robustez a largo plazo. Dentro de esta generación se encuentran dos tecnologías, la de silicio monocristalino y silicio policristalino.

Silicio monocristalino (mono c-Si): El principal método de fabricación de células monocristalinas es el proceso Czochralski que consiste en cultivar, a partir de una semilla de silicio de alta pureza, un lingote de silicio. Luego, el lingote se dimensiona en obleas, produciendo células fotovoltaicas que pueden alcanzar eficiencias de hasta el 25 %, (Cremasco et al., 2022). Estas obleas se encuentran dopadas con uniones p-n. Esto forma la estructura general de la celda solar, que puede generar una corriente de 35 mA, 0,55 V en condiciones de iluminación completa (Kumar et al., 2020). El principal obstáculo de las células solares mono-Si es el alto costo que presenta su proceso de fabricación. Otro obstáculo es la reducción de la eficiencia con temperaturas superiores a 25 °C (Richhariya et al., 2020).

Silicio policristalino (poli c-Si): El proceso más utilizado para la fabricación de celdas policristalinas de silicio es la fundición de lingotes. Durante este proceso se producen cristales que se orientan en una sola dirección, luego se convierten en bloques delgados y finalmente en obleas. Las células se fabrican con diferentes estructuras cristalinas y tienen estructuras aleatorias en sus superficies. Además vienen con una capa adicional que minimiza el reflejo de la luz (Kumar et al., 2020). Las celdas de tecnología

policristalina tienen menores eficiencias que las tecnologías monocristalinas pero presentan un menor consumo de energía durante su fabricación y costos de mantenimiento más bajos. Este tipo de células solares presentan una eficiencia de aproximadamente 23 %. Uno de los factores por lo que la eficiencia de la tecnología policristalinas es menor a la obtenida en las tecnologías monocristalinas es debido a las pérdidas en los límites de discontinuidades de grano (Cremasco et al., 2022).

Segunda generación.

La segunda generación de células solares se basa en capas muy finas de semiconductores. La gran reducción de la cantidad de material empleado y las tecnologías de producción, como los procesos de deposición al vacío, hacen de estas celdas una tecnología más económica que las tecnologías de cristales de silicio. Estas presentan nuevas características como la flexibilidad, aunque su eficiencia es ligeramente inferior a la de las celdas tradicionales. Dentro de este grupo podemos encontrar las tecnologías de celdas solares de película delgada como silicio amorfo, telururo de cadmio (CdTe) y Seleniuro de cobre, indio y galio (CIGS).

Celdas solares de película delgada: Las células solares de película delgada se obtienen mediante la deposición de una o más capas delgadas de material fotovoltaico sobre un sustrato, como vidrio, plástico o metal. Una característica común de los materiales utilizados en esta tecnología es la muy buena absorción de luz (Righini & Enrichi, 2020). El costo de producción de estas células se puede reducir mediante el uso de los sustratos flexibles y la técnica de producción de rollo a rollo. El peso ligero, la flexibilidad y el menor costo de instalación de esta tecnología implican un gasto térmico menor con un bajo consumo de material (Ramanujam et al., 2020). Los paneles solares de película delgada están compuestos por un semiconductor entre dos láminas de vidrio y sellado con un laminado industrial. Generalmente se utiliza un revestimiento antirreflectante para reducir el reflejo de la luz en la superficie de los paneles (Kumar et al., 2020).

Tercera generación.

La tercera generación de celdas solares se basa en la explotación de materiales y estructuras novedosas, con el objetivo de conseguir producciones más económicas y eficiencias mayores. Algunos ejemplos de tecnologías que podemos encontrar dentro de este grupo son las células solares sensibilizadas por colorante, las células solares orgánicas y las células solares de perovskita.

Células solares de perovskita (PSC): Estas células están compuestas por una capa de perovskita activa entre una capa de transporte de electrones y una capa de transporte de huecos. Frente a la capa de transporte de electrones se coloca una capa conductora transparente. Hay diferentes tipos de metodologías de fabricación de PSC establecidas y se dividen en cuatro categorías principales, como el método de solución asistida por vapor de un paso, de dos pasos y la deposición térmica. Los principales inconvenientes en esta tecnología se relacionan con los factores ambientales ya que presentan inestabilidad frente a la luz ultra violeta, la humedad ambiental y su comportamiento térmico (Sakthivadivel et al., 2021). El buen rendimiento fotovoltaico de las células solares de perovskita se atribuye a sus propiedades intrínsecas, como el alto coeficiente de absorción de la luz, la banda prohibida sintonizable, la gran longitud de difusión del portador y la capacidad de transporte de portador ambipolar (Suresh Kumar & Chandra Babu Naidu, 2021). Esta tecnología ha presentado una eficiencia superior al 25 % en los laboratorios. Otras de sus ventajas es el bajo coste de producción de este material además de ser flexibles, ligeras y pueden ser semitransparentes.

Células solares sensibilizadas por colorante: Las celdas sensibilizadas por colorante consisten en una estructura entrecruzada de ánodo y cátodo. El electrodo de óxido de metal se sumerge en una mezcla natural de tinte fotosensible de rutenio-polipiridina (sensibilizador molecular) y solvente durante toda una noche. Una lámina conductora delgada de platino se extiende sobre una capa delgada de electrolito de yoduro y estas dos placas se unen y sellan para evitar fugas de electrolito. En la actualidad se obtiene una alta eficiencia de conversión entre 12,3 y 14,6 % a través de sensibilizadores libres de metales con colorantes de porfirina (Sakthivadivel et al., 2021). Su proceso de fabricación genera muy poco dióxido de carbono y su duración esta alrededor de los 20 años.

Células solares orgánicas: Estas células constan de un sustrato, generalmente láminas de vidrio, de un electrodo transparente recubierto con una película fina de óxido de estaño dopado con flúor u óxido de indio dopado con estaño, dos capas orgánicas que absorben la luz y otro electrodo pero metálico. Las capas orgánicas están formadas por un semiconductor donante de electrones y otro semiconductor aceptor de electrones (Cremasco et al., 2022). Entre las ventajas que podemos encontrar de esta tecnología se encuentra la flexibilidad de las moléculas orgánicas, su poco peso, su rentabilidad y son un 6 % transparente. Además, cuentan con el mayor coeficiente de absorción óptica. A pesar de esto, tienen grandes inconvenientes como una menor eficiencia y una menor estabilidad en comparación con las tradicionales celdas basadas en silicio. Con esta tecnología se han logrado eficiencias del 9 %, aunque en laboratorios ha llegado hasta un 18 % (Richhariya et al., 2020).

1.4 Situación actual de la utilización de energía solar en Cuba y el mundo.

1.4.1 Situación actual de la energía solar en el mundo.

Según datos recopilados de IRENA (2022) la capacidad de generación mediante energía solar en el período del 2019 al 2021 tuvo un acumulado de 591 000 y 854 795 MW respectivamente, lo que representó un crecimiento del 45 % .

A partir del 2016 hasta el 2021, Asia se ha convertido en el continente con más capacidad de generación en energía solar, área que estaba dominada hasta ese momento por Europa. En el año 2019 y 2021 el continente asiático ha presentado un acumulado de 332 768 y 485 948 MW de capacidad respectivamente. Esto representa un aumento del 46 %. China ha sido el mayor representante de esta área con un crecimiento de la capacidad de generación mediante energía solar de 204 971 MW en 2019 a 306 973 MW en 2021. Esto representa el 63 % respecto al resto de Asia en 2021.

Europa ocupa el segundo puesto por área geográfica en capacidad de generación de energía solar. En el período del año 2019 al 2021, su capacidad ha aumentado desde los 142 284 MW hasta los 187 360 MW, que representa un crecimiento del 31,7 % . El país más destacado de esta región es Alemania, con 58 728 MW de capacidad en el año 2021,

que es responsable del 31,3% de la capacidad total de Europa. Lo siguen países como Italia y España con 22 698 y 15 952 MW respectivamente.

En Norteamérica la capacidad ha crecido de 68 596 MW en 2019 hasta 105 881 MW en 2021, lo que representa un 54,4 % de crecimiento. Estados Unidos es el líder de esta región en 2021 con una capacidad de 95 209 MW, que representa el 90 % de la capacidad total. Luego podemos encontrar a México con una capacidad de 7 043 MW .

En Centroamérica y el Caribe, área donde se encuentra Cuba, la capacidad ha aumentado de 2 483 MW en 2019 hasta los 3 276 MW en el 2021, que representa un crecimiento del 32 % . Destacan países como Honduras, Puerto Rico y República Dominicana con 514, 491 y 490 MW de capacidad respectivamente.

En el año 2020, el costo nivelado promedio ponderado global de la electricidad (LCOE) de la energía solar fotovoltaica a escala de servicios públicos disminuyó en un 13 %, de 0,061 USD/kWh a 0,057 USD/kWh . Mientras que la energía solar térmica disminuyó su LCOE en un 16 % entre 2018 y 2020. Durante el período de 2010 a 2020 la energía solar térmica redujo su LCOE de 0,340 USD/kWh a 0,108 USD/kWh (IRENA, 2021).

1.4.2 Situación actual de la energía solar en Cuba.

En Cuba, desde el año 2012 ha existido un crecimiento constante de la capacidad de energía solar. A partir de este año aumentó de 1 MW a 37 MW en el año 2016. En igual período de tiempo, desde el año 2016 al 2020, la capacidad aumentó desde 37 hasta los 217 MW respectivamente. En el año 2021 la capacidad acumulada fue de 246 MW, lo que significó un crecimiento del 13,4 % respecto al año anterior (IRENA, 2022).

Según Pérez García et al. (2021) en el año 2016 la energía generada por calentadores solares e instalaciones fotovoltaicas representó solo el 0,15 % de la energía consumida. Ya a finales de 2019 existían más de 60 parques solares en todo el territorio nacional, sumando una potencia total de 204 MWp (Heredia et al., 2022). Para el 16 de marzo de 2021 se habían instalados 227 MW en sistemas conectados a la red nacional, de ellos 215 MW pertenecientes a 72 parques sincronizados al sistema eléctrico y los 12 MW restantes están instalados en techos y áreas de las entidades. Las provincias con mayores

avances en este sentido son Artemisa, Granma, Cienfuegos, Sancti Spíritus y Pinar del Río. La totalidad de los parques solares construidos se encuentran en funcionamiento y representan el 2,37 % de la energía total consumida durante 24 horas en el país (Alonso Falcón et al., 2021).

En la provincia de Pinar de Río se encuentra la fábrica de paneles fotovoltaicos y componentes electrónicos llamada Ernesto Che Guevara. La misma fue modernizada en el año 2018 con el objetivo de producir 60 000 módulos con una potencia conjunta de 15 MW. A pesar de esto el sector residencial no ha tenido un fácil acceso a esta tecnología debido a los altos precios, además de que no se han logrado satisfacer las demandas del mercado nacional (Heredia et al., 2022).

Según Cubaenergía (2021) en el año 2020 se produjeron 19 mil paneles fotovoltaicos en el territorio. Actualmente el costo de estas unidades de 1 KWp es de 55 mil pesos cubanos incluyendo todos los componentes del sistema, así como la instalación y el montaje. Su comercialización se realiza a través de la empresa COPEXTEL.

En el país existe una sola empresa encargada de la producción de colectores solares, ubicada en la provincia de Ciego de Ávila. Esta Unidad Empresarial de Base (RENSOL) tiene una capacidad de producción de 10 mil unidades, aunque se espera que con una nueva inversión que se tiene planeada se pueda triplicar estos resultados. En la actualidad esta tecnología está al alcance de la población a un precio de 2 945 pesos cubanos.

Se han instalado ya un total de 18 mil calentadores solares de agua, de ellos 3 mil se han vendido a la población y 1 265 para la higienización de sistemas de ordeño mecánico. En el 2021 la planificación tenía como objetivo fabricar alrededor de 10 mil calentadores solares, de los cuales se destinarían 700 al sector del turismo (Cubaenergía, 2021).

1.5 Sistemas de refrigeración por absorción.

Se conoce por refrigeración al fenómeno de extracción de calor de un local y su expulsión al medio circundante, lo que posibilita que en ausencia de calor se produzca frío. Actualmente en la sociedad, se ha convertido en un requisito imprescindible el confort y la climatización de los locales, tanto en el sector residencial como en las

empresas, industrias e instalaciones turísticas. El consumo eléctrico asociado a este servicio presenta grandes proporciones y además las tecnologías tradicionales y más utilizadas constituyen una acción bastante irrespetuosa con el medio ambiente. Para tratar de reducir o eliminar estos problemas se puede recurrir a una técnica antigua basada en el ciclo frigorífico de absorción que constituye una gran opción para la aplicación de fuentes renovables de energía en la climatización.

Las primeras muestras de esta tecnología se aprecian en 1748 cuando William Cullen consiguió obtener una pequeña cantidad de hielo evaporando éter etílico en una campana donde mantenía una presión reducida. Luego, en 1777, Gerald Nairne introdujo ácido sulfúrico en la campana de Cullen con el objetivo de que absorbiera el vapor y permitía una mayor evaporación (Padrós Corominas, 2013). Ya en 1810 John Leslie, utilizando un recipiente con agua conectado a otro con ácido sulfúrico, logró que se formaran capas de hielo sobre el agua a medida que se absorbía el vapor. Finalmente, en 1859, Ferdinand Carré introduce la primera máquina de absorción, que utilizaba Amoniaco/Agua para la fabricación de hielo, patentada en 1960. En la década de 1950, se presentó una tecnología que utilizaba Bromuro de litio/Agua como fluido de trabajo para aplicaciones industriales. Años más tarde se dio a conocer un sistema de absorción de doble efecto que se utilizaría como estándar para ciclos de alto rendimiento (Srikhirin et al., 2001).

1.5.1 Principio de funcionamiento y clasificación de sus ciclos.

Los sistemas de refrigeración por absorción operan según el mismo principio que los sistemas de compresión de vapor, aunque utiliza un compresor térmico en lugar de uno mecánico. Así, estos sistemas pueden ahorrar un 88 % de energía en comparación con los tradicionales de compresión de vapor (Al-Yasiri et al., 2022). Esta tecnología utiliza como fluido de trabajo el refrigerante unido a una sustancia (absorbente) con la que se disuelve fácilmente. Los sistemas de absorción cuentan con cuatro circuitos principales, el generador y el condensador en el nivel de alta presión y el evaporador y el absorbedor en el nivel de baja presión. Al generador se le suministra un fluido caliente para separar, por medio de la evaporación, el refrigerante del absorbente. La solución concentrada del absorbente pasa al absorbedor por gravedad. Posteriormente, el refrigerante en estado de

vapor se dirige al condensador, luego de pasar por el rectificador, donde pasa a estado líquido. El refrigerante condensado llega al evaporador, pasando a través de una válvula de expansión, para evaporarse a bajas temperaturas gracias a la disminución de la presión y absorbiendo calor del fluido que se desea refrigerar. Siguiendo en su recorrido por el ciclo, el refrigerante ingresa, en forma de vapor, al absorbedor, donde es absorbido por la solución concentrada que llegó del generador a través de una válvula de expansión. Luego, la solución diluida del refrigerante y el absorbente es llevada al generador por una bomba pasando por un regenerador. Este elemento permite precalentar la solución a la entrada del generador y enfriar la solución concentrada antes de ingresar al absorbedor, ya que la relación de absorción es inversamente proporcional a la temperatura. Así, luego de este proceso, el ciclo se reinicia (Narváez-Romo, 2020).

Los ciclos de refrigeración por absorción se pueden clasificar según su configuración, mediante la cual se busca mejorar la capacidad frigorífica, el coeficiente de rendimiento (COP). A continuación se tratan algunas de las principales clasificaciones.

Simple efecto:

Esta configuración es la más simple y la más utilizada. Estos sistemas requieren una temperatura de suministro de agua ideal mayor de $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ para maximizar el COP. Esta temperatura se le puede suministrar a través de un colector solar plano, alcanzando un valor de 0,7 COP (Al-Yasiri et al., 2022). Según Zhai et al. (2011) durante experimentos realizados en España bajo condiciones operativas prácticas, estos sistemas obtuvieron valores de 0,6 COP con un suministro de agua entre 70 y $95\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Medio efecto:

La configuración de este ciclo es similar a la anterior, la diferencia es que se utilizan dos compresores térmicos conectados en serie en lugar de uno solo. El COP en este ciclo se encuentra alrededor de 0,36 con un suministro de agua de $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, pero disminuye el riesgo de cristalización de la mezcla (de Castro Pizarro, 2016). Zhai et al. (2011) plantea que este sistema de medio efecto se creó con el propósito de funcionar con una fuente de

calor de temperatura relativamente baja, lo que contribuye a disminuir los costos de la inversión.

Doble efecto:

Este tipo de ciclo consiste en dos fases de compresión térmica como el caso anterior pero conectado en paralelo. La temperatura de suministro de agua de esta tecnología debe ser alta (mayor de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$). En experimentos realizados bajo condiciones operativas prácticas, para temperaturas de suministro de agua de 150 a $160\text{ }^{\circ}\text{C}$, se obtuvieron valores de COP de $1,0$ y $1,1$. Este ciclo presenta mejor adaptabilidad a las diferentes condiciones de trabajo pero su costo de inversión es muy superior ya que para su funcionamiento se deben utilizar colectores solares de tubos al vacío, parabólicos compuestos u otros de temperaturas media-alta (de Castro Pizarro, 2016).

El rendimiento de un sistema de refrigeración por absorción depende en gran medida de las propiedades químicas y termodinámicas del fluido de trabajo. Por ello se han estudiado varias combinaciones de refrigerante/absorbente para su empleo, aunque comercialmente solo se tienen dos, el par Agua/Bromuro de litio ($\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$) y el Amoniaco/Agua ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$). Esta última es la combinación más utilizada ya que se puede emplear tanto en la climatización para confort humano como para aplicaciones industriales de baja temperatura como la conservación de alimentos. El par $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ se utiliza principalmente en aplicaciones de climatización para confort debido al punto de congelación del agua que no permite operar a menos de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Al-Yasiri et al., 2022).

Una de las ventajas que proporciona la utilización del par Amoniaco/Agua es que permite trabajar a temperaturas por debajo de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, ya que su punto de congelación es de $-77\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tanto el amoniaco como el agua son muy estables a una variada gama de temperaturas y presiones de operación. Además, ambas son sustancias amigables con el medio ambiente y de bajo costo. Este fluido de trabajo también presenta algunas desventajas como su toxicidad e inseguridad para la salud humana, su efecto corrosivo para los materiales ferrosos del sistema, y requieren operar a alta presión. Además, se hace obligatorio el uso de un rectificador, por la volatilidad de ambas sustancias, para evitar que se acumule el agua en el condensador lo que reduce el COP.

La utilización del par de trabajo H₂O/LiBr tiene como ventaja la no volatilidad del LiBr lo que elimina la necesidad de utilizar un rectificador. Presenta un alto calor latente de vaporización y trabaja en condiciones de baja presión operativa. Además este par no es tóxico para la salud humana y es amigable con el medio ambiente. Los ciclos que trabajan con este fluido presentan un muy buen coeficiente de rendimiento (COP). Una de las desventajas que presenta es el alto riesgo de cristalización, lo que hace necesario la utilización de dispositivos anti-cristalización y tiene efecto corrosivo sobre algunos metales. También constituye un freno el alto costo del bromuro de litio.

En estos sistemas se emplean distintos componentes que se utilizan en dependencia del par de trabajo que se emplee en cada ciclo y sus principales componentes son:

- Generador
- Rectificador
- Condensador
- Válvula de expansión
- Evaporador
- Absorbedor
- Bomba de solución
- Regenerador o Intercambiador de calor
- Torre de enfriamiento

CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se realiza el análisis del recurso solar en la zona de estudio. También se selecciona la enfriadora de agua por absorción mediante la potencia frigorífica requerida. Se acomete el dimensionamiento de los campos solares que abastecen de energía térmica al generador de la enfriadora y el estudio económico de la inversión.

2.1 Análisis de la radiación solar en la zona de estudio.

Cuando se requiere aprovechar la energía solar, una de las condiciones o factores que se debe tener presente son las horas de sol disponibles diarias y las horas solares pico. Las horas de sol diario se obtuvieron mediante la ecuación 2.1. Según (Pérez Martínez et al., 2017) el sol comienza a irradiar a las 6:00 am hasta las 6:00 pm, pero solamente se acumulan unas 8 horas solares pico equivalentes. Esto se puede observar en la figura 2.1.

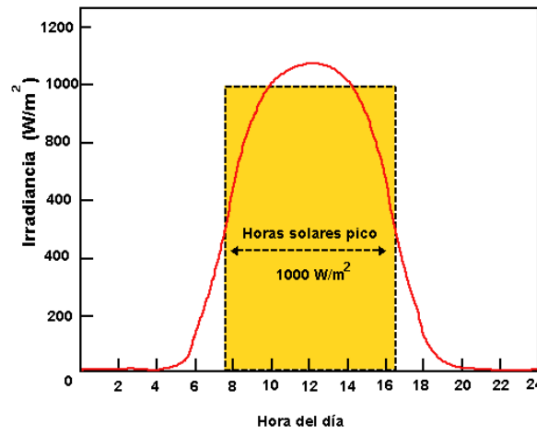


Figura 2.1 Horas solares diarias y horas solares pico. Fuente: (Pérez Martínez et al., 2017).

Las horas de sol para cada día del año se calculan por la ecuación 2.1.

$$N = \left(\frac{2}{15}\right) \cdot w \quad (2.1)$$

Donde:

- N = Cantidad de horas de sol para un día.
- w = Ángulo horario del sol ($^{\circ}$).

El ángulo horario del sol se calcula mediante la ecuación 2.2.

$$w = \arccos(-\tan\phi \cdot \tan\delta) \quad (2.2)$$

Donde:

- ϕ = Latitud del lugar de estudio ($^{\circ}$).
- δ = Declinación solar ($^{\circ}$).

La declinación solar se puede obtener mediante la ecuación 2.3.

$$\delta = 23,45 \cdot \text{sen}\left(360 \cdot \frac{284 + n}{365}\right) \quad (2.3)$$

Donde:

- n = Numero del día del año (siendo $n = 1$ para el primer día de enero y así para los 365 días del año).

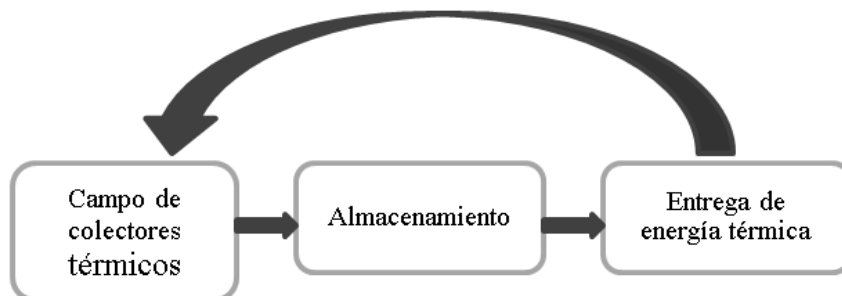
Otros factores que inciden directamente en la captación de la energía solar, tanto térmica como fotovoltaica, son la calidad del aire, la inclinación de los paneles, la latitud del lugar y la variación de la intensidad de la radiación en la primera y última hora del día. Por esta razón, para obtener un valor de radiación efectiva, adaptado a las características anteriormente expresadas del lugar de estudio, se afecta la misma por valores de corrección otorgados a cada uno de estos factores. Para determinar el ángulo de inclinación óptimo de los paneles para cada mes del año, se afectó el valor de radiación para una superficie horizontal con un coeficiente o índice de corrección para diferentes ángulos de inclinación, que se muestran en el anexo 2 y una latitud de 23° . Los valores de radiación mensuales para cada ángulo de inclinación se pueden observar en el anexo 3.

2.2 Selección y características de la enfriadora de agua por absorción y sistema de alimentación.

Como condición inicial para la selección de la enfriadora de agua por absorción se tiene la potencia frigorífica demandada por el lugar de estudio, el rango de temperatura de trabajo y se tiene en cuenta la relevancia en el mercado. Se seleccionó la marca Yasaki por ser esta una de las empresas de mayor prestigio en el campo de la refrigeración por absorción. El modelo de la máquina seleccionada mediante los criterios antes expuestos es la WFC-SC50, que tiene una capacidad frigorífica de 176 kW . Se le suministra energía en forma de agua caliente al generador con un caudal volumétrico de 43,2 m³/h, con una temperatura de entrada y salida de 88 °C y 83 °C respectivamente. Presenta un rango de temperatura de trabajo de 70 °C a 95 °C . La temperatura del agua refrigerada a la entrada y la salida es de 12,5 °C y 7,0 °C respectivamente. Otras características de la máquina se pueden observar en el anexo 4.

2.2.1 Activada mediante colectores solares térmicos.

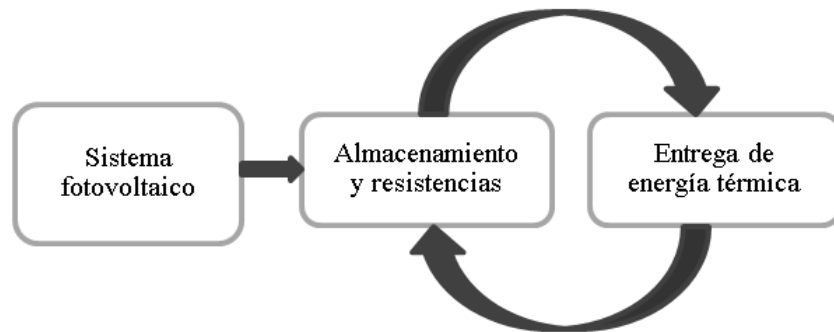
Las máquinas de refrigeración por absorción utilizan agua caliente como fuente de energía, esta se le suministra mediante un campo de colectores solares térmicos. Es un circuito cerrado en el que una bomba mueve el agua caliente que proviene del campo de captación a unos tanques de almacenamiento. Luego, la energía térmica necesaria en el generador de la enfriadora por absorción se le suministra de estos tanques de almacenamiento, pasando el agua a una temperatura entre 88 y 90 °C por un intercambiador de calor, donde se entrega la energía térmica a la mezcla de la sustancia refrigerante y absorbente en el generador. Después de entregar la energía, el agua regresa al campo de colectores para iniciar nuevamente el ciclo.



*Figura 2.3 Sistema de alimentación basado en captadores solares térmicos. Fuente:
Elaboración propia.*

2.2.2 Activada mediante paneles solares fotovoltaicos.

Al igual que el sistema anterior, es un ciclo cerrado, aunque en este caso la energía solar se convierte en energía eléctrica por medio de un campo de paneles solares fotovoltaicos. La energía eléctrica producida es utilizada para hacer funcionar un grupo de resistencias para grandes potencias que calientan el agua a una temperatura entre 88 y 90 °C directamente en los depósitos de almacenamiento. Luego, el agua se bombea hacia el generador de la enfriadora por absorción, que circula por un intercambiador de calor para entregar la energía térmica. Después, el agua regresa a los depósitos de almacenamiento donde vuelve a comenzar el ciclo.



*Figura 2.4 Sistema de alimentación basado en captadores solares fotovoltaicos. Fuente:
Elaboración propia.*

2.3 Dimensionamiento de la instalación solar.

2.3.1 Solar Térmica.

Para el diseño o dimensionamiento del campo de colectores solares térmicos se tiene la demanda térmica del generador de la máquina de refrigeración por absorción. El modelo del colector utilizado en la instalación se observa en la figura 2.5 y su ficha técnica se puede observar en el anexo 5.

Según la bibliografía consultada existen diversos métodos para el dimensionamiento de una instalación de energía solar térmica, en dependencia de cuál sea la tecnología a la que se le suministra esta energía. En este caso se utiliza la metodología planteada por (Bérriz Pérez & Álvarez Gonzáles, 2008).



Figura 2.5 Colector solar plano SACLIMA L-21. Fuente: www.saclima.com

- Área de captación de colector (A_c): 2,23 m²
 - Rendimiento óptico (η_o): 0,785
- Demanda energética.

Es la energía necesaria para elevar la temperatura del agua en el generador de la máquina de absorción de una temperatura inicial a la temperatura de evaporación.

$$Q = M \cdot C_p \cdot (t_f - t_i) \quad (2.4)$$

Donde:

- Q = Demanda energética (kW)
- M = Masa a calentar en un día (kg/s)
- C_p = Calor específico del agua (kJ/Kg °C)
- t_f = Temperatura final del agua (°C)

- t_i = Temperatura inicial del agua ($^{\circ}\text{C}$)

➤ Área de captación.

Para determinar el área necesaria que permita captar la cantidad de energía que pueda satisfacer la demanda térmica del generador.

$$A_{cap} = \frac{Q}{(H_p \cdot \eta_g)} \quad (2.5)$$

Donde:

- A_{cap} = Área de captación (m^2)
- H_p = Radiación solar de los meses más desfavorables (kWh/m^2)
- η_g = Eficiencia global diaria del sistema (%)

$$\eta_g = \eta_o - (K_1 - K_2 \cdot (t_m - t_{amb})) \cdot \frac{(t_m - t_{amb})}{H_p} \quad (2.6)$$

Donde:

- η_o = Rendimiento óptico (%)
- K_1 = Coeficiente lineal de pérdida de calor ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$)
- K_2 = Coeficiente cuadrático de pérdida de calor ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}^2$)
- t_m = Temperatura media ($^{\circ}\text{C}$)
- t_{amb} = Temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$)

➤ Número de colectores.

La cantidad de colectores que se necesitan para satisfacer la demanda energética se calcula por la siguiente ecuación.

$$N_c = \frac{(A_{cap} \cdot FS)}{A_c} \quad (2.7)$$

Donde:

- FS = Factor de seguridad o proyección de demanda (1-1,5)
- A_c = Área de captación de un colector (m^2)

El volumen de los tanques o depósitos de almacenamiento se determina por la ecuación 2.8 (Cambronero Unanue, 2013).

$$V_{dep} = C_{cap} \cdot A_{cap} \quad (2.8)$$

Donde:

- C_{cap} = Caudal del captador térmico (L/hm^2)

2.3.2 Solar Fotovoltaica.

Una instalación fotovoltaica aislada o híbrida está compuesta fundamentalmente por cuatro elementos. Los mismos son, módulo fotovoltaico, regulador de carga, baterías e inversor de corriente y se pueden identificar según su esquema de instalación que aparece en la figura 2.5. El módulo fotovoltaico es el encargado de convertir la energía solar en energía eléctrica. El regulador de carga es el responsable de optimizar, proteger y controlar los parámetros de la corriente que llega a las baterías o banco de baterías. Estas, a su vez, se encargan de acumular la energía eléctrica para el momento necesario en que se requiera, siendo fundamental su empleo en sistemas de generación de energía basados en fuentes renovables de carácter intermitente. La corriente que suministran las baterías al sistema es en forma de corriente directa y se requiere de un inversor de tensiones para convertir esta en corriente alterna, que es la utilizada por la mayoría de los equipos.

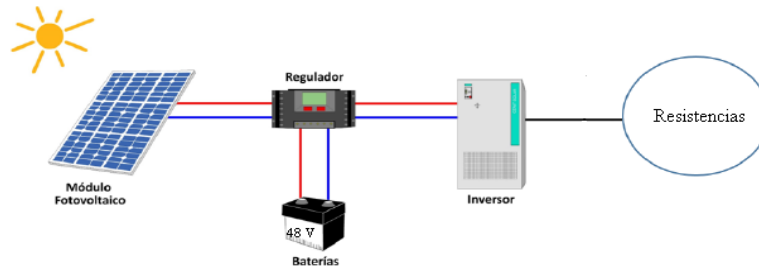


Figura 2.6 Sistema de alimentación basado en captadores solares fotovoltaicos. Fuente: (Alvarado Ladrón de Guevara, 2018)

Para realizar el dimensionado de un sistema fotovoltaico autónomo se disponen de una gran variedad de métodos, algunos de alta complejidad que requieren de *software* informáticos para su desarrollo y otros de mucha menor complejidad. (Aguilera et al., 2011).

En este trabajo se realiza el dimensionado del campo solar fotovoltaico basado en el método o criterio de máxima captación energética anual. El método seleccionado no suele ser utilizado para sistemas autónomos, pero en sistemas híbridos, donde existe una fuente auxiliar de energía, puede ser de gran utilidad. Como ventaja principal tenemos que el generador fotovoltaico resultará menor al que se obtendría por el método del mes crítico o peor, lo que disminuye los costos de inversión. A pesar de esto, el sistema quedará subdimensionado para algunos meses, lo que trae consigo una afectación en el suministro de energía y un acortamiento de la vida útil de las baterías. (Aguilera et al., 2011).

➤ Rendimiento global de la instalación.

Si se dimensionara una instalación fotovoltaica exactamente para la demanda de energía estimada, sin tener en cuenta las pérdidas del propio sistema de generación, sucederá que la energía aprovechable es menor que la calculada y no podría satisfacer la demanda. Para evitar este problema se utiliza un valor de rendimiento que tiene en cuenta las pérdidas de cada elemento del sistema. Los valores de cada uno de los factores que intervienen en la ecuación 2.9 se pueden observar en el anexo 6.

$$R = (1 - K_b - K_i - K_r - K_v) \cdot \left(1 - K_a \cdot \frac{N}{P_d}\right) \quad (2.9)$$

Donde:

- K_b = Factor de pérdidas en baterías.
- K_i = Factor de pérdidas en inversores.
- K_r = Factor de pérdidas en reguladores.
- K_v = Otras pérdidas.
- K_a = actor de pérdidas por autodescarga de baterías.
- N = Días de autonomía.
- P_d = Profundidad máxima de descarga de baterías.

Para esta instalación se utilizan baterías nuevas, con autonomía de un día y una profundidad de descarga del 60 %, un regulador moderno y un inversor de buen rendimiento.

$$R = (1 - 0,05 - 0,1 - 0,1 - 0,1) \cdot \left(1 - 0,002 \cdot \frac{0,5}{0,6}\right)$$

➤ Energía diaria necesaria.

$$Edn = \frac{Q}{R} \quad (2.10)$$

Donde:

- Q = Demanda de energía (W)

El modelo del panel escogido para la instalación es el de la figura 2.7 y su ficha técnica completa se puede ver en el anexo 7.

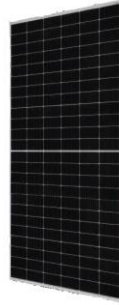


Figura 2.7 Módulo fotovoltaico_JAM72S30-550/MR. Fuente: www.jasolar.com

- Potencia nominal (P_{MPP}): 550 W
 - Tensión máxima (V_{MPP}): 41,96 V
 - Intensidad máxima (I_{MPP}): 13,11 A
- Energía generada por el panel.

$$E = P_{MPP} \cdot HSP \quad (2.11)$$

Donde:

- HSP = horas solares pico
- Número de paneles necesarios (Np) y número de paneles conectados en serie (Nps) y paralelo (Npp).

$$Np = \frac{Edn}{E} \quad (2.12)$$

$$Nps = \frac{Vn_{gen}}{V_{MPP}} \quad (2.13)$$

$$N_{pp} = \frac{N_p}{N_{ps}} \quad (2.14)$$

Donde:

- Vn_{gen} = Voltaje nominal del subsistema de generación (V).

El voltaje nominal del subsistema de generación se decide trabajar en 48V.

- Dimensionado del sistema de acumulación.

$$C_B = \frac{Cd \cdot N}{Pd \cdot Vn_{gen}} \quad (2.15)$$

Donde:

- C_B = Capacidad del banco de baterías (Ah)
- Cd = Consumo diario (Wh)
- Pd = Profundidad de descarga (%)

Para determinar el número de baterías conectadas en paralelo, en serie y totales se utilizan las ecuaciones 2.16, 2.17 y 2.18 respectivamente.

$$N_{bp} = \frac{C_B}{Cn_{batería}} \quad (2.16)$$

$$N_{bs} = \frac{Vn_{gen}}{Vn_{batería}} \quad (2.17)$$

$$N_{bt} = N_{bp} \cdot N_{bs} \quad (2.18)$$

Donde:

- $Cn_{batería}$ = Capacidad nominal de la batería (Ah)
 - $Vn_{batería}$ = Voltaje nominal de la batería (V)
- Dimensionado del regulador de carga.

El regulador debe ser capaz de soportar la corriente máxima posible que la instalación pueda producir. Esta sería la corriente de cortocircuito del generador y se halla por la ecuación 2.19. Según (Aguilera et al., 2011) es recomendable utilizar un factor de seguridad de 1,25 en consideración de los aumentos de irradiancia que se producen en días nublados durante cortos períodos de tiempo.

$$I_{entrada} = I_{GFV,SC} = 1.25 \cdot (I_{MOD,SC} \cdot Npp) \quad (2.19)$$

Donde:

- $I_{GFV,SC}$ = Corriente de cortocircuito del generador (A)
- $I_{MOD,SC}$ = Corriente de cortocircuito del módulo (A)

Para determinar la cantidad de reguladores que se deben emplear se utiliza la ecuación 2.20.

$$N_{Reguladores} = \frac{Npp \cdot I_{MPP}}{I_{REGULADOR}} \quad (2.20)$$

Donde:

- $I_{REGULADOR}$ = Corriente máxima del regulador (A)
- Dimensionado del inversor.

Para el dimensionado del inversor se tiene en cuenta que la suma de todas las potencias demandadas por los receptores no sobrepase la potencia nominal de dicho inversor. Para saber la cantidad de inversores necesarios se utiliza la ecuación 2.21.

$$N_{Inversores} = \frac{Q}{P_{Inversor}} \quad (2.21)$$

Donde:

- $P_{Inversor}$ = Potencia del inversor (W)

2.4 Impacto ambiental de los sistemas propuestos.

La implementación de las variantes propuestas no solo trae consigo un ahorro de energía para la red eléctrica nacional sino que se puede traducir a su vez en un ahorro del combustible necesario para producir esa cantidad de energía. Primeramente se evita la explotación de un recurso natural no renovable cuyas técnicas de extracción pueden ser altamente agresivas con el medio ambiente. Al evitar quemar cierta cantidad de crudo también se evita la emisión de ciertos gases contaminantes a la atmósfera, principalmente el CO₂.

Se puede determinar la cantidad de CO₂ que se deja de emitir a la atmósfera a partir de la cantidad de crudo que se ahorra al producir la energía por medio de los paneles térmicos o fotovoltaicos. Este análisis se realiza por medio de la ecuación 2.22.

$$CA = \frac{E \cdot g}{1000} \quad (2.22)$$

Donde:

- E = consumo de energía anual (kWh/año).
- g = consumo específico de combustible para la generación de energía eléctrica en Cuba (253 g/kWh) (González Rodríguez & Rodríguez Ramírez, 2020).

Luego de determinar la cantidad de combustible ahorrado se obtiene la cantidad de CO₂ que se deja de emitir a través de la ecuación 2.23.

$$CO_2 = \frac{CA \cdot k}{\rho} \quad (2.23)$$

Donde:

- k = coeficiente que permite relacionar el combustible no quemado con las toneladas de CO₂ no emitidas a la atmósfera (3,119 kg/l).
- ρ = densidad del combustible (0,9781 kg/l).

2.5 Costo económico de la instalación solar.

El análisis del costo económico para los dos sistemas de suministro de energía térmica se realiza mediante la metodología planteada por (Lamas Acevedo, 2013). En primer lugar se necesita conocer el costo total de la inversión que se realiza y se puede determinar a partir de la ecuación 2.24.

$$CTI = CI + CO \cdot \left[\frac{(1+i)^m - 1}{(1+i)^m \cdot i} \right] \quad (2.24)$$

Donde:

- CTI = Costo total de la inversión (\$)
- i = Tasa de interés del banco de donde se extrajo el dinero, o la tasa de interés del crédito, en fracción.
- CI = Costo de instalación (\$)
- CO = Costo de operación y mantenimiento (\$)
- m = Vida útil (años)

$\left[\frac{(1+i)^m - 1}{(1+i)^m \cdot i} \right]$ = Coeficiente que tiene en cuenta que el costo de operación y mantenimiento se produce durante su vida útil.

Por las características de los equipos utilizados solamente se tiene en cuenta el costo de mantenimiento de los equipos y se determina por la ecuación 2.25. Esto se debe a que la tecnología utilizada es fija y no requiere de ningún operador permanente.

$$CO = 0,03 \cdot CI \quad (2.25)$$

El costo de instalación también se puede determinar por la ecuación 2.26.

$$CI = C_{inv} + C_{mont} \quad (2.26)$$

Donde:

- C_{inv} = Costo de la inversión (\$)
- C_{mont} = Costo del montaje (\$)

Es preciso aclarar que los precios o los costos de la inversión, instalación y montaje dependen en gran medida del proveedor y pueden variar. Esto se debe tener en cuenta en el momento de realizar el proyecto de inversión, ya que muchas empresas y hoteles tienen convenios ya establecidos con algunos proveedores en específico.

Según plantea Stolik Novygrad (2019), el costo del kWp instalado en Cuba es de aproximadamente 1 000 USD/kWp. Además expone que para los primeros años de la próxima década los precios descenderán aproximadamente hasta los 800 USD/kW.

2.5.1 Movimiento de fondos o de caja.

El movimiento de fondos está determinado por los períodos de pago y cobros, y es fundamental para evaluar la rentabilidad de cualquier proyecto de inversión (Medina

León et al., 2010). Para el análisis del movimiento de fondos es necesario establecer el horizonte y los períodos de la inversión. El horizonte es el tiempo en el que se producirán los cobros y pagos de la inversión. Los períodos son las partes en que se divide el horizonte y serán de igual duración.

Para este estudio se toma inicialmente un horizonte de 20 años, divididos en períodos de un año. El análisis se realiza mediante la utilización de una hoja de cálculo de Excel y se puede observar en las tablas 3.3 y 3.4.

Para determinar el movimiento de caja es necesario tener en cuenta la depreciación de los equipos utilizados para poder obtener un valor real. La depreciación está determinada por diversas causas, como el desgaste físico o la obsolescencia de la tecnología. El valor de esta depende de la empresa o lugar en donde se planea hacer la inversión y su valor se puede determinar por la ecuación 2.27.

$$D = 0,10 \cdot CI \quad (2.27)$$

Para realizar la evaluación de una inversión existen dos métodos, estáticos y dinámicos. La diferencia que existe entre ellos es que los métodos dinámicos tienen en cuenta los cambios del valor del dinero en el tiempo por lo que son los utilizados en el presente trabajo. Los criterios utilizados para el análisis de la inversión son:

- Período de recuperación de la inversión.

Es el tiempo que se demora en recuperar el costo inicial de la inversión. El criterio de selección utilizado es elegir a los que presenten un tiempo de recuperación menor.

$$Tri = \frac{CI}{[\text{cobros} - \text{pagos} \cdot (Ib + 1)] \cdot (1 - I_{sr})} \quad (2.28)$$

Donde:

- Tri = Período de recuperación de la inversión (años).

- Ib = Intereses a pagar por préstamos en el año o intereses dejados de cobrar por extraer dinero del banco (%).
 - I_{sr} = Impuesto sobre la renta (tanto por ciento de las ganancias).
- Valor actual neto (VAN).

Este se basa en la idea de determinar el valor presente de una suma futura de dinero, mediante la utilización de la técnica del flujo de efectivo descontado al costo del capital del proyecto. El VAN mide el grado de mayor riqueza que poseerá el inversionista de realizar el proyecto y se define como el valor actualizado del flujo de ingresos obtenidos durante la vida económica del proyecto mediante la determinación de las entradas y salidas de efectivo por año.

$$VAN = \sum_{j=1}^n \frac{St \cdot k}{(1+i)^j} \quad (2.29)$$

Donde:

- St = Movimiento de fondos.
- k = Período analizado.
- n = Años de inversión.

El resultado puede ser negativo o positivo, el primero significa que la inversión no es recuperable en el horizonte establecido y el valor positivo es lo que se intenta conseguir en una inversión.

- Tasa interna de retorno (TIR).

Se le conoce como la tasa de rentabilidad de una inversión y es el valor de descuento o interés que hace que Valor Actual Neto (VAN) proporcione una oportunidad de inversión nula. A través de su análisis se puede conocer hasta qué punto puede crecer la tasa de descuento y que el proyecto conserve su rentabilidad.

$$VAN = 0 = \sum_{j=1}^n \frac{St \cdot k}{(1 + TIR)^j} \quad (2.30)$$

Donde:

- TIR = Tasa interna de retorno (en fracción).

CAPÍTULO 3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se realiza un análisis de los resultados obtenidos en el capítulo anterior. Se analiza la radiación solar en el lugar de estudio y la composición de los campos de captación solar térmica y fotovoltaica. También se efectúa un estudio económico y de factibilidad para las dos modalidades de suministro de energía a la enfriadora por absorción.

3.1 Análisis de la radiación solar.

El análisis de la radiación solar en el lugar de estudio se efectuó para los 12 meses del año y sus valores se pueden observar en el anexo 8. Se determinó que se tiene unas 12 horas de sol diario como promedio anual. Para facilitar la obtención de este valor se utiliza una hoja de cálculo Excel y los promedios mensuales de horas de sol día obtenidos se pueden observar en la figura 3.1.

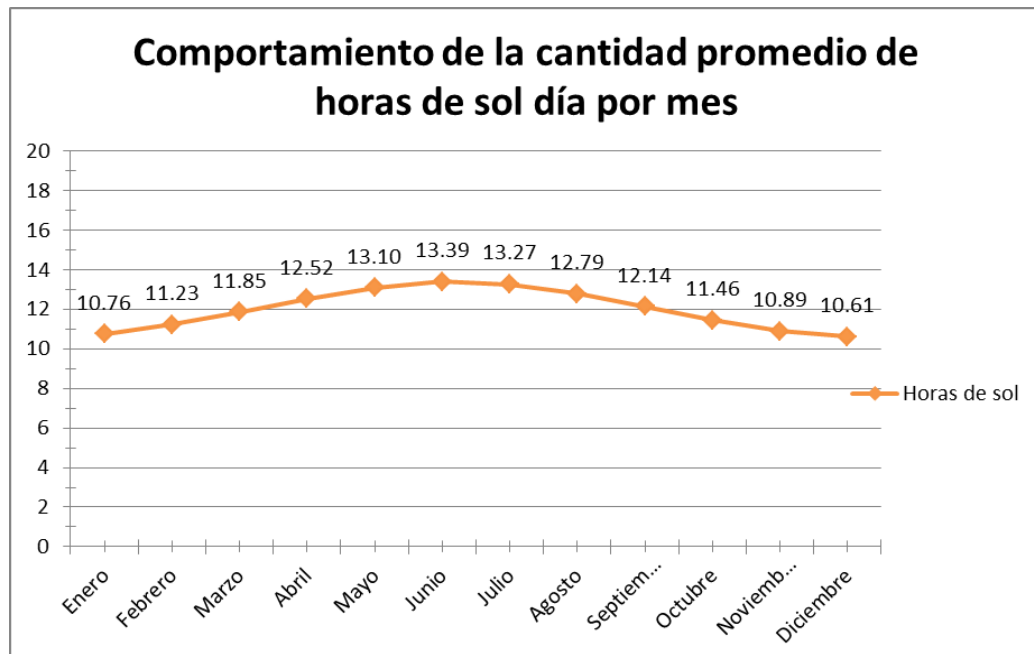


Figura 3.1 Promedios mensuales de horas de sol día. Fuente: Elaboración propia.

Luego de afectar la radiación solar para una superficie horizontal con un factor H para la calidad del aire, uno para la intensidad de la misma en el día y un factor K según la

latitud e inclinación de los captadores; se obtiene un valor de radiación solar efectiva, el cual se muestra en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Radiación solar mensual en Varadero. Fuente: Elaboración propia.

<i>Meses</i>	<i>Radiación solar media sobre superficie horizontal (kWh/m²/día)</i>	<i>Factor H para calidad del aire.</i>	<i>Factor para intensidad de la radiación.</i>	<i>Factor K según latitud e inclinación.</i>	<i>Radiación solar efectiva (kWh/m²/día)</i>
Enero	4,013	1	0,94	1,15	4,34
Febrero	5,285	1	0,94	1,11	5,51
Marzo	5,868	1	0,94	1,05	5,79
Abril	7,073	1	0,94	0,99	6,58
Mayo	6,524	1	0,94	0,95	5,83
Junio	5,977	1	0,94	0,93	5,22
Julio	7,099	1	0,94	0,95	6,34
Agosto	7,112	1	0,94	0,99	6,67
Septiembre	5,940	1	0,94	1,06	5,92
Octubre	4,995	1	0,94	1,13	5,31
Noviembre	4,067	1	0,94	1,18	4,51
Diciembre	4,197	1	0,94	1,18	4,66
Media	5,684	/	/	/	5,56

Como se plantea en el capítulo uno de este trabajo, la eficiencia de los paneles solares fotovoltaicos depende del rango de temperaturas bajo el que está sometido. Por esta razón, adquiere importancia relevante el análisis del comportamiento de la temperatura durante todo el año en el lugar donde se realiza el estudio. Los valores de temperatura analizados se encuentran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Temperatura ambiente diaria en el lugar de estudio (octubre 2021- septiembre 2022). Fuente: Elaboración propia.

Días	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1	25,10	21,30	23,70	26,50	26,30	26,80	29,44	29,46	28,86	28,80	26,50	24,30
2	24,70	22,50	23,60	26,60	26,50	25,10	29,22	29,57	30,13	28,20	26,70	24,10
3	24,50	23,20	25,00	26,60	26,40	24,70	29,15	29,19	29,75	28,60	26,70	24,50
4	23,10	23,90	25,10	26,40	26,50	26,50	29,21	28,90	30,48	28,60	27,00	23,90
5	24,30	23,70	25,20	27,50	26,70	27,30	28,17	29,37	29,47	28,50	27,30	24,70
6	24,80	23,80	24,90	28,10	27,10	25,70	28,39	29,21	29,14	29,00	25,60	25,70
7	24,90	23,90	25,50	28,00	27,90	26,00	29,00	28,95	28,95	29,20	24,70	26,10
8	25,70	24,20	25,90	25,60	27,50	26,50	28,13	29,03	27,97	28,90	23,50	26,40
9	25,80	23,50	25,80	24,30	27,30	25,80	28,12	28,26	28,79	28,20	24,90	26,30
10	25,50	23,20	26,00	23,30	26,90	26,80	28,13	28,90	28,69	26,70	25,40	26,30
11	23,80	24,00	26,00	25,00	25,90	27,30	28,73	29,08	29,69	25,60	25,30	26,00
12	23,40	24,70	26,30	25,10	24,90	28,20	28,42	29,14	28,02	25,80	25,40	25,80
13	22,50	23,90	22,40	25,90	26,00	28,30	28,97	28,66	27,04	27,50	25,80	25,90
14	23,10	21,30	24,60	26,60	26,90	27,90	29,50	27,68	27,50	27,80	26,20	25,90
15	22,10	22,90	25,90	26,80	25,60	28,80	27,92	28,40	27,78	27,90	24,70	26,00
16	21,90	23,90	25,70	26,10	25,10	28,60	28,22	29,12	29,38	27,40	25,90	26,20
17	22,30	24,70	26,40	26,40	26,50	28,40	28,34	28,65	28,21	27,60	25,50	26,10
18	21,80	24,90	26,70	26,60	27,40	27,40	29,62	29,34	28,18	27,60	26,10	26,10
19	22,20	25,00	26,80	26,90	25,60	26,50	29,54	29,17	28,82	27,90	26,20	25,50
20	24,00	25,20	26,50	26,40	27,50	28,90	29,36	31,17	29,14	27,80	26,40	25,30
21	23,80	25,20	26,40	25,80	28,60	28,50	29,18	30,29	29,08	27,50	26,60	23,90
22	24,40	25,20	26,10	25,70	28,30	27,80	28,71	29,72	28,86	27,00	26,10	24,20
23	22,50	25,30	26,50	25,50	27,00	27,90	29,65	29,89	28,93	26,80	23,60	22,40
24	20,40	25,20	23,60	26,00	26,90	28,10	29,33	29,39	29,25	27,40	24,10	23,90
25	22,00	24,90	23,50	26,10	27,80	28,50	29,13	29,82	28,08	28,00	24,60	24,00
26	24,90	25,10	23,70	26,20	27,60	27,90	28,30	29,85	27,50	28,00	23,80	24,20
27	24,30	25,40	24,60	26,00	27,10	27,40	28,76	30,51	26,74	27,90	24,50	23,80
28	23,80	24,70	24,40	25,80	26,30	27,10	29,28	29,05	27,24	28,10	24,00	23,60

29	19,80	-	24,60	25,30	26,80	28,60	28,79	27,17	27,69	27,10	23,30	24,00
30	15,90	-	25,60	25,80	27,50	29,60	28,74	28,83	26,49	26,60	24,50	25,10
31	19,80	-	-	-	27,50	-	29,25	27,98	-	26,20	-	25,00
<i>Media mensual</i>	23,13	24,10	25,23	26,10	26,84	27,43	28,86	29,15	28,53	27,68	25,36	25,01
<i>Media anual</i>	26,45											

Como se puede observar en la figura 3.2, el rango de variación de temperatura mínima y máxima se comporta de forma regular y no existen grandes diferencias entre estos valores, por lo que es adecuado para el correcto funcionamiento de esta tecnología. Sin embargo se deben tener en cuenta que para temperaturas superiores a los 25 °C la eficiencia de los paneles fotovoltaicos disminuye.

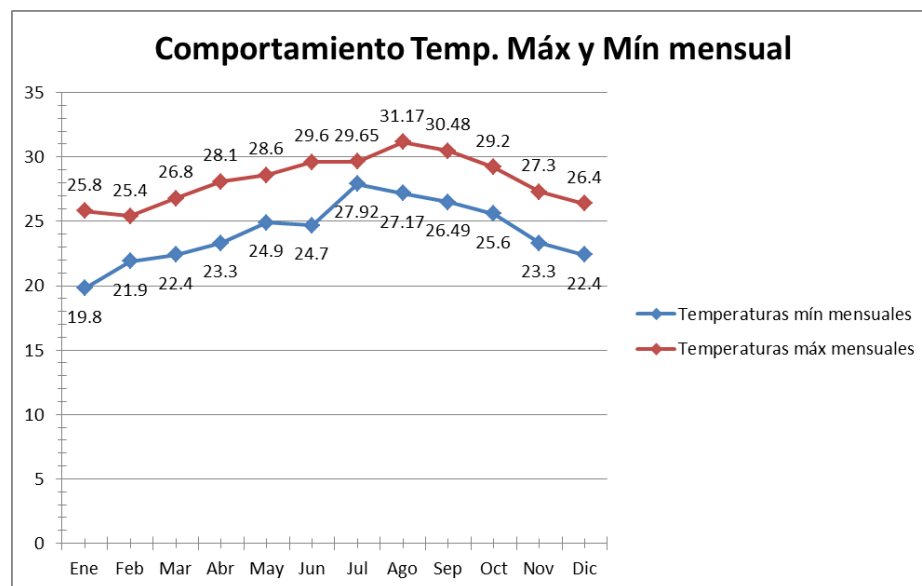


Figura 3.2 Valores máximos y mínimos de temperatura mensual. Fuente: Elaboración propia.

3.2 Campo de colectores térmicos.

La energía requerida para satisfacer la demanda térmica del generador de la enfriadora de absorción se suministra a través de un campo de 64 colectores solares térmicos planos SACLIMA modelo L-21. Estos presentan un área de captación por colector de 2,23 m²,

lo que proporciona un área total de instalación de 262 m^2 . Los captadores se disponen en 8 baterías de 8 colectores cada una, y se emplea entre ellas una conexión mixta.

3.3 Campo de paneles solares fotovoltaicos.

La energía requerida para satisfacer la demanda térmica del generador de la enfriadora de absorción se suministra a través de un campo de 126 paneles o colectores solares fotovoltaicos modelo JAM 72S30-550/MR. Estos presentan un área de $2,58 \text{ m}^2$, lo que proporciona un área de instalación de $528,84 \text{ m}^2$. Los paneles fotovoltaicos se disponen en cuatro grupos de 15 paneles conectados en paralelo por dos conectados en serie y uno de tres paneles en paralelo por dos en serie.

El sistema de generación fotovoltaico además está formado por:

- Un regulador MPPT de 100 V y 40 A.
- Cuatro reguladores MPPT de 450 V y 200 A.
- 56 baterías de 12 V y 1000 Ah.
- Tres inversores de 100 Kw.

3.4 Análisis económico y medioambiental de los resultados.

Mediante la utilización de una hoja de cálculo Excel se analizó la factibilidad de las inversiones necesarias para cada uno de los sistemas. Para realizar el análisis se tiene en cuenta el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y el período de recuperación de la inversión (Tri).

Con el empleo de los sistemas propuestos se logra un ahorro anual de 23 738,14 USD (569 765,36 CUP). Además se evita la quema de 192 099,39 litros de combustible al año (192,1 T/año). Esto se traduce en 612 573,36 litros anuales de CO_2 (612,57 T/año) que se dejan de emitir a la atmósfera. Estos resultados demuestran que este proyecto de inversión ahorra una cantidad de divisas importantes para el país y además contribuye a la reducción de la carga contaminante que provoca el sector del turismo en Cuba.

3.4.1 Sistema de colectores térmicos.

Como se puede observar en la tabla 3.3, el sistema térmico requiere de una inversión inicial de 39 660,40 USD (951 849,6 CUP). El tiempo que se tarda en recuperar la inversión es de aproximadamente 3 años. El valor de la tasa interna de retorno es igual a 59,85 %, lo que significa que se puede aumentar la tasa de descuento en esa magnitud y todavía sería un proyecto rentable. Durante el período de 20 años en que se analiza este proyecto, según indica el VAN, tendría una ganancia futura de 341 659,03 USD (8 199 816,72 CUP).

Tabla 3.3 Análisis económico para la variante térmica. Fuente: Elaboración propia.

Conceptos	Años					
	0	1	2	3	19	20
<i>Inversión (CTI)</i>	39660,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Total de pagos</i>	39660,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Total de cobros</i>	0,00	23738,14	23738,14	23738,14	23738,14	23738,14
<i>Mov. de fondos</i>	-39660,40	23738,14	23738,14	23738,14	23738,14	23738,14
<i>Mov. acumulado</i>	-39660,40	-15922,26	7815,88	31554,02	411364,26	435102,40
<i>Datos</i>						
Tasa de interés %						2
Impuesto sobre renta %						35
Tri =	2,52	años				
VAN =	341659,03	USD		Costo de inversión USD		
TIR =	59,85	%		Ahorro USD/año		
						39660,40
						23738,14

3.4.2 Sistema de paneles solares fotovoltaicos.

Según se observa en la tabla 3.4, el sistema fotovoltaico requiere de una inversión inicial de 252 000 USD (6 048 000 CUP). El tiempo que se tarda en recuperar la inversión es de aproximadamente 16 años. El valor de la tasa interna de retorno es igual a 6,97 %, lo que significa que se puede aumentar la tasa de descuento en esa magnitud y todavía sería un

proyecto rentable. Durante el período de 20 años en que se analiza este proyecto, según indica el VAN, tendría una ganancia futura de 133 482,95 USD (3 203 590,8 CUP).

Tabla 3.4 Análisis económico para la variante fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia.

<i>Años</i>	<i>Inversión (CTI)</i>	<i>Total de pagos</i>	<i>Total de cobros</i>	<i>Mov. de fondos</i>	<i>Mov. acumulado</i>
0	252000,00	252000,00	0,00	-252000,00	-252000,00
1	0,00	0,00	23738,14	23738,14	-228261,86
2	0,00	0,00	23738,14	23738,14	-204523,72
3	0,00	0,00	23738,14	23738,14	-180785,58
15	0,00	0,00	23738,14	23738,14	104072,1
16	0,00	0,00	23738,14	23738,14	127810,24
19	0,00	0,00	23738,14	23738,14	199024,66
20	0,00	0,00	23738,14	23738,14	222762,8
<i>Datos</i>					
				Tasa de interés %	2
Tri =	16,01	años	Impuesto sobre renta %	35	
VAN =	133482,95	USD	Costo de inversión USD	252000,00	
TIR =	6,97	%	Ahorro USD/año	23738,14	

CONCLUSIONES

1. El empleo de la refrigeración solar por medio de enfriadoras de absorción a nivel mundial se encuentra en aumento, debido a que la climatización es indispensable en muchos países, con énfasis en el sector turístico, que genera elevados niveles de consumo eléctrico.
2. Los valores de área necesaria para el montaje del sistema solar térmico y el fotovoltaico obtenidos mediante el dimensionamiento de los mismos fue de 262 m² y 528,84 m² respectivamente.
3. Es de vital importancia el análisis del comportamiento de las variables meteorológicas tales como la radiación solar, temperatura ambiente y nubosidad debido a su gran incidencia en la eficiencia con la que se puede captar la energía solar.
4. El análisis económico realizado muestra que es más factible la utilización del campo de colectores solares térmicos en lugar del campo de colectores solares fotovoltaicos, ya que los períodos de recuperación de la inversión son de 3 y 16 años respectivamente.
5. Con el empleo de los sistemas propuestos se ahorran 192,1 T de combustible al año y se dejan de emitir 612,57 T anuales de CO₂ a la atmósfera.

RECOMENDACIONES

1. Realizar un análisis más profundo y abarcador de la radiación solar en la localidad donde se realicen los proyectos basados en energía solar, debido a su comportamiento irregular a causa de las condiciones meteorológicas.
2. Fomentar y estimular el uso de esta tecnología en sectores priorizados para el desarrollo económico del país.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera, J., Hontoria, L., & Muñoz, F. J. (2011). *Dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomos* Universidad de Jaén].
- Al-Yasiri, Q., Szabó, M., & Arıcı, M. (2022). A review on solar-powered cooling and air-conditioning systems for building applications. *Energy Reports*, 8, 2888-2907. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.01.172>
- Alonso Falcón, R., Figueredo Reinaldo, O., & Sifonte Díaz, Y. (2021). Unión Eléctrica ejecuta ambicioso proceso inversionista y apuesta por las fuentes renovables de energía. In: *Cubadebate*.
- Alvarado Ladrón de Guevara, J. (2018). *Diseño y cálculo de una instalación fotovoltaica aislada* Universidad Politécnica de Madrid].
- Aramesh, M., & Shabani, B. (2020). On the integration of phase change materials with evacuated tube solar thermal collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 132, 26. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110135>
- Barone, G., Buonomano, A., Forzano, C., & Palombo, A. (2019). Chapter 6 - Solar thermal collectors. In F. Calise, M. D. D'Accadia, M. Santarelli, A. Lanzini, & D. Ferrero (Eds.), *Solar Hydrogen Production* (pp. 151-178). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814853-2.00006-0>
- Bérriz Pérez, L., & Álvarez Gonzáles, M. (2008). *Manual para el cálculo y diseño de calentadores solares* (Vol. 1). Editorial CUBASOLAR.
- Bravo Hidalgo, D. (2015). Energía y desarrollo sostenible en Cuba. *Centro azúcar*, 42(4), 14-25. <http://centrozucar.qf.uclv.edu.cu>
- Cambronero Unanue, X. (2013). *Climatización de una guardería con máquina de absorción y energía solar térmica* [Tesis de diploma, Universidad Pública de Navarra]. Pamplona.
- Carbonell, M. (2015). *Historia de la energía solar térmica*. www.HogarSense.es
- Carrión Chamba, W., Murillo Torres, W., & Montero Izquierdo, A. (2022). A review of the state of the art of solar thermal collectors applied in the industry. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, 1(27), 59-73. <https://doi.org/https://doi.org/10.17163/ings.n27.2022.06>
- Cremasco, N. P., Cordeiro, A. C., Lautert, R. R., Leludak, J. A., & Junior, J. U. (2022). Estudio de diferentes tecnologías de células fotovoltaicas. *Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia*, 12(31), 44-55.
- Cubaenergía. (2021). *renovable.cu*. <http://www.renovable.cu>
- de Castro Pizarro, S. (2016). *Diseño y dimensionamiento de una instalación de Frio Solar para un bloque de viviendas* [Tesis de grado, Universidad Carlos III de Madrid].
- Flensburg, K. I. (2019). Problemática energética global: desafíos y oportunidades para los alojamientos turísticos. In.
- Gao, D., Gao, G., Cao, J., Zhong, S., Ren, X., Dabwan, Y. N., . . . Pei, G. (2020). Experimental and numerical analysis of an efficiently optimized evacuated flat plate solar collector under medium temperature. *Applied Energy*, 269, 115129. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115129>

- González Rodríguez, L., & Rodríguez Ramírez, M. Á. (2020). *Diseño de una central fotovoltaica para la Empresa Habana Inmuebles HINES* [Tesis de grado, Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría CUJAE].
- González, A. M., Nordelo, A. B., Yanes, J. P. M., Bedregal, H. R. V., & Toca, C. E. S. (2017). Nuevos índices de consumo energético para hoteles tropicales; New energy indicators for tropical hotels. *Ingeniería energética*, 38(3), 198-207.
- Heredia, R. R., Cuán, J. E. C., & Carbonell, S. L. (2022). IV. 3. Solar photovoltaic energy in Cuba. In *Cuban energy system development* (pp. 138). <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-249-568-6>
- Hussain, M. I., Ménéz, C., & Kim, J.-T. (2018). Advances in solar thermal harvesting technology based on surface solar absorption collectors: A review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 187, 123-139. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.07.027>
- IRENA. (2019). People, planet and prosperity: Impulsando la ambición climática a través de las renovables. *International Renewable Energy Agency*, 1.
- IRENA. (2021). Renewable Power Generation Costs in 2020. *International Renewable Energy Agency*. <http://www.irena.org>
- IRENA. (2022). Renewable Energy Statistics 2022. *International Renewable Energy Agency*. <http://www.irena.org/Publications>
- Islam, M. P., & Morimoto, T. (2018). Advances in low to medium temperature non-concentrating solar thermal technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 28. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.030>
- Izquierdo Apolo, C., & Carcelén Pacheco, J. (2022). Geothermal Energy in Ecuador: Current Conditions and the Need for a Specific Legislation. *Iuris Dictio*, 1, 16-16. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18272/iu.v29i29.2527>
- Jiang, C., Yu, L., Yang, S., Li, K., Wang, J., Lund, P. D., & Zhang, Y. (2020). A review of the compound parabolic concentrator (cpc) with a tubular absorber. *Energies*, 13(3), 695. <https://doi.org/doi:10.3390/en13030695>
- Kumar, A. V., Arjunan, T., Seenivasan, D., Venkatramanan, R., & Vijayan, S. (2021). Thermal performance of an evacuated tube solar collector with inserted baffles for air heating applications. *Solar Energy*, 215, 131-143. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.12.037>
- Kumar, L., Hasanuzzaman, M., & Rahim, N. (2019). Global advancement of solar thermal energy technologies for industrial process heat and its future prospects: A review. *Energy Conversion and Management*, 195, 885-908. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.081>
- Kumar, N. M., Chopra, S. S., de Oliveira, A. K. V., Ahmed, H., Vaezi, S., Madukanya, U. E., & Castañón, J. M. (2020). Chapter 3 - Solar PV module technologies. In S. Gorjian & A. Shukla (Eds.), *Photovoltaic Solar Energy Conversion* (pp. 51-78). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819610-6.00003-X>
- Lamas Acevedo, J. L. (2013). *Mejora del proceso de condensación en un sistema de aire acondicionado centralizado utilizando agua de mar en sustitución del aire* [Master en ciencias, Universidad de Matanzas].
- López-Núñez, O. A., Alfaro-Ayala, J. A., Jaramillo, O., Ramírez-Minguela, J., Castro, J. C., Damian-Ascencio, C. E., & Cano-Andrade, S. (2020). A numerical analysis of

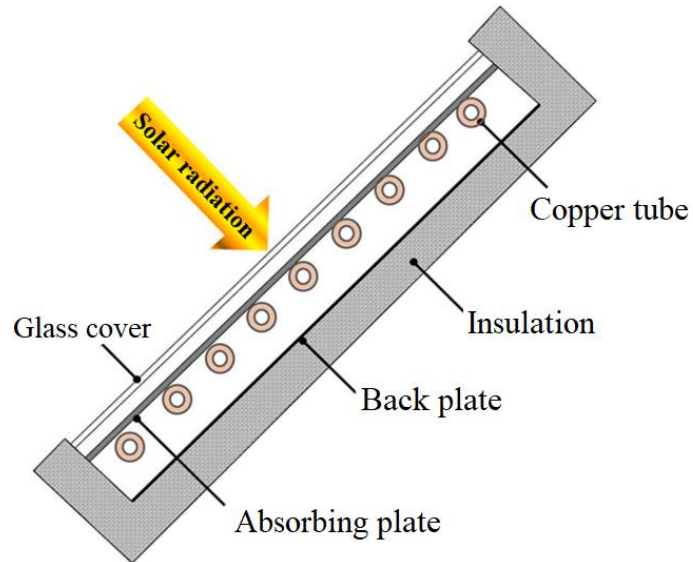
- the energy and entropy generation rate in a linear Fresnel reflector using computational fluid dynamics. *Renewable Energy*, 146, 1083-1100. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.144>
- López Ruiz, P. (2015). *Diseño de una instalación solar fotovoltaica para el suministro de energía eléctrica de una vivienda aislada* [Tesis de grado, Escola Tecnica Superior Enginyeria].
- Marín Silvestre, Á. (2020). *Modelado y análisis tecno-económico de plantas termosolares de receptor central hibridadas con fotovoltaica para aplicaciones de cogeneración de electricidad y agua desalada* [Máster, Universidad de Almería].
- Medina León, A., Nogueira Rivera, D., Quintana Tápanes, D., & Nogueira Rivera, M. (2010). Herramientas Económicas-Financieras para la toma de decisiones gerenciales. In (pp. 176).
- Moreno Figueredo, C. (2021). *Fuentes renovables de energía* (Vol. 1). Editorial CUBASOLAR.
- Narváez-Romo, B. (2020). Capítulo 11. Introducción a los Ciclos De Refrigeración Por Absorción de Calor Usando Solución De Amoniaco-Agua. In *La Ingeniería y sus Aplicaciones*.
- Padrós Corominas, F. (2013). *El frío que nace del calor*. ABSORSISTEM. www.absorsistem.com
- Pérez García, A., Pastor Sánchez, R., & Díaz Suárez, B. A. (2021). Desarrollo de las energías renovables en Cuba. 10ma Conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín,
- Pérez Martínez, M., Morales Rodríguez, I. C., & Castro, E. (2017). The hour equivalent solar pick: Definition and interpretation. *Ingeniería energética*, 38(2), 124-131.
- Ramanujam, J., Bishop, D. M., Todorov, T. K., Gunawan, O., Rath, J., Nekovei, R., . . . Romeo, A. (2020). Flexible CIGS, CdTe and a-Si:H based thin film solar cells: A review. *Progress in Materials Science*, 110, 100619. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100619>
- Richhariya, G., Kumar, A., & Samsher. (2020). Chapter 2 - Solar cell technologies. In S. Gorjian & A. Shukla (Eds.), *Photovoltaic Solar Energy Conversion* (pp. 27-50). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819610-6.00002-8>
- Righini, G. C., & Enrichi, F. (2020). Chapter One - Solar cells' evolution and perspectives: a short review. In F. Enrichi & G. C. Righini (Eds.), *Solar Cells and Light Management* (pp. 1-32). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102762-2.00001-X>
- Sakthivadivel, D., Balaji, K., Dsilva Winfred Rufuss, D., Iniyan, S., & Suganthi, L. (2021). Chapter 1 - Solar energy technologies: principles and applications. In J. Ren (Ed.), *Renewable Energy Driven Future* (pp. 3-42). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820539-6.00001-7>
- Schallenberg Rodríguez, J. C., Piernavieja Izquierdo, G., Hernández Rodríguez, C., & Unamunzaga Falcón, P. (2008). Energías renovables y eficiencia energética. In: Instituto Tecnológico de Canarias.
- Shafieian, A., Khiadani, M., & Nosrati, A. (2018). A review of latest developments, progress, and applications of heat pipe solar collectors. *Renewable and*

- Sustainable Energy Reviews*, 95, 273-304.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.014>
- Srikhirin, P., Aphornratana, S., & Chungpaibulpatana, S. (2001). A review of absorption refrigeration technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 5(4), 343-372. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(01\)00003-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1364-0321(01)00003-X)
- Stolik Novygrad, D. (2019). *Energía fotovoltaica para Cuba* (Vol. 1). Editorial CUBASOLAR.
- Suman, S., Khan, M. K., & Pathak, M. (2015). Performance enhancement of solar collectors—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 192-210. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.087>
- Suresh Kumar, N., & Chandra Babu Naidu, K. (2021). A review on perovskite solar cells (PSCs), materials and applications. *Journal of Materiomics*, 7(5), 940-956. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmat.2021.04.002>
- Vargas, V. M. T., Mayorga, D. F. B., Álvarez, M. P. F., & Espinoza, J. P. C. (2022). Los biocombustibles como alternativa de energía a partir de recursos renovables y/o desechos. *Polo del Conocimiento*, 7(7), 386-407. <https://doi.org/10.23857/pc.v7i7>
- Waghmare, S. A., & Gulhane, N. P. (2019). Design configurations and possibilities of reflector shape for solar compound parabolic collector by ray tracing simulation. *Optik*, 176, 315-323. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.09.082>
- Zarza Moya, E. (2018). Concentrating solar thermal power. In *A comprehensive guide to solar energy systems* (pp. 127-148). Elsevier. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-811479-7.00007-5>
- Zhai, X. Q., Qu, M., Li, Y., & Wang, R. Z. (2011). A review for research and new design options of solar absorption cooling systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4416-4423. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.06.016>

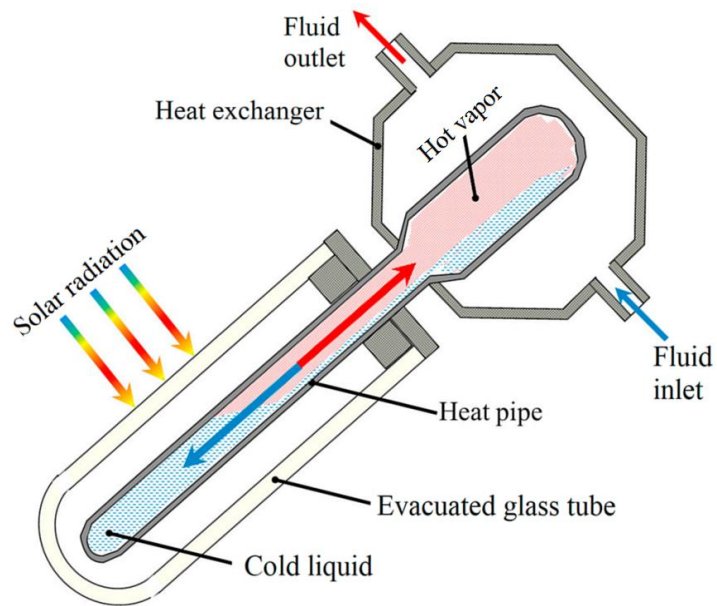
ANEXOS

Anexo 1 Tipos de colectores solares térmicos

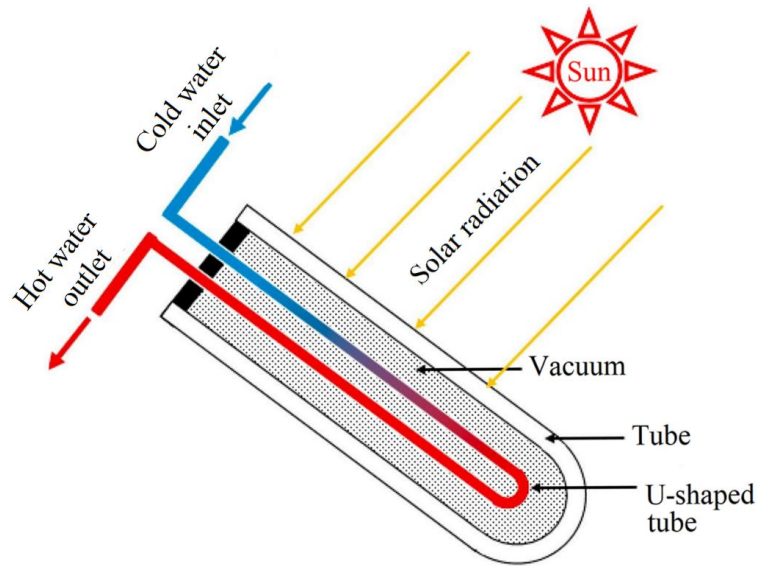
a. Parts of a flat plate collector. Fuente: (Suman et al., 2015).



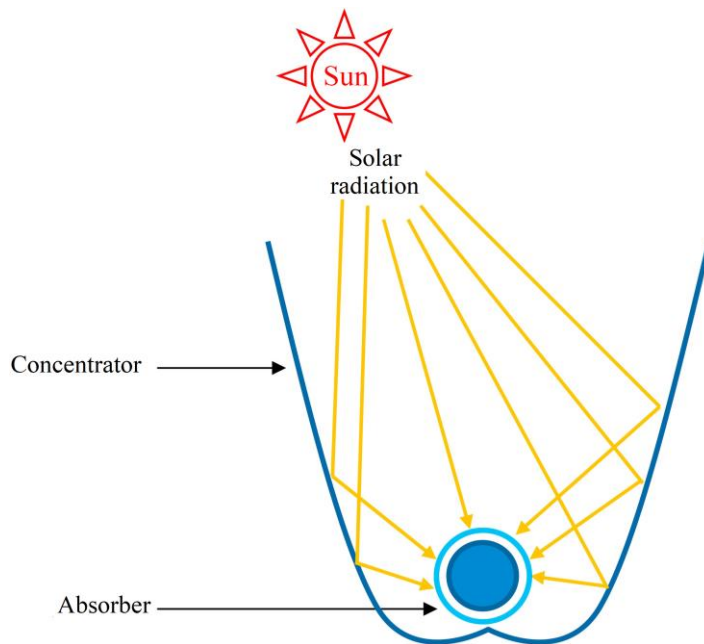
b. Cross-section of a heat-pipe tube collector. Fuente: (Suman et al., 2015).



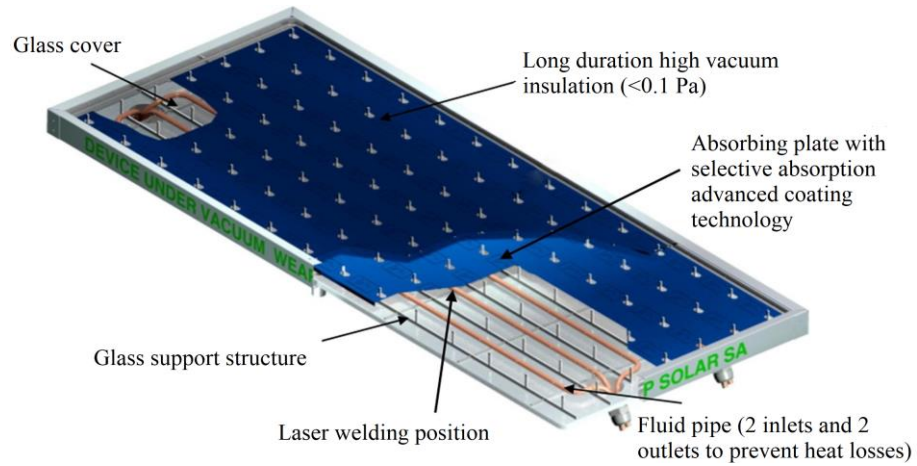
c. Cross-section of a direct flow vacuum tube collector. Fuente: (Carrión Chamba et al., 2022).



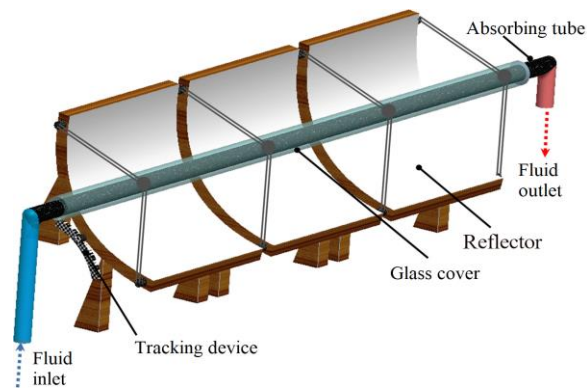
d. Compound parabolic collector. Fuente: (Carrión Chamba et al., 2022).



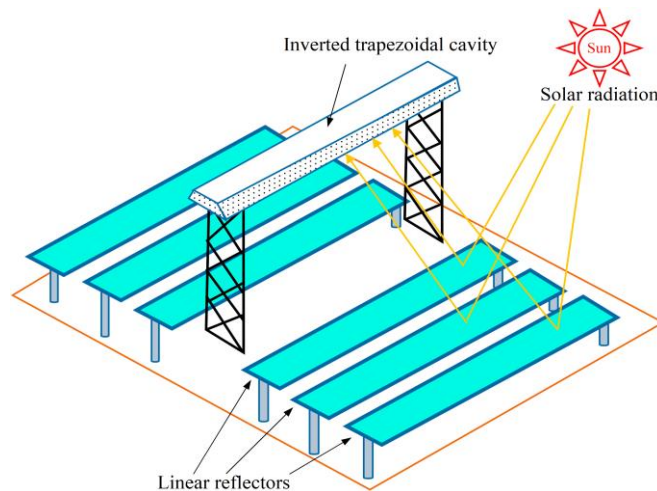
e. Structure of the evacuated flat plate collector. Fuente: (Gao et al., 2020).



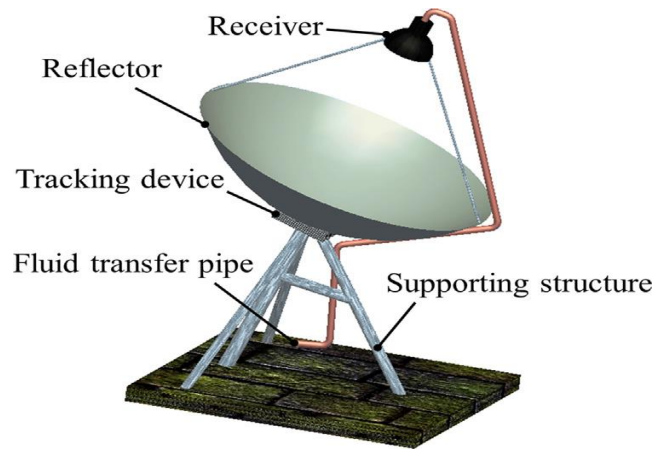
f. Scheme of a parabolic cylinder collector. Fuente: (Carrión Chamba et al., 2022).



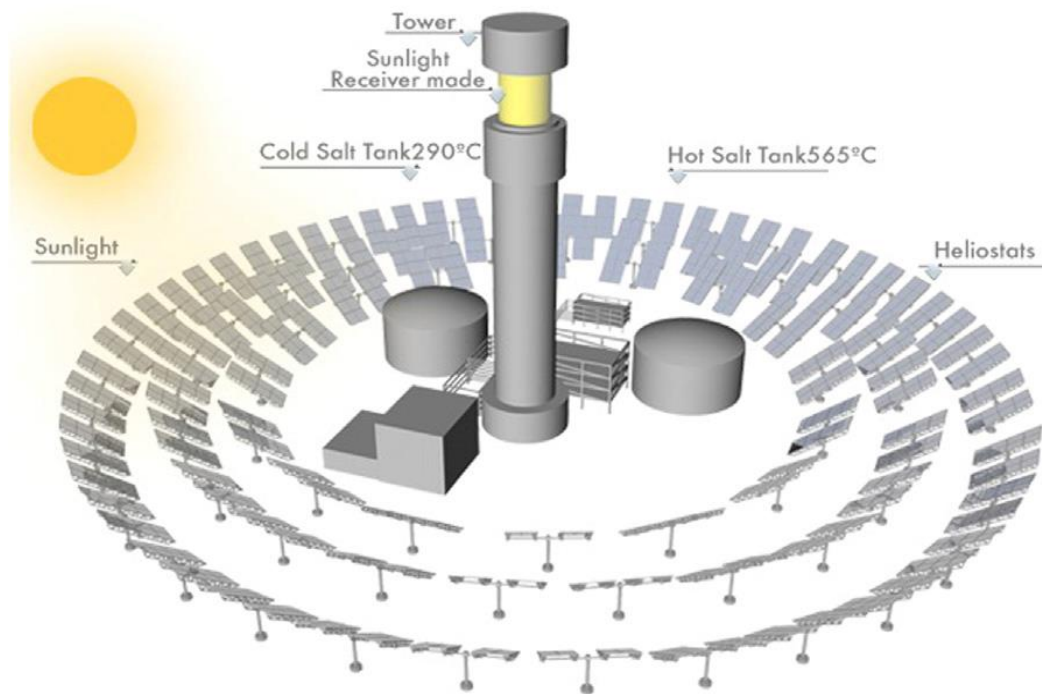
g. Scheme of a linear Fresnel collector. Fuente: (Carrión Chamba et al., 2022).



h. Parabolic dish reflector. Fuente: (Suman et al., 2015).



i. Central receiver system. Fuente: (Hussain et al., 2018).





Anexo 2 Índices de corrección de radiación solar. Fuente: Elaboración propia.

Inc	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1.05	1.04	1.02	1.01	1	0.99	1	1.01	1.03	1.04	1.05	1.05
10	1.09	1.07	1.04	1.01	0.99	0.98	0.99	1.01	1.05	1.08	1.1	1.1
15	1.12	1.09	1.05	1	0.97	0.96	0.97	1.01	1.06	1.11	1.14	1.14
20	1.15	1.11	1.05	0.99	0.95	0.93	0.95	0.99	1.06	1.13	1.18	1.18
25	1.17	1.11	1.05	0.97	0.92	0.9	0.92	0.98	1.06	1.15	1.2	1.2
30	1.18	1.12	1.04	0.95	0.88	0.86	0.88	0.95	1.05	1.15	1.22	1.22
35	1.18	1.11	1.02	0.92	0.84	0.81	0.84	0.92	1.03	1.15	1.23	1.23
40	1.18	1.1	0.99	0.88	0.79	0.76	0.79	0.88	1.01	1.14	1.23	1.24
45	1.17	1.08	0.96	0.84	0.74	0.7	0.73	0.83	0.98	1.13	1.23	1.23
50	1.16	1.06	0.92	0.79	0.68	0.64	0.68	0.78	0.94	1.1	1.21	1.22
55	1.13	1.02	0.88	0.73	0.62	0.57	0.61	0.73	0.89	1.07	1.19	1.2
60	1.1	0.99	0.83	0.67	0.55	0.5	0.54	0.67	0.84	1.03	1.16	1.18
65	1.06	0.94	0.78	0.61	0.48	0.43	0.47	0.6	0.79	0.99	1.13	1.14
70	1.02	0.89	0.72	0.54	0.41	0.35	0.4	0.53	0.73	0.94	1.08	1.1
75	0.97	0.84	0.66	0.47	0.33	0.28	0.32	0.46	0.66	0.88	1.03	1.05
80	0.91	0.78	0.59	0.4	0.26	0.2	0.24	0.39	0.59	0.81	0.97	1
85	0.85	0.71	0.52	0.32	0.18	0.12	0.17	0.31	0.52	0.74	0.91	0.94
90	0.79	0.64	0.45	0.25	0.1	0.8	0.8	0.23	0.44	0.67	0.84	0.87

Anexo 3 Valores de radiación solar para distintos ángulos de inclinación. Fuente: Elaboración propia.

Angulo incl	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
0	4.013	5.285	5.868	7.073	6.524	5.977	7.099	7.172	5.940	4.995	4.067	4.197	5.68
5	4.21	5.50	5.99	7.14	6.52	5.92	7.10	7.24	6.12	5.20	4.27	4.41	5.80
10	4.37	5.65	6.10	7.14	6.46	5.86	7.03	7.24	6.24	5.40	4.47	4.62	5.88
15	4.49	5.76	6.16	7.07	6.33	5.74	6.89	7.24	6.30	5.54	4.64	4.78	5.91
20	4.61	5.87	6.16	7.00	6.20	5.56	6.74	7.10	6.30	5.64	4.80	4.95	5.91
25	4.69	5.87	6.16	6.86	6.00	5.38	6.53	7.03	6.30	5.74	4.88	5.04	5.87
30	4.73	5.92	6.10	6.72	5.74	5.14	6.25	6.81	6.24	5.74	4.96	5.12	5.79
35	4.73	5.87	5.99	6.51	5.48	4.84	5.96	6.60	6.12	5.74	5.00	5.16	5.67
40	4.73	5.81	5.81	6.22	5.15	4.54	5.61	6.31	6.00	5.69	5.00	5.20	5.51
45	4.69	5.71	5.63	5.94	4.83	4.18	5.18	5.95	5.82	5.64	5.00	5.16	5.31
50	4.65	5.60	5.40	5.59	4.44	3.83	4.83	5.59	5.58	5.50	4.92	5.12	5.09
55	4.53	5.39	5.16	5.16	4.04	3.41	4.33	5.24	5.29	5.35	4.84	5.04	4.81
60	4.41	5.23	4.87	4.74	3.59	2.99	3.83	4.81	4.99	5.15	4.72	4.95	4.52
65	4.25	4.97	4.58	4.31	3.13	2.57	3.34	4.30	4.69	4.95	4.60	4.78	4.21
70	4.09	4.70	4.23	3.82	2.67	2.09	2.84	3.80	4.34	4.70	4.39	4.62	3.86
75	3.89	4.44	3.87	3.32	2.15	1.67	2.27	3.30	3.92	4.40	4.19	4.41	3.49
80	3.65	4.12	3.46	2.83	1.70	1.20	1.70	2.80	3.50	4.05	3.94	4.20	3.10
85	3.41	3.75	3.05	2.26	1.17	0.72	1.21	2.22	3.09	3.70	3.70	3.95	2.69
90	3.17	3.38	2.64	1.77	0.65	4.78	5.68	1.65	2.61	3.35	3.42	3.65	3.06

Anexo 4 Ficha técnica Yazaki WFC. Fuente: www.absorsistem.com

PLANTAS ENFRIADORAS DE AGUA POR CICLO DE ABSORCIÓN				TABLA ESPECIFICACIONES UNIDADES POR AGUA CALIENTE						
			Unidad de medida	MODELOS						
				WFC-SC5	WFC-SC10	WFC-SC20	WFC-SC30	WFC-SC50		
Capacidad frigorífica			kW	17,6	35,2	70,3	105,0	176,0		
Agua refrigerada	Temperatura agua refrigerada	entrada	°C	12,5						
		salida	°C	7,0						
	Pérdida de carga evaporador	kPa	56	51,0	59,8	60,8	35,9			
	Presión estática máxima	kPa	588							
	Caudal de agua	l/s	0,77	1,53	3,06	4,58	7,64			
Volumen de agua contenido			l	8	17	47	73	120		
Agua de enfriamiento para disipación calor	Calor a disipar		kW	42,7	85,4	171,0	256,0	428,0		
	Temperatura	entrada	°C	31,0						
		salida	°C	35,0						
	Pérdida de carga absorb/cond.	kPa	41	85,3	45,3	46,4	37,4			
	Factor ensuciamiento	kW/h/K/m²	0,086							
	Presión estática máxima	kPa	588							
	Caudal de agua	l/s	2,5	5,1	10,2	15,3	25,6			
Volumen de agua contenido			l	37	66	125	194	335		
Energía en forma de agua caliente al generador	Potencia calorífica a la entrada		kW	25,1	50,2	100,0	151,0	252,0		
	Temperatura	entrada	°C	88,0						
		salida	°C	83,0						
		rango	°C	70 ~ 95						
	Pérdida de carga en generador	kPa	88	90,4	46,4	60,4	86,7			
	Presión estática máxima	kPa	588							
	Caudal de agua	l/s	1,2	2,4	4,8	7,2	12,0			
Volumen de agua contenido			l	10	21	54	84	170		
Electricidad	Potencia suministro			Mono 220V		380V c.a. - III - 50Hz				
	Consumo		W	48	210	260	310	550		
	Intensidad		A	0,23	0,43	0,92	1,25	4,74		
Control	Refrigeración		Todo - nada							
Dimensiones	Ancho		mm	594	760	1.060	1.380	1.780		
	Fondo		mm	744	970	1.220	1.520	1.960		
	Alto (incluidas placas fijación)		mm	1736	1.920	2.030	2.065	2.135		
Peso	En vacío		kg	365	500	930	1.450	2.400		
	En carga		kg		600	1.155	1.800	3.025		
Acústica	Nivel sonoro		dB(A)		46	49	52	54		
Sección tubos agua	Agua refrigerada			DN-32	DN-40	DN-50		DN-80		
	Agua enfriamiento (torre)			DN-40	DN-50		DN 65	DN-80		
	Agua caliente generador			DN-40		DN-50	DN-65	DN-80		

Envolvente y acabado exterior: Envolvente de chapa galvanizada y pintada en caliente de color metalizado plata, resistente al agua e instalable tanto en el interior como en el exterior.

L-21

Dimensiones	mm	1990X1222X91
Peso en Vacío	Kg	44
Capacidad primario	Lit.	1,7
Superficie total	m ²	2,43
Superficie de apertura	m ²	2,23
Rendimiento		0,785
Contraseña de certificación		NPS-46613

CARCASA

Material Aluminio 6603-60 (AlMgSiO5) según norma EN 12975-1-2

ABSORBEDOR

Tipo		Parrilla de tubos
Material tubo/aleta		cobre
Ø Colector sup./inf.	mm	18/22/24
Presión máxima	bar	10
Acabado absorbedor		Almecco-Tinox
Área total	m ²	2,07
Área de apertura	m ²	1,92
Caudal recomendado	Lit./hm ²	50-60
Pérdida de carga	mm.c.a	16 (T ^a amb. y 2 l/min)
Espesor	mm	0,40
Absorbancia	%	95
Reflectancia	%	3
Soldadura		Laser

AISLAMIENTO

Material		Lana de roca
Espesor	mm	40
Conductividad Térmica	W/(mk)	0,037

RACORES UNIÓN

Tipo		Flexible metálica en acero inoxidable
Diámetro ext. unión	mm	18/22/24
Longitud unión	mm	40
Distancia entre captadores	mm	66

CRISTAL

Tipo		Vidrio templado bajo en hierro
Espesor	mm	4
Transmitancia del vidrio	%	91

RENDIMIENTO

Norma		UNE EN 12975
Rendim. Óptico		0,785
a ₀	W/m ² C	3,722
a ₁		0,012
T ^a de estancamiento	°C	203

Anexo 6 Valores típicos de coeficientes de pérdida. Fuente: Elaboración propia.

K_b	Pérdidas en el proceso de acumulación
0,05	Acumuladores nuevos, sin descargas intensas
0,1	Acumuladores viejos, descargas intensas
K_r	Pérdidas en el controlador de carga
0,1	Controlador de carga eficiente
0,15	Controlador de carga antiguo, poco eficiente
K_a	Autodescarga de la batería
0,002	Baterías de baja autodescarga, sin mantenimiento
0,005	Baterías estacionarias de energía solar
0,012	Baterías de alta autodescarga
K_i	Pérdidas por el rendimiento del inversor
0	No hay inversor en la instalación
0,05	Rendimiento inversor 95%
0,1	Rendimiento inversor 90%
0,15	Rendimiento inversor 85%
0,2	Rendimiento inversor < 85%
K_v	Otras pérdidas
0,1	Si no se tienen en cuenta las pérdidas en cableado y equipos
0,05	Si ya se realizó un estudio detallado de las pérdidas.
P_d	Profundidad de descarga máxima admisible
0,9	Batería descargada hasta el 90%
0,8	Batería descargada hasta el 80%
0,7	Batería descargada hasta el 70%
0,6	Batería descargada hasta el 60%
0,5	Batería descargada hasta el 50%
0,4	Batería descargada hasta el 40%
0,3	Batería descargada hasta el 30%
N	Número de días de autonomía
1	Sistema híbrido

Anexo 7 Ficha técnica módulo fotovoltaico JAM72S30-550/MR. Fuente:

www.jasolar.com.

MECHANICAL DIAGRAMS

Remark: customized frame color and cable length available upon request

SPECIFICATIONS

Cell	Mono
Weight	28,6kg±3%
Dimensions	2279±2mm×1134±2mm×35±1mm
Cable Cross Section Size	4mm ² (IEC) , 12 AWG(UL)
No. of cells	144(6×24)
Junction Box	IP68, 3 diodes
Connector	QC 4,10(1000V) QC 4,10-35(1500V)
Cable Length (Including Connector)	Portrait: 300mm(+)/400mm(-); Landscape: 1300mm(+)/1300mm(-)
Packaging Configuration	31pcs/Pallet, 620pcs/40ft Container

ELECTRICAL PARAMETERS AT STC

TYPE	JAM72S30 -525/MR	JAM72S30 -530/MR	JAM72S30 -535/MR	JAM72S30 -540/MR	JAM72S30 -545/MR	JAM72S30 -550/MR
Rated Maximum Power(Pmax) [W]	525	530	535	540	545	550
Open Circuit Voltage(Voc) [V]	49,15	49,30	49,45	49,60	49,75	49,90
Maximum Power Voltage(Vmp) [V]	41,15	41,31	41,47	41,64	41,80	41,96
Short Circuit Current(Isc) [A]	13,65	13,72	13,79	13,86	13,93	14,00
Maximum Power Current(Imp) [A]	12,78	12,83	12,90	12,97	13,04	13,11
Module Efficiency [%]	20,3	20,5	20,7	20,9	21,1	21,3
Power Tolerance	0~+5W					
Temperature Coefficient of Isc(α _{Isc})	+0,045%/°C					
Temperature Coefficient of Voc(β _{Voc})	-0,275%/°C					
Temperature Coefficient of Pmax(γ _{Pmp})	-0,350%/°C					
STC	Irradiance 1000W/m ² , cell temperature 25°C, AM1,5G					

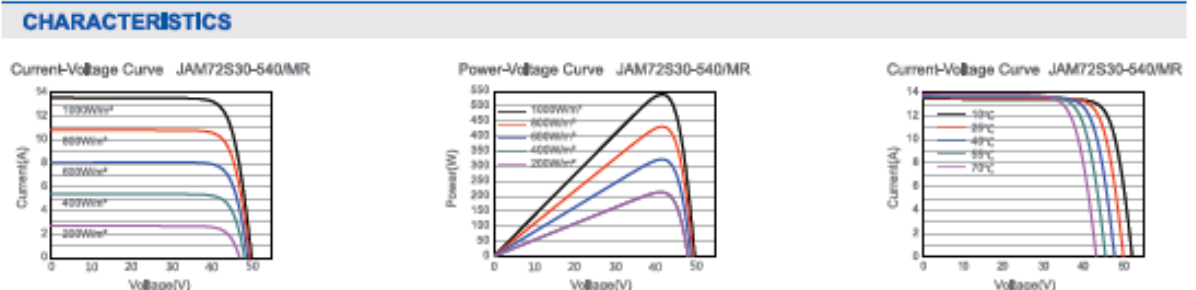
Remark: Electrical data in this catalog do not refer to a single module and they are not part of the offer. They only serve for comparison among different module types.

ELECTRICAL PARAMETERS AT NOCT

TYPE	JAM72S30 -525/MR	JAM72S30 -530/MR	JAM72S30 -535/MR	JAM72S30 -540/MR	JAM72S30 -545/MR	JAM72S30 -550/MR
Rated Max Power(Pmax) [W]	397	401	405	408	412	416
Open Circuit Voltage(Voc) [V]	46,05	46,18	46,31	46,43	46,55	46,68
Max Power Voltage(Vmp) [V]	38,36	38,57	38,78	38,99	39,20	39,43
Short Circuit Current(Isc) [A]	10,97	11,01	11,06	11,09	11,13	11,17
Max Power Current(Imp) [A]	10,35	10,39	10,43	10,47	10,51	10,55
NOCT	Irradiance 800W/m ² , ambient temperature 20°C, wind speed 1m/s, AM1,5G					

OPERATING CONDITIONS

Maximum System Voltage	1000V/1500V DC
Operating Temperature	-40°C~+85°C
Maximum Series Fuse Rating	25A
Maximum Static Load, Front*	5400Pa(112lb/ft ²)
Maximum Static Load, Back*	2400Pa(50lb/ft ²)
NOCT	45±2°C
Safety Class	Class II
Fire Performance	UL Type 1



Anexo 8 Valores de radiación global horizontal diarios (octubre 2021 - septiembre 2022) en W/m². Fuente: Centro Meteorológico Provincial Matanzas.

Días	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
1	195.00	188.80	207.80	267.50	315.00	143.40	341.21	290.29	379.70	268.00	191.80	199.30	
2	196.80	217.10	264.70	298.30	326.70	100.10	318.66	315.66	374.41	217.60	217.00	112.00	
3	186.90	222.80	268.00	292.60	299.50	34.60	329.88	273.90	281.36	255.80	209.90	116.70	
4	127.00	223.10	253.30	289.80	277.20	166.30	277.02	242.77	464.37	269.10	183.80	200.00	
5	146.30	220.00	270.60	270.60	325.30	308.10	230.94	353.16	269.21	265.30	173.30	194.70	
6	194.30	230.20	242.30	276.80	323.80	108.50	328.36	310.57	228.68	248.70	224.90	189.90	
7	198.30	233.60	270.20	249.10	276.10	102.60	332.33	297.62	302.03	234.30	199.00	152.30	
8	187.00	228.10	262.40	255.50	297.80	188.60	292.37	254.43	175.51	249.90	206.40	190.10	
9	167.40	180.20	248.80	304.20	280.00	171.60	332.31	210.36	174.75	189.30	190.60	194.40	
10	184.10	141.80	247.10	273.50	290.40	304.20	351.74	198.45	213.14	185.90	210.70	194.10	
11	107.00	173.60	259.20	321.70	333.50	278.10	303.95	281.90	283.35	183.00	101.00	193.00	
12	167.30	210.00	255.50	320.70	203.10	323.30	225.98	302.91	166.05	245.50	116.80	113.80	
13	71.10	149.70	96.10	289.80	294.70	315.20	287.53	287.01	180.45	229.50	143.50	166.10	
14	174.40	207.00	180.50	298.40	329.50	286.30	281.12	284.29	228.88	216.40	131.10	150.00	
15	214.20	181.10	271.50	314.30	254.60	320.10	307.84	302.36	195.57	207.10	44.50	188.90	
16	133.30	201.70	340.30	315.50	271.80	328.90	269.86	338.34	291.49	224.40	177.40	187.60	
17	127.90	234.20	14.70	303.40	297.70	328.40	259.88	288.63	216.41	243.00	45.90	184.10	
18	177.90	228.30	286.10	308.80	329.10	335.60	312.59	304.58	224.04	177.30	135.80	172.70	
19	203.40	221.60	286.80	294.10	222.40	234.20	310.39	358.47	276.95	232.30	191.70	186.60	
20	196.10	229.00	290.20	310.70	145.50	242.10	291.95	449.56	298.36	223.30	168.80	178.40	
21	179.00	258.60	292.40	220.00	271.10	192.00	338.94	313.56	278.20	112.10	178.80	88.60	
22	197.70	256.30	237.30	294.00	286.00	247.50	210.01	310.65	266.03	145.70	177.50	163.50	
23	48.10	258.00	211.40	242.30	209.20	311.40	272.38	408.04	299.80	189.20	161.50	182.50	
24	188.40	256.20	67.90	303.10	203.00	303.00	311.37	247.37	275.36	181.10	167.60	192.20	
25	200.90	244.10	240.10	318.70	321.00	291.00	327.35	263.66	214.66	126.70	208.30	193.40	
26	203.10	260.30	308.30	315.80	326.50	258.90	322.27	294.37	93.33	216.70	202.90	192.30	
27	168.00	256.90	306.20	298.40	280.90	291.30	266.36	460.29	60.21	207.60	200.00	166.00	
28	154.80	253.30	305.00	331.80	190.60	289.70	295.94	261.32	153.19	161.60	191.60	196.30	
29	75.10		305.00	331.20	301.60	331.80	291.34	183.81	365.87	128.90	173.90	192.60	
30	215.70		245.50	330.60	220.70	334.00	226.83	327.80	193.09	225.30	157.50	193.10	Promedio
31	196.40				122.00		320.31	247.32		191.80		195.70	anual
Promedio mensual	167.19	220.20	244.51	294.71	271.82	249.03	295.77	298.82	247.48	208.14	169.45	174.87	236.83
Kwh/m²/dia	4.013	5.285	5.868	7.073	6.524	5.977	7.099	7.172	5.940	4.995	4.067	4.197	5.684