

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

**DESEMPEÑO DE UN PANEL FOTOVOLTAICO ENFRIADO
CON AGUA**

TRABAJO ESCRITO

Que para obtener el **DIPLOMA** de
ESPECIALIZACIÓN EN DESARROLLO SUSTENTABLE

Presenta:

Roberto Aguíñiga Ramírez

1942

Director de Tesina:

Dr. Ricardo Arturo Perez Enciso

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

Página dejada intencionalmente en blanco

CARTA DE APROBACIÓN DE LOS MIEMBROS DEL JURADO

Página dejada intencionalmente en blanco

RESUMEN

Las energías limpias cada vez van en aumento a nivel mundial y la energía solar fotovoltaica se convierte en una opción más factible para instalaciones de autoconsumo tanto en la industria como en los hogares, ayudando de esta manera a cumplir con los Objetivos del Desarrollo Sustentable estipulados por la ONU. Con ello se llevó a cabo un análisis literario del estado del arte de diferentes sistemas de enfriamiento y sus beneficios al controlar la temperatura de una celda fotovoltaica.

Se propuso la implementación de un sistema de enfriamiento para controlar la temperatura de un panel fotovoltaico, ya que al incrementarse la temperatura, se presenta una reducción de la eficiencia en la producción de energía eléctrica cuando la temperatura del panel aumenta por encima de los 25 °C, llegando a afectar su voltaje y por ende su potencia, convirtiendo una parte de la energía solar en energía eléctrica y la energía térmica generada por el aumento de temperatura del panel se pierde en calor disipado al ambiente.

De esta forma, se desarrolló un sistema de enfriamiento para paneles solares utilizando agua como refrigerante, donde dicho sistema de enfriamiento diseñado consiste en la adición de un recubrimiento de vidrio colocado por enfrente del panel solar con una separación de 1 cm entre el vidrio y el panel, por el cual se dejará pasar un flujo constante de agua a través del panel para evitar la ganancia de calor aún antes de que llegue a éste, midiendo voltajes, corrientes, temperatura del panel y temperatura del agua de entrada y de salida.

Por último, se evaluó la potencia total producida por un panel con sistema de enfriamiento contra un panel solar de las mismas características sin ninguna adecuación, considerando, si es que aplica, la potencia eléctrica y térmica que se genera en ambos casos, llevando este tipo de investigación como punta de iceberg para procesos de cogeneración en energía fotovoltaica como en energía térmica.

ABSTRACT

Clean energies are increasing worldwide, and solar photovoltaic energy becomes a more feasible option for self-consumption installations both in industry and in homes, thus helping to meet the Sustainable Development Goals stipulated by the ONU. With this, a literary analysis of the state of the art of different cooling systems and their benefits when controlling the photovoltaic cell temperature was carried out.

The implementation of a cooling system was proposed to control the temperature of a photovoltaic panel, since when the temperature increase, this lies in a decrease in its efficiency in the production of electrical energy when the temperature of the panel increases above 25 ° C, affecting its voltage and therefore its power, converting a part of the solar energy into electrical energy and the thermal energy generated by the increase in temperature of the panel is lost as heat dissipated to the environment.

In this way, a cooling system for solar panels was developed using as cooling water, where said designed cooling system consists of the addition of a glass coating placed in front of the solar panel with a separation of 1 cm between the glass and the panel, through which a constant flow of water will be allowed to pass through the panel to avoid heat gain even before it reaches it, measuring voltages, currents, temperature of the panel, and inlet and outlet water temperatures.

Finally, the maximum power produced of the panel with a cooling system was evaluated against a solar panel of the same characteristics without any adaptation, considering, if applicable, the electrical and thermal power that is generated in both cases, leading this type of research as the tip of the iceberg for cogeneration processes in photovoltaic energy as well as in thermal energy.

AGRADECIMIENTO

Antes que nada, quiero agradecer a Dios por darme el tiempo perfecto para realizar este posgrado, además de darme la oportunidad de seguir preparándome escolarmente y poder concluir satisfactoriamente esta etapa de la especialidad. Quiero agradecer a mis maestros del posgrado, que siempre tuvieron las puertas abiertas y disponibilidad ante dudas escolares y no escolares, pero un aprecio especial para mi tutor de la tesina el Dr. Ricardo, que me acompañó y me guio en todo el proceso, con inteligencia, gran espíritu y una sonrisa franca.

Quiero agradecer a mis papás, que me apoyaron en mi decisión de seguir preparándome y estando en mis momentos difíciles, y por último y no menos importante, a mi novia y amigos, que siempre están atrás de mí, preguntándome por mis avances, ayudándome cada vez que pido de su ayuda y dándome ánimos constantes para terminar esta bella etapa. Ha sido un trabajo arduo, pero de mucho aprendizaje y satisfacción.

Por todos ustedes, muchas gracias.

Página dejada intencionalmente en blanco

ÍNDICE

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|----|
| ÍNDICE DE TABLAS | 2 |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | 3 |
| ÍNDICE DE ANEXOS..... | 3 |
| NOMENCLATURA | 4 |
| I. INTRODUCCIÓN..... | 5 |
| II. OBJETIVO ESTRATÉGICO..... | 6 |
| III. OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 6 |
| IV. ANÁLISIS LITERARIO..... | 7 |
| 4.1. Energía y medio ambiente | 7 |
| 4.2. Radiación Solar y sus principales características | 10 |
| 4.3. Efecto fotovoltaico y celda fotovoltaica | 12 |
| 4.4. Componentes de un panel fotovoltaico..... | 14 |
| 4.5. Pérdidas de eficiencia por temperatura en los sistemas fotovoltaicos | 16 |
| 4.6. Métodos/técnicas de enfriamiento de paneles fotovoltaicos | 20 |
| V. METODOLOGÍA | 24 |
| VI. RESULTADOS..... | 30 |
| VII. DISCUSIÓN..... | 39 |
| VIII. CONCLUSIONES | 41 |
| IX. RECOMENDACIONES..... | 42 |
| X. REFERENCIAS..... | 43 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Tabla comparativa de Coeficientes de Temperatura de Potencia Nominal entre paneles solares de silicio | 18 |
| Tabla 2. Tabla comparativa de Coeficientes de Temperatura de Voltaje entre paneles solares de silicio | 18 |
| Tabla 3. Tabla comparativa de Coeficientes de Temperatura de Corriente entre paneles solares de silicio | 18 |
| Tabla 4. Características eléctricas del panel solar con las condiciones STC..... | 27 |
| Tabla 5. Relación de características STC entre Voc-Vmax y Isc-Imax del panel solar | 37 |
| Tabla 6. Potencia eléctrica generada con panel solar, con sistema y sin sistema de enfriamiento..... | 37 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Comparación de los impactos ambientales de ocho tecnologías de generación eléctrica..... | 7 |
| Figura 2. Capacidad instalada por tipo de tecnología al 31 de diciembre de 2020 | 9 |
| Figura 3. Espectro electromagnético de la radiación solar en metros | 10 |
| Figura 4. Mapa de recurso solar de México | 12 |
| Figura 5. Detalle del interior de las capas del semiconductor de una célula fotovoltaica... .. | 13 |
| Figura 6. Ejemplo de cómo se compone un arreglo fotovoltaico | 14 |
| Figura 7. Componentes de un panel solar | 15 |
| Figura 8. Mecanismos de transferencia de calor ejemplificado en una olla con agua y siendo calentada..... | 17 |
| Figura 9. Gráfica típica de una Curva I-V por efecto de temperatura | 19 |
| Figura 10. Dependencia de la temperatura para Isc, Voc y Pmax | 20 |
| Figura 11. Flujo de energía en un panel solar | 21 |
| Figura 12. Cinta doble "super spacer" | 25 |
| Figura 13. Componentes para el sistema de enfriamiento | 25 |
| Figura 14. Diseño de montaje de los paneles a evaluar | 26 |
| Figura 15. Comparativa de temperatura de entrada y salida del agua para día 1 y 2 | 31 |
| Figura 16. Calorimetría de panel con sistema de enfriamiento..... | 32 |
| Figura 17. Temperatura del panel. Día 1 | 33 |
| Figura 18. Temperatura del panel. Día 2..... | 34 |
| Figura 19. Gráfica característica de la curva I-V del panel Kyocera de 87 W | 35 |
| Figura 20. Radiación Global registrada en día 1 | 35 |
| Figura 21. Radiación Global registrada en día 2..... | 36 |
| Figura 22. Gráfica comparativa de potencia como sistema..... | 38 |

ÍNDICE DE ANEXOS

NOMENCLATURA

I. INTRODUCCIÓN

La producción de energía eléctrica por medio de energías limpias cada vez va más en aumento a nivel mundial, donde México continúa siendo un punto focal para invertir en este tipo de tecnologías, siendo la energía fotovoltaica una con más crecimiento a nivel mundial. Las empresas en México, al igual que el país, tienen ciertas metas a cumplir respecto al sector energético, teniendo como objetivo, producir un porcentaje del total de la energía consumida por medio de tecnologías limpias y de esta manera contribuir con los objetivos nacionales energéticos.

Respecto al sector industrial, se ha popularizado cada vez más el uso de energía solar fotovoltaica aprovechando y sacando beneficio del espacio eficiente de techo que manejan en sus almacenes o en las instalaciones del lugar. Además, los precios de las diferentes tecnologías en energía fotovoltaica, ya sea paneles solares o inversores, se han vuelto más accesibles y eficientes, produciendo más energía en el mismo espacio disponible, creando proyectos más viables y benéficos para el desarrollo de la industria, apostando en la inversión de sistemas fotovoltaicos.

Al contrario de lo que se piensa comúnmente, los paneles solares no producen más energía por hacer más calor, de hecho, éstos bajan su eficiencia convirtiendo menor cantidad de energía solar a energía eléctrica. Por ello, el sector industrial trata de ocupar todo el espacio disponible en sus azoteas para generar la mayor cantidad de energía y tenerla a su disposición, para bajar las cuentas tan altas a pagar ante CFE. Sin embargo, los consumos de energía que requieren las industrias en ocasiones son mayores que el área de trabajo que se puede utilizar en los techos para instalaciones de sistemas solares fotovoltaicos, por lo tanto, no se alcanza a producir la energía necesaria para cubrir el 100% del consumo eléctrico de la industria.

Por esta razón se propone un sistema de enfriamiento para paneles solares, donde en los resultados se evalúa la eficiencia como sistema ante un panel solar sin sistema de enfriamiento, se concluye en la viabilidad del sistema y se dan recomendaciones respecto al sistema de enfriamiento.

II. OBJETIVO ESTRATÉGICO

Mejorar la eficiencia en la potencia de un panel solar por medio de un sistema de enfriamiento a base de agua.

III. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Llevar a cabo un análisis literario del estado del arte sobre los sistemas de enfriamiento de paneles fotovoltaicos y las mejoras en eficiencia que se logra al controlar la temperatura de operación de estos sistemas
- Diseñar un sistema de enfriamiento para un panel fotovoltaico
- Implementar un sistema de enfriamiento para un panel fotovoltaico
- Validar el funcionamiento de un panel fotovoltaico con un sistema de enfriamiento

IV. ANÁLISIS LITERARIO

4.1. Energía y medio ambiente

En las últimas décadas, el consumo de energía a ido en aumento de una forma enorme (Baptista et al., 2012), por el crecimiento poblacional, donde proyecciones realizadas en 2020 por la ONU, señalan un crecimiento de 800 millones de personas para el 2030 (Naciones Unidas, 2020b), teniendo en cuenta que entre más población, mayor necesidad de energía y mayor contaminación (Bañuelos, 2018) generando impactos peligrosos al medio ambiente, causando efectos negativos de manera directa o indirecta a la economía (Barbir, Veziroğlu y Plass, 1990). De esta forma, al contaminar el medio ambiente por las emisiones generadas de los gases de efecto invernadero, causan el cambio climático, asociándose con impactos a la salud humana a largo plazo (Bridges et al., 2015). En la Figura 1 se puede ver una gráfica comparativa de impacto ambiental de 8 tecnologías de generación eléctrica.

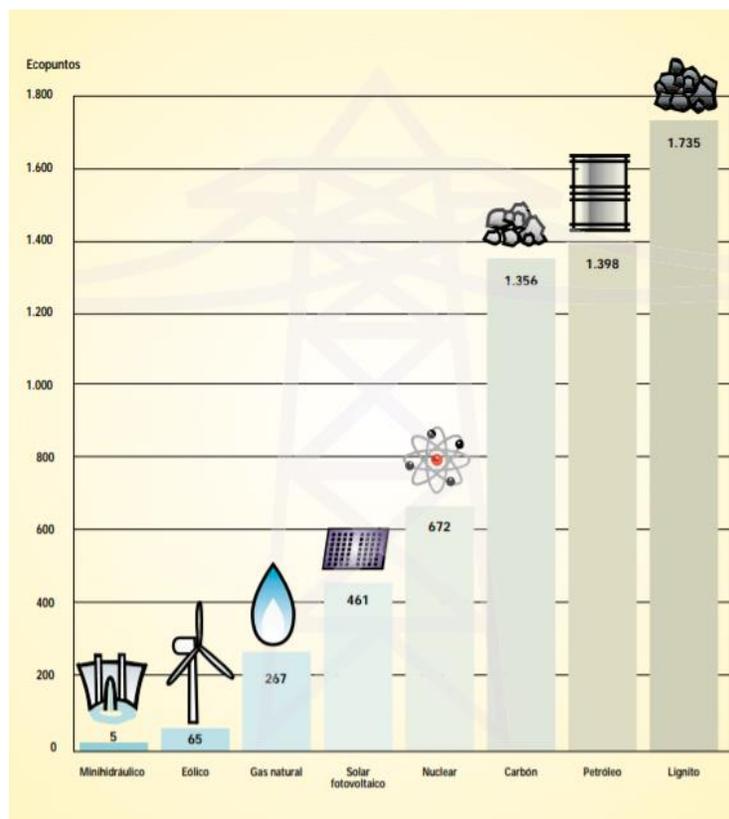


Figura 1. Comparación de los impactos ambientales de ocho tecnologías de generación eléctrica

Fuente: (Gas Natural Fundación, 2011). (El Análisis de Ciclo de Vida de la generación eléctrica tiene por objetivo principal la evaluación de las externalidades ambientales asociadas a la generación de un kWh, partiendo de la evaluación física de los impactos, su clasificación y comparación. Posteriormente, se reducen todos los valores obtenidos a unos valores finales que determinarán lo que se denomina eco-puntos)

El sector energético es una de las mayores fuentes de contaminantes del medio ambiente, aún por encima del sector industrial y de transporte (Roy y Majumder, 2016), por esa razón, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en 2015 adoptó la Agenda 2030 para el Desarrollo Sustentable y los Objetivos del Desarrollo Sustentable (SDGs, por sus siglas en inglés) (Naciones Unidas, 2020). El objetivo 7 de la Agenda 2030 busca la “energía asequible y no contaminante”, y aunque el mundo sigue avanzando hacia las metas de energía sostenible, aún no se alcanza la magnitud necesaria para cumplir con dicho objetivo (Naciones Unidas, 2020a), por esa razón se debe de buscar un uso eficiente de la energía, reducir la contaminación y generar un ahorro económico (Bermúdez et al., 2019).

Por consecuencia, la conciencia ambiental ha ido en aumento, dando como resultado el aumento a la generación de energía a través de fuentes renovables y para finales del 2018 la capacidad global de generación renovable alcanzó los 2 351 GW, donde la energía solar dominó con un incremento de 94 GW comparado al año anterior (International Renewable Energy Agency (IRENA), 2019). Para el año 2019, el mercado de la energía solar fotovoltaica siguió en crecimiento aumentado un 12%, un estimado de 115 GW, de esta manera la demanda solar fotovoltaica se encuentra creciendo y expandiéndose en diversos lugares convirtiéndose en la opción más competitiva para la generación de energía, tanto residencial, industrial como en megaproyectos (REN21, 2020). Sin embargo, por causa de la pandemia mundial de COVID-19, decreció un 17% en la primera mitad del año 2020 respecto al año anterior para la energía solar, pero para finales del año su crecimiento se mantuvo estable (International Energy Agency, 2020).

En México, a partir de la Reforma Energética, entrada en vigor el 12 de agosto del 2013, tiene como uno de los principales objetivos atraer mayor inversión al sector energético mexicano para impulsar el desarrollo del país con responsabilidad social y ambiental (Gobierno de México, 2015). Con la puesta en marcha de la Reforma Energética vino consigo la Ley de Transición Energética, estableciendo que el incremento de las Energías Limpias debe de ser gradual para llegar a la meta del 2024, donde el PIIRCE (Programa Indicativo para la Instalación y Retiro de Centrales Eléctricas) observa que las metas se

alcanzarían hasta el 2025, debido a retrasos en construcción y cancelación de proyectos (CENACE, 2020).

Respecto al consumo de energía que ha tenido México, en el reporte energético de 2017, el sector eléctrico tuvo un incremento de un 39.3% en producción de energías limpias en el período del 2012 hasta esa fecha, destacando la energía solar con una generación 3.3 veces mayor respecto al 2012 (Secretaría de Energía, 2018). De esta manera, se estima una inversión de un 67% en generación limpia en el periodo del 2018-2032, siendo 13% en proyectos solares alrededor de la República Mexicana (PRODESEN, 2018). En la Figura 2 se muestra la energía eléctrica por fuente al 30 de septiembre del 2020.

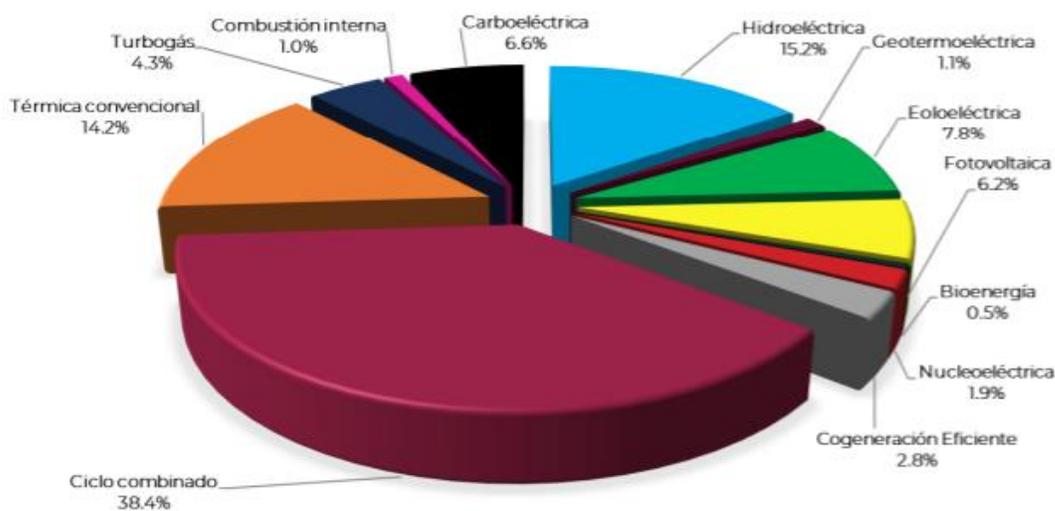


Figura 2. Capacidad instalada por tipo de tecnología al 31 de diciembre de 2020

Fuente: Centro Nacional de Control de Energía (CENACE). Programa de Ampliación y Modernización de la Red Nacional de Transmisión y Redes Generales de Distribución del Mercado Eléctrico Mayorista (2020).

Sonora, representa un estado con una gran influencia para proyectos solares, ya que es una región donde más radiación solar recibe a nivel mundial, recibiendo un 45% más de irradiación solar que el promedio nacional (COEES, 2017), donde la radiación solar promedio a nivel nacional es de 5.8 kWh/día según los datos de la Asociación Nacional de Energía Solar (ANES, 2010). Actualmente en Sonora cuenta con 9 megaproyectos alrededor del estado con una capacidad de 426.56 MW y con 10 proyectos más en puerta con un total de potencia de 1 240 MW instalados (COEES, 2021).

4.2. Radiación Solar y sus principales características

La radiación solar es un aspecto fundamental en materia de la energía fotovoltaica, por ello es importante hablar de la principal fuente de energía que tenemos en nuestro planeta, el sol. El sol es el objeto central del sistema solar, formado hace 6.5 millones de años y compuesto principalmente por hidrógeno y helio (Blanco-Cano y Kajdic, 2009), donde en su núcleo se encuentra a una temperatura de hasta 15 millones de grados (Bachiller, 2009) y de esta forma el sol produce energía mediante la conversión nuclear de hidrógeno en helio en las zonas más densas y calientes de su interior (Tafalla, 2002).

De esta manera, la radiación solar es la energía emitida por el sol, que se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas generadas por las reacciones del hidrógeno por fusión nuclear y emitida por la superficie solar (IDEAM, 2021). Es importante mencionar que las ondas electromagnéticas tienen dos conceptos importantes, los cuales son la longitud de onda y la frecuencia, que son sustanciales para determinar su energía, mientras más corta la longitud de onda, más energía posee y viceversa (AEMET, 2020). En la figura 3 se observa las diferentes longitudes de onda que se encuentran en el espectro electromagnético, que van desde los nanómetros hasta kilómetros de distancia.

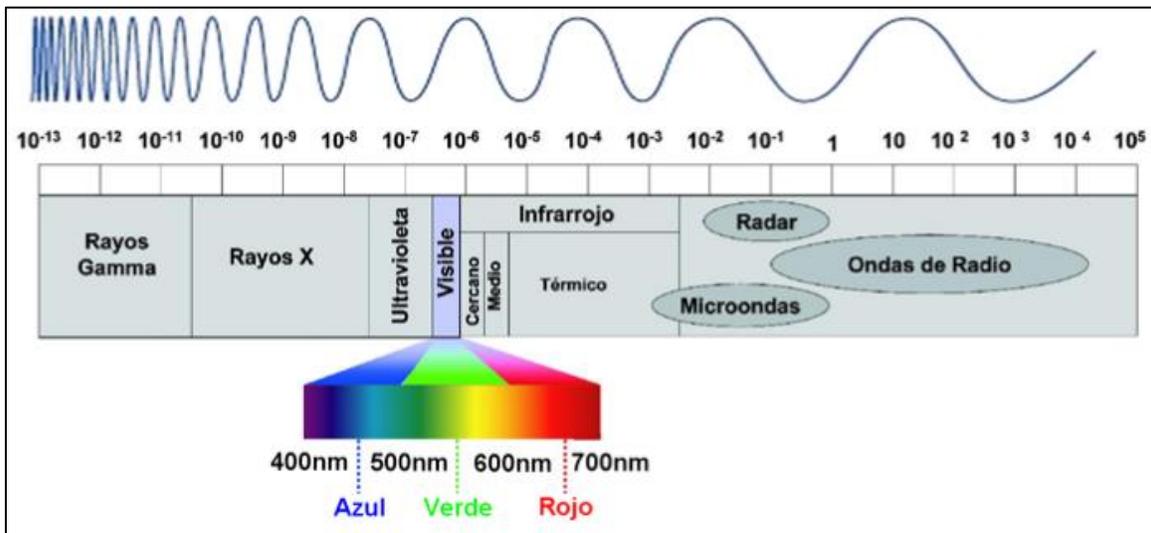


Figura 3. Espectro electromagnético de la radiación solar en metros

Fuente: (IDEAM,2021)

El espectro electromagnético se define como el conjunto de todas las frecuencias que éste contiene, donde se tiene un rango de las radiaciones electromagnéticas por el lado de las

ondas largas, como son las de radio con una longitud de onda 100 km, hasta las longitudes de ondas cortas, como son los rayos gamma con una longitud de onda de 10^{-12} m (Rodríguez y Virgós, 1999). Sin embargo, no toda la radiación llega hasta el plano terrestre, en el viaje del sol a la tierra, algunos fotones pueden chocar y ser reflejados, pasando de la misma forma al entrar a la atmósfera, absorbiendo fotones antes de llegar a la superficie terrestre (Boxwell, 2012).

Ahora bien, respecto a la irradiación solar, esta se define, según Lorente (2010), como la magnitud empleada para indicar el valor de la radiación incidente en una superficie, dicho esto en otras palabras, es la energía solar en un espacio de 1 m^2 en un segundo (Wh/m^2). Como se ha mencionado anteriormente, la cantidad de energía que llega a la tierra no es la misma que cuando recién sale del sol, por lo tanto, la cantidad de irradiancia que llega encima de la atmósfera es de $1,353 \text{ W}/\text{m}^2$, llamada Constante Solar (E_0) (Krauter, 2006). Al pasar la atmósfera, aún se debe de cruzar la masa de aire existente, la cual es la longitud del camino tomado por la luz a través de la atmósfera reduciendo la potencia de la luz absorbido por aire y polvo (Honsberg y Bowden, 2019).

Al atravesar la atmósfera, la radiación puede llegar de 3 maneras distintas, las cuales son radiación directa, la cual se caracteriza por ser la radiación que llega a la superficie de la tierra sin haber sufrido cambio en su trayectoria lineal, radiación difusa, la cual depende de las condiciones de nubosidad y de albedo, la cual es la radiación reflejada (Solartronic, 2003). De esta manera, el valor estándar de irradiancia se toma como $1000 \text{ W}/\text{m}^2$, el cual puede ser mayor o menor cantidad dependiendo del día, latitud y las condiciones atmosféricas de la zona; y a este valor se le conoce como un sol (Aguilera y Sandoval, 2014).

México se encuentra en una región de las más favorecidas en recurso solar (Grupo Energos, 2020) con una irradiación solar diaria entre $4.4 \text{ kWh}/\text{m}^2$ y $6.3 \text{ kWh}/\text{m}^2$, donde el recurso solar es una evaluación diaria de la cantidad de horas cuando la irradiancia alcanza los $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ en un sitio en específico que se utiliza para hacer análisis de energía para sus aplicaciones en el sector solar (Almanza y Muñoz, 2003), siendo que para la ciudad de Hermosillo, Sonora cuenta con un recurso solar de anual de $6.16 \text{ kWh}/\text{m}^2$ (NASA, 2021). En la figura 4 se muestra un mapa del recurso solar de México.

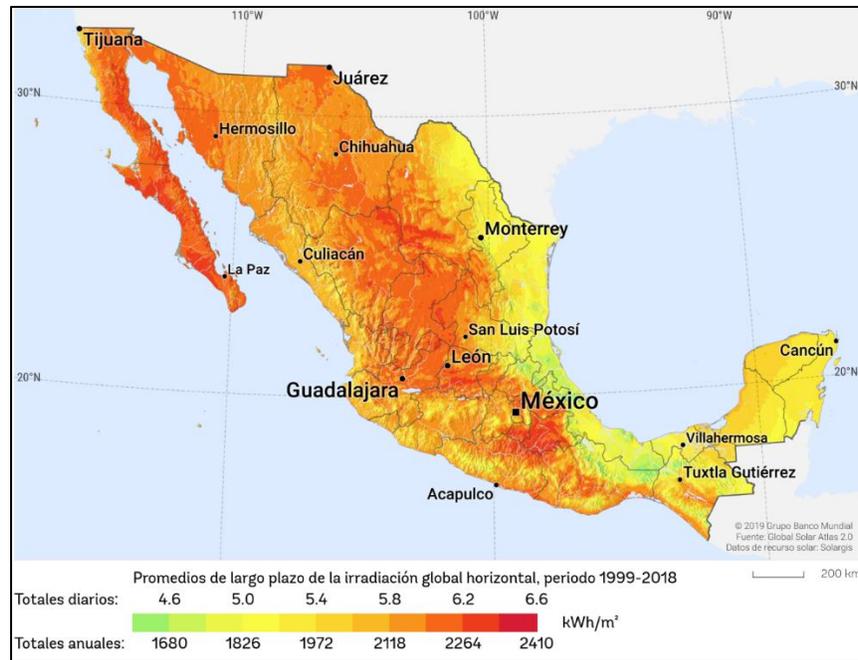


Figura 4. Mapa de recurso solar de México

Fuente: Global Solar Atlas 2.0, realizado con los datos de recurso solar de Solargis

4.3. Efecto fotovoltaico y celda fotovoltaica

La energía fotovoltaica es aprovechada gracias al panel solar, el cual genera electricidad debido al efecto fotovoltaico, éste fue descubierto a principios del siglo XIX, donde los científicos observaron que ciertos materiales pueden producir corriente eléctrica cuando se exponen a los rayos del sol, donde a mayor intensidad de luz es absorbida por la celda, mayor corriente es generada (Boxwell, 2012). De esta forma, el efecto fotovoltaico convierte la energía luminosa que transportan los fotones de luz en energía eléctrica (Lillo Sarret, 2017), donde el fotón es la mínima de energía luminosa o de otra energía electromagnética que se produce, se transmite y se absorbe (Oxford Languages, s/f)

El efecto fotovoltaico se basa en la luz solar que cubre un dispositivo semiconductor de dos capas, el cuál produce una diferencia de potencial entre las capas, conduciendo una corriente a través de un circuito (Aguilera y Sandoval, 2014). El semiconductor se utiliza en las celdas solares, ya que son sensibles a la luz y aumentan su conductividad al iluminarse, además estos tienen la particularidad de tener una banda prohibida o “gap” entre las capas que los electrones tienen que saltar para la generación de electricidad, siendo la existencia de electrones y huecos la característica fundamental de estos materiales (Tagüeña, 2005).

Dentro de las capas de un semiconductor puede existir el tipo n, el cual tiene una gran cantidad de electrones siendo una carga negativa; por el otro lado, está el semiconductor tipo p, el cual tiene muchos hoyos en su estructura teniendo una carga eléctrica positiva, creando una unión p-n formándose un campo eléctrico que produce energía eléctrica (Khaligh y Onar, 2010). Para poder conseguir un movimiento de corriente en la unión p-n, es necesario que se rompa el equilibrio alcanzado y se reduzca el valor del potencial termodinámico polarizando la unión p-n aplicando una diferencia de potencial (Perpiñan, 2009), de esta manera, los elementos libres de la región n más próximos a la región p se fusionan combinándose con los huecos más cercanos de dicha región (Lillo, 2017). En la figura 5 se puede entender de manera más visual el comportamiento de los semiconductores.

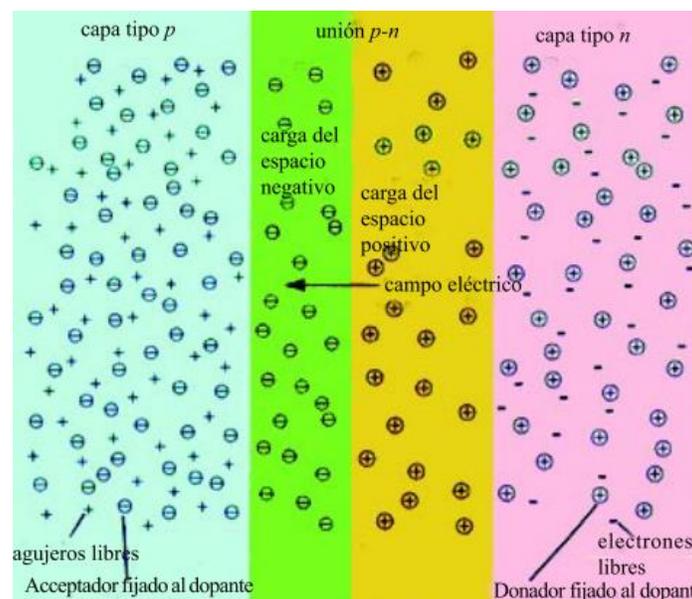


Figura 5. Detalle del interior de las capas del semiconductor de una célula fotovoltaica

Fuente: (Miralles y Massanés, 2000)

Conforme a lo antes mencionado, las células solares son una placa de semiconductor tipo p y otra de tipo n, las cuales convierten la energía luminosa en eléctrica cuando los fotones inciden sobre el material semiconductor con energía suficiente para romper los enlaces de los átomos (Miralles y Massanés, 2000). El silicio es el material más utilizado en la fabricación de celdas solares, el cual tiene un valor 1.1 eV donde el valor ideal es de 1.45 eV, sin embargo, el silicio el material más utilizado por su precio, abundancia y su amplio uso en la microelectrónica (Zapata et al., 2009).

De esta manera, existen diferentes tecnologías en celdas solares, donde se encuentran las celdas más comerciales de silicio monocristalino, con eficiencias de 14-16% y silicio policristalino, las cuales tienen menor eficiencia comparada con el anterior (Aguilera y Sandoval, 2014), además de películas delgadas como el telurio de cadmio (CdTe), seleniuro de cobre, indio y galio (CIGS / CIS) (Friesen, Pavanello y Virtuani, 2010), entre otros. En esta investigación se utilizarán celdas solares de silicio policristalino debido al material que se cuenta actualmente.

4.4. Componentes de un panel fotovoltaico

Un panel fotovoltaico o panel solar, es el conjunto de celdas unidas en serie y paralelo (el cual es el componente primario de un arreglo fotovoltaico), donde se unen para generar características eléctricas adecuadas de voltaje y corriente para alimentar cargas convencionales, protegidas por un marco de aluminio y cristal, estando aisladas eléctricamente del exterior y así protegiéndose de la intemperie (Perpiñan, 2009). De igual manera, un conjunto de paneles fotovoltaicos conectados eléctricamente con una configuración de serie y/o paralelo se crea un arreglo fotovoltaico (AFV), consiguiendo diferentes potencias, corrientes y voltajes dependiendo de la cantidad de paneles deseados (Martínez, 2006), y así producir más energía para el sitio requerido.

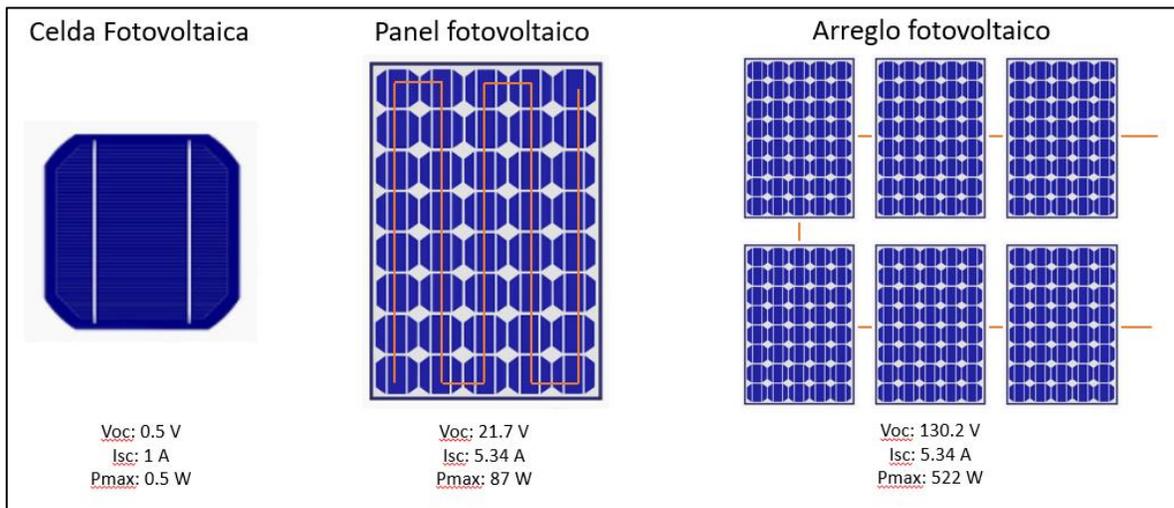


Figura 6. Ejemplo de cómo se compone un arreglo fotovoltaico

Fuente: Elaboración propia

Ahora bien, como se puede observar en la figura 6, un panel fotovoltaico típico de silicio está configurado con uniones de muchas celdas individuales, casi siempre conectadas en

serie, dando voltajes, corrientes y potencias distintas dependiendo de su configuración eléctrica y características estructurales y estéticas (Zapata et al., 2009), donde al conectar el circuito en serie los voltajes se suman y la corriente no se altera, y al conectar en paralelo la corriente se suma y el voltaje queda igual (Martínez, 2006). Por otro lado, la configuración mecánica del panel solar se compone en: marco de metal, comúnmente utilizado el aluminio; cubierta exterior, utilizando vidrio templado; encapsulante EVA (Etileno-Vinil-Acetato), celdas solares, encapsulante EVA, cubierta posterior, utilizando comúnmente Tedlar y caja de conexiones (Guerrero, 2019). En la figura 7 se desglosan los componentes de un panel típico de silicio.

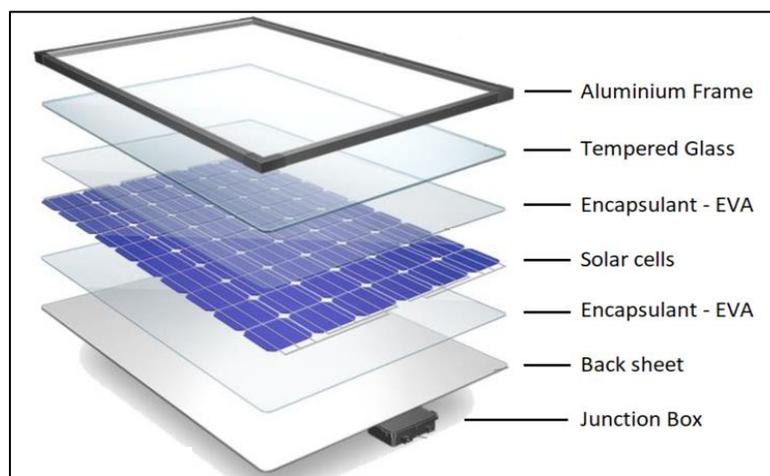


Figura 7. Componentes de un panel solar

Fuente: Elaborado por Trina Solar

Para detallar cada uno de los componentes se empezará hablando del marco de aluminio, el cual se utiliza un aluminio anodizado, utilizado para resistir corrosión, abrasión y desgaste, además de proteger el perímetro del laminado de posibles golpes durante su instalación y facilitar la misma, asimismo protegerlo de la humedad (Alonso, ca. 2019). El componente del vidrio está hecho con bajo contenido de hierro, donde su principal propósito es transmitir la mayor cantidad de luz posible, además de permitir la encapsulación contra factores externos dañinos, como el agua y la suciedad (Zapata et al.,2009; Maani et al., 2020).

Para proteger las celdas solares, se utiliza un material encapsulante, donde las celdas se encuentran entre dos capas de éste, manejando EVA comúnmente, el cual, es un material encapsulante hecho de un polímero transparente para mantener una buena transmisión óptica en el espectro solar de 290 nm a 2500 nm, pero específicamente entre 380 nm a

1200 nm (Pern, 1997), además tiene una buena adhesión a los diferentes materiales del módulo, una buena adaptación a los coeficientes de expansión térmica entre el vidrio y las celdas; y buenas propiedades eléctricas (Agroui et al., 2007).

Continuando con los componentes de un panel solar, se tiene la capa posterior de un polímero termoplástico, donde se emplea frecuentemente el Tedlar (Perpiñan, 2009), en el cual sus características principales enmarca tener baja resistencia térmica, además de prevenir el ingreso de agua y vapor de agua por la parte trasera del panel fotovoltaico (Honsberg y Bowden, 2016), y por último se coloca la caja de conexiones en la parte posterior, donde se incorpora los bornes para la conexión entre paneles (Guerrero, 2019).

4.5. Pérdidas de eficiencia por temperatura en los sistemas fotovoltaicos

En ocasiones se puede confundir que la energía solar trabaja mejor en lugares donde su temperatura es más elevada, sin embargo, esto no es del todo cierto, los sistemas fotovoltaicos (SFV) generan menos potencia a altas temperaturas, ya que al momento de ser caracterizados se toma como referencia la condición de prueba estándar (STC, por sus siglas en inglés) de 1000 W/m^2 , 1.5 masa de aire y a una temperatura de celda de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ y al estar en contacto con el medio ambiente aumentan su temperatura (Friesen, Pavanello y Virtuani, 2010). Como forma de ejemplo, se puede ver de la siguiente manera, en un sistema, ya sea abierto o cerrado, siempre que exista un gradiente de temperatura o interactúen dos sistemas con diferentes temperaturas se va a generar una transferencia de energía, lo cual este proceso se denomina como transferencia de calor, cambiando de esta manera la energía interna de un sistema (Kreith, Bohn y Manglik, 2012).

Los mecanismos que existen en la transferencia de calor son la conducción, convección y radiación (ver Figura 8), donde la conducción se basa en el calor que pasa a través de la sustancia misma del cuerpo, llámese sólido o líquido, existiendo un gradiente de temperatura que se producirá a través del medio, donde la transferencia empieza desde las partículas más energéticas a las menos energéticas (Incropera y DeWitt, 1999). La convección según Kreith, et al. (2012), el mecanismo de transferencia de calor por convección consiste en la transferencia de energía generada por el movimiento molecular y por el movimiento macroscópico de fracciones de fluido, en otras palabras, el sólido puede estar intercambiando calor con el medio que lo rodea, tanto en movimiento laminar como

movimiento turbulento, causado por fuerzas externas (convección forzada) o por gradientes de densidad inducidos por las diferencias de temperatura (Betancourt, 2003).

Por último, la radiación es un mecanismo de transferencia de calor que trasfiere la energía por ondas electromagnéticas y se produce directamente desde la fuente hacia fuera en todas las direcciones, de esta forma, estas ondas no necesitan un medio material para propagarse, pueden atravesar el espacio interplanetario y llegar a la Tierra desde el Sol (AEMET, 2020). De esta manera, un panel solar interactúa con las mismas bases de transferencia de calor, al momento de estar expuesto a los rayos del sol y la temperatura ambiental del lugar, éste empieza a ganar temperatura para llegar a un equilibrio térmico teniendo como resultado la pérdida de eficiencia, convirtiendo un 6-20% a energía eléctrica, esto dependiendo de la calidad de la celda y las condiciones medioambientales que se presenten en ese momento (Popescu, Panaite y Stadoleanu, 2013).

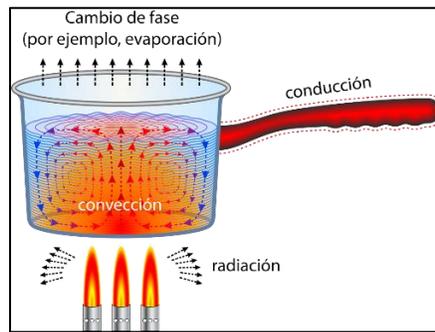


Figura 8. Mecanismos de transferencia de calor ejemplificado en una olla con agua y siendo calentada

Fuente: CUAIEED - UNAM

Por esa razón, los fabricantes de paneles solares manejan el concepto de coeficiente de temperatura de potencia nominal, donde muestra el porcentaje total de pérdidas de potencia por el aumento de 1 °C de temperatura (Boxwell, 2012). Debido al hecho de que las diferentes tecnologías fotovoltaicas tienen diferentes coeficientes de temperatura, la pérdida de energía debido a temperaturas de funcionamiento más altas, en comparación con los parámetros STC, será más pronunciada para algunas tecnologías y menos para otras (Friesen, Pavanello y Virtuani, 2010). A continuación, se muestra la Tabla 1, la cual compara diferentes marcas y modelos de paneles solares de silicio actuales en el mercado sobre el coeficiente de temperatura dadas por las fichas técnicas que generan los fabricantes.

Tabla 1. Tabla comparativa de Coeficientes de Temperatura de Potencia Nominal entre paneles solares de silicio

| Marca | Potencia (W) | Coeficiente de temperatura de potencia nominal (%/°C) |
|-----------------------|---------------------|--|
| JA Solar | 405 | -0.350 |
| Canadian Solar | 405 | -0.370 |
| JINKO Solar | 405 | -0.350 |

Fuente: Elaboración propia con los datos de ficha técnica de la marca del panel

Para hacer una evaluación de la eficiencia del panel fotovoltaico se puede realizar haciendo un seguimiento de las características I-V (corriente contra voltaje), teniendo como puntos clave la corriente de corto circuito (Isc, por sus siglas en inglés), voltaje en circuito abierto (Voc, por sus siglas en inglés) y la potencia máxima de salida (Pmax) (Pó, 2011), siendo que la tecnología del 2011, la eficiencia de un panel solar de silicio se reduce 0.4% al aumentar 1 °C de temperatura, donde el Voc es más sensible a la temperatura en comparación con Isc (Ver tabla 2 y 3) (Katkar, Shinde y Patil, 2011). Podemos ver de esta manera que la tecnología ha ido evolucionando y siendo más eficiente, haciendo la comparativa con la tabla 1 que muestra las características de paneles actuales.

Tabla 2. Tabla comparativa de Coeficientes de Temperatura de Voltaje entre paneles solares de silicio

| Marca | Voc (V) | Coeficiente de temperatura de Voltaje (%/°C) |
|-----------------------|----------------|---|
| JA Solar | 405 | -0.289 |
| Canadian Solar | 405 | -0.290 |
| JINKO Solar | 405 | -0.290 |

Fuente: Elaboración propia con los datos de ficha técnica de la marca del panel

Tabla 3. Tabla comparativa de Coeficientes de Temperatura de Corriente entre paneles solares de silicio

| Marca | Isc (A) | Coeficiente de temperatura de corriente (%/°C) |
|-----------------------|----------------|---|
| JA Solar | 405 | +0.051 |
| Canadian Solar | 405 | +0.050 |
| JINKO Solar | 405 | +0.048 |

Fuente: Elaboración propia con los datos de ficha técnica de la marca del panel

En el campo fotovoltaico existen diferentes gráficas típicas, donde se tiene la Curva I-V, la cual es la forma típica que se genera cuando se representa en una gráfica comparativa

entre la corriente y el voltaje de un panel solar, donde se obtiene al exponer una celda a un nivel constante de luz y temperatura, variando la resistencia de la carga y midiendo la corriente producida (Khaligh y Onar, 2010), ya que con estas características son requeridas para determinar la eficiencia del panel fotovoltaico (Durisch et al., 2007). Como se puede observar en la Figura 9 y Figura 10, las variaciones de voltaje, corriente y potencia se dan por el incremento o decremento de temperatura del panel solar, donde el Voc es fuertemente afectado al igual que la Pmax, mientras que la ganancia en la Isc es poca a mayores temperaturas comparada con la pérdida en su voltaje y potencia.

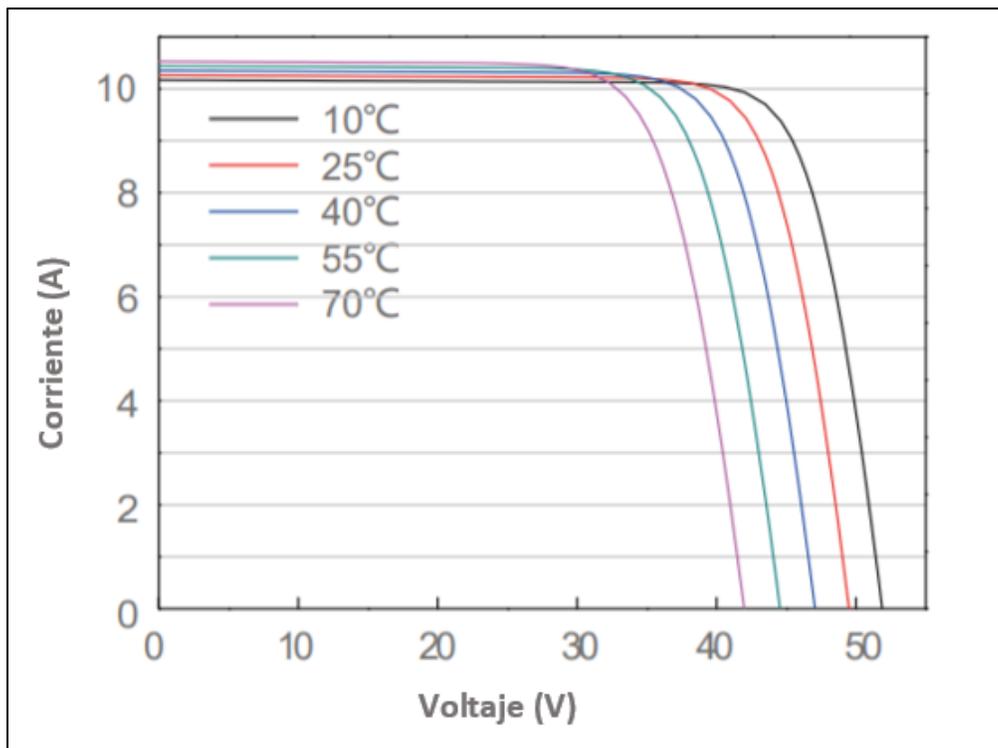


Figura 9. Gráfica típica de una Curva I-V por efecto de temperatura

Fuente: Ficha técnica de panel solar JA Solar 405 W

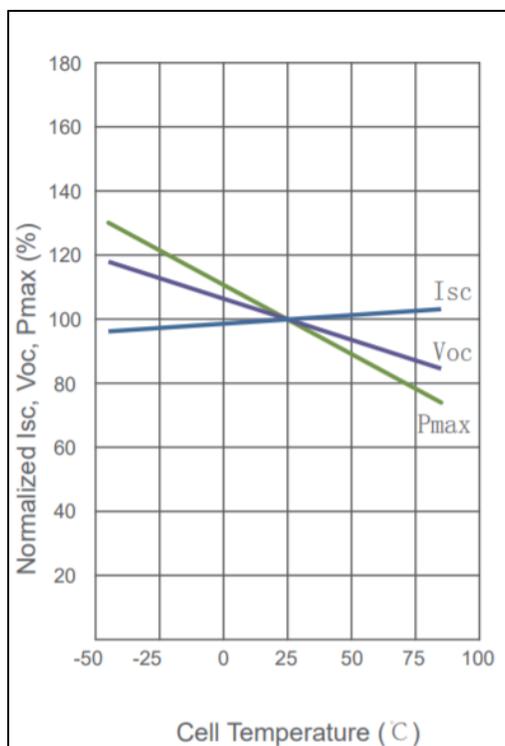


Figura 10. Dependencia de la temperatura para Isc, Voc y Pmax

Fuente: Ficha técnica de panel solar Jinko Solar 405 W

4.6. Métodos/técnicas de enfriamiento de paneles fotovoltaicos

Como ya se ha mencionado anteriormente, la eficiencia de un panel fotovoltaico baja al aumentar la temperatura, ya que una parte de la energía solar es convertida en calor y se pierde por radiación y convección (ver figura 11) (Haidar, Orfi y Kaneesamkandi, 2018), además de otros factores importantes como: la longitud de onda de radiación incidental, reflexión de las capas protectoras superiores del panel, sombreado y resistencia eléctrica (Popescu, Panaite y Stadoleanu, 2013). En el caso particular de los paneles solares convencionales de silicio, no pueden convertir en energía eléctrica todas las longitudes de onda, sino que solamente trabajan con el espectro de la luz visible, donde abarca desde una longitud de onda de 400 nanómetros hasta los 700 nanómetros, desde la luz ultravioleta hasta la luz infrarroja (González, 2017).

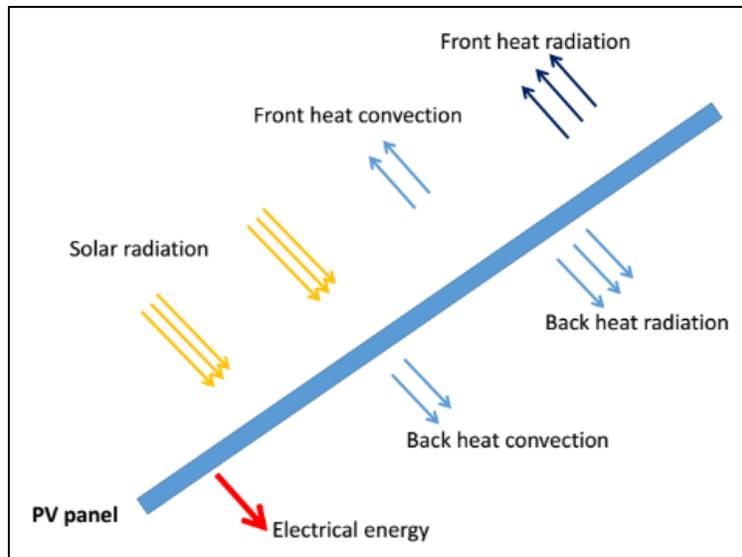


Figura 11. Flujo de energía en un panel solar

Fuente: (Haidar, Orfi y Kaneesamkandi, 2018)

Existen varios métodos o técnicas para reducir la temperatura de los paneles fotovoltaicos, ya que al enfriar los paneles fotovoltaicos utilizando un método de enfriamiento adecuado ayuda a mejorar la potencia por m^2 de área de un SFV y mejora los aspectos económicos (Haidar, Orfi y Kaneesamkandi, 2018), utilizando técnicas de enfriamiento activo o pasivo, donde el primero consume energía y el segundo usa la convección/conducción natural para la extracción de calor (Grubišić-Čabo, Nižetić y Marco, 2016), utilizando agua, aire, si tiene o no partes móviles, hasta híbridos entre FV/térmico (PV/T, por sus siglas en inglés) (Sahay et al., 2015), entre otros.

En el caso de los sistemas híbridos PV/T, estos son dispositivos que simultáneamente convierten la energía solar en energía eléctrica y térmica, donde se dividen en colectores a base de agua PV/T, a base de aire PV/T, panel FV ventilado con recuperador de calor y concentradores PV/T (Popescu, Panaite y Stădoleanu, 2013). Este tipo de técnica absorbe el calor generado de los paneles solares optimizando su eficiencia, siendo muy deseable para la rama, ya que es considerado un eliminador de calor y un generador eléctrico al mismo tiempo (Homadi, Hall y Whitman, 2020)

Para las técnicas de enfriamiento activo, se carga continuamente una batería que se utiliza para almacenar la energía que se utiliza para el uso de la bomba, cargándose hasta que se muestre el signo de condición completa en la que se interrumpe el proceso de carga (Irwan et al., 2015). En las técnicas de enfriamiento pasivo se puede utilizar un refrigeración pasiva

por aire, por agua y por conducción, siendo la refrigeración pasiva más eficiente por la mayor capacidad térmica del agua (Grubišić-Čabo, Nižetić y Marco, 2016).

Ahora bien, ya se han realizado estudios sobre técnicas de enfriamiento del panel solar utilizando agua por encima de éste como refrigerante, utilizando un sistema que rocía agua desde lo más alto y cayendo por gravedad para retirar la temperatura ganada por el medio, aumentando su eficiencia, sin embargo tienen el problema negativo del desperdicio del recurso hídrico (Hadipour, Rajabi y Rashidi, 2020). Otro estudio realizado con enfriamiento por encima del panel, es la inmersión del panel solar en agua, mejorando su eficiencia en días despejados, teniendo un mejor rendimiento promedio a la profundidad de 1 cm (Mehrotra et al., 2014).

Hay que tomar en cuenta que al pasar un flujo de agua por encima del panel solar, esta capa de líquido al ser alcanzada por los rayos solares filtra varios tipos de ondas de luz, particularmente las ondas rojas son las que mayor se absorben, que son las que tienen mayor longitud de onda y menor frecuencia, mientras que las ondas violetas son las últimas en ser absorbidas (Tina et al., 2012), y aun absorbiendo ciertas longitudes de onda que pueden afectar la corriente, el agua absorbe de igual manera una parte de la ganancia de temperatura de las celdas solares por la exposición al sol durante el día (Abdulgafar, Omar y Yousif, 2014).

Otro de los principales efectos que incrementan la eficiencia del panel cuando es puesto en agua es la reducción de la reflexión de la luz, ya que la reducción de las pérdidas por reflexión mejora la transmitancia de las capas encapsulantes del panel solar debido a su baja refracción (Mehrotra et al., 2014); (Mehrotra et al., 2014; Krauter, 2006), por ello las pérdidas por reflexión al utilizar un vidrio comienza a verse influido en el rendimiento óptico de encapsulamiento teniendo pérdidas dentro de un 8-15% (Abdulgafar, Omar y Yousif, 2014), donde se recomienda para mejorar su eficiencia utilizar materiales de cobertura transparentes, con celdas semitransparentes que sólo absorban la parte del espectro a utilizar (Krauter, Hanitsch y Straus, 1991).

De esta manera, el manejo de agua como refrigerante pasando por encima de un panel solar como método de enfriamiento se concluye con tres efectos diferentes: una mejora en el voltaje al reducir la temperatura del panel, una reducción de la radiación reflejada y de forma negativa existe una pérdida en la radiación absorbida, afectando principalmente la región infrarroja (Rosa-Clot et al., 2010), teniendo consigo una mejora de eficiencia del

panel solar, una reducción del periodo simple de inversión y prolongar la vida útil del panel solar (Irwan et al., 2015).

V. METODOLOGÍA

5.1. Tipo de estudio

El estudio para el siguiente trabajo es de tipo cuantitativo, ya que se generarán datos del desempeño de un panel enfriado por agua y otro sin sistema de enfriamiento mediante la experimentación y se analizarán los datos obtenidos para responder las preguntas de esta investigación.

5.2. Diseño metodológico

El proyecto de investigación es de carácter experimental, donde se busca aumentar la eficiencia de un panel solar policristalino de silicio por medio de un sistema de enfriamiento a base de agua, la cual se dejará pasar por enfrente del panel para retirar la ganancia de calor que adquiere al estar expuesto a las condiciones medioambientales del lugar. Para ello se requirió de la siguiente metodología.

- **Diseño:** Para el diseño del sistema de enfriamiento se colocará sobre un panel un vidrio convencional, el que se utiliza comúnmente para las ventanas de casas, de un grosor de 6 mm. Se dejará un espaciado de 1 cm entre el panel solar y el vidrio nuevo, esta separación se definió por los resultados demostrados por Mehrotra et al. en 2014; además, se utilizará doble cinta “super spacer”, que es una cinta especial de doble cara para cristal (ver figura 12), esto se realizará con el fin de lograr el espaciado requerido. De igual forma se utilizará un marco de aluminio para hacer la unión entre los componentes antes mencionados y se sellará con silicón elástico para evitar fugas buscando su hermeticidad. En la figura 13 se muestra los componentes a utilizar en el diseño del sistema de enfriamiento.



Figura 12. Cinta doble "super spacer"

Fuente: Elaboración propia

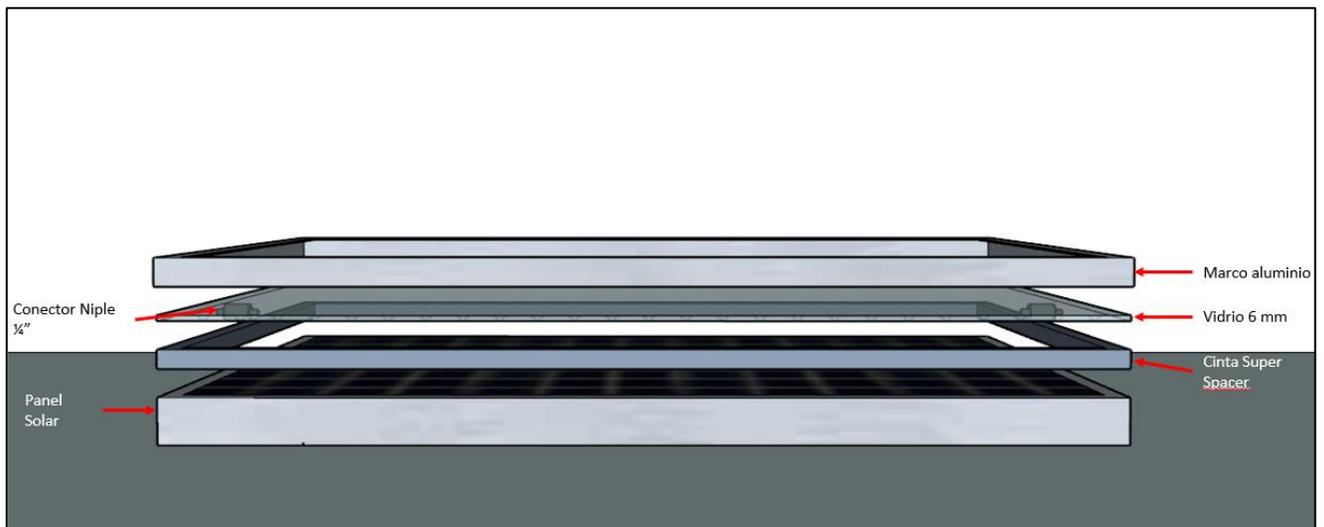


Figura 13. Componentes para el sistema de enfriamiento

Fuente: Elaboración propia

- **Montaje:** Una vez que se haya terminado la adecuación del panel, se montarán dos paneles solares de silicio, uno con el sistema de enfriamiento y el otro sin sistema de enfriamiento, a una estructura de PTR con una inclinación de 18° donde se colocarán ambas caras viendo hacia el sur para aprovechar la mejor radiación solar (ver figura 14), además se realizarán pruebas de fugas de agua para comprobar que el sistema haya quedado hermético en su totalidad.

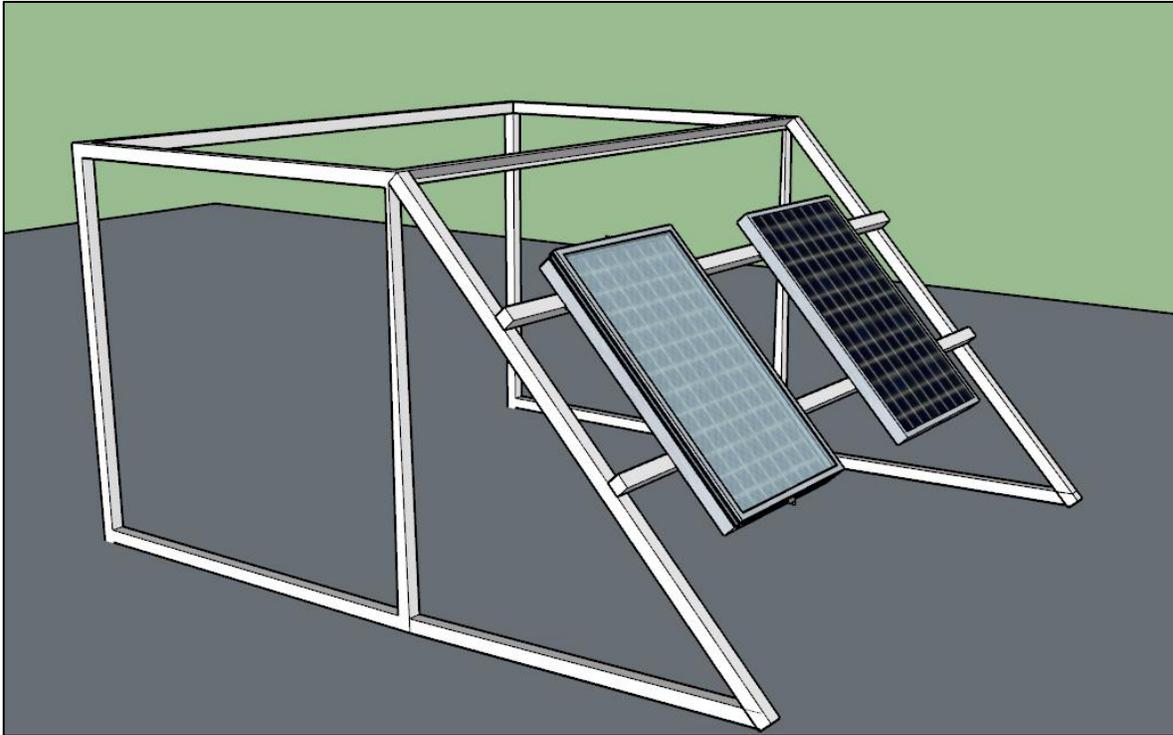


Figura 14. Diseño de montaje de los paneles a evaluar

Fuente: Elaboración propia

- **Experimentación:** Al comprobar el sellado del sistema, se dejará pasar un flujo de agua de aproximadamente de 1 L por minuto por medio de gravedad durante las horas de mayor irradiación del día, se tendrá una dirección de flujo de abajo hacia arriba, esto se pensó para que no haya problemas con estancamiento en las esquinas del panel y el fluido esté en un constante movimiento renovando siempre el agua.
- **Recopilación de datos:** De la fase de experimentación se obtendrán resultados del panel con sistema de enfriamiento y sin sistema, se tomará como parámetros el voltaje, corriente, potencia; se utilizará un sensor de temperatura para medir la temperatura de cada panel a través del día para comparar las pérdidas o ganancias de temperatura y se tomará la temperatura de entrada y la temperatura de salida del agua que circula por el panel.
- **Evaluación:** Se analizarán los datos cuantitativos obtenidos de los parámetros establecidos en la parte experimental y se comparará contra el otro panel de las mismas características eléctricas sin sistema de refrigeración (véase tabla 4). Se utilizarán estos paneles solares porque es el equipo que se cuenta en las

instalaciones, y que tienen las mismas características eléctricas, además de pertenecer a la misma marca de fábrica, de esta manera se corroborará si las preguntas planteadas se cumplen.

Tabla 4. Características eléctricas del panel solar con las condiciones STC

| Parámetro | Valor |
|------------------|--------------|
| P _{máx} | 87 W |
| V _{oc} | 21.7 V |
| I _{sc} | 5.34 A |
| | |

Fuente: Elaboración propia con los datos técnicos del panel solar KYOCERA KC85T

5.3. Alcance

El alcance de la investigación será la evaluación y pruebas experimentales del sistema de enfriamiento a base de agua con un flujo de agua circulando en la parte frontal del panel solar, además se generará conocimiento para un posible uso de cogeneración térmico con la ganancia de calor del fluido para procesos de calderas o usos domésticos, donde se realizarán las pruebas experimentales desde marzo 2021 hasta junio del mismo año, para ver el comportamiento con diferentes irradiaciones y temperatura ambiente a través de los meses.

5.4. Preguntas de investigación

El estudio se enfoca en responder las siguientes preguntas:

P1: ¿Cuál es el porcentaje de eficiencia en la potencia que presenta el panel solar con el sistema de enfriamiento?

P2: ¿Cuál es la cantidad de temperatura que se genera en el proceso de cogeneración?

P3: ¿Existe una viabilidad económica para el uso de este tipo de sistema de enfriamiento?

Objeto de estudio

El objeto de estudio principal de esta investigación tiene como enfoque evaluar el desempeño del panel solar utilizando un sistema de enfriamiento donde se busca incrementar la eficiencia de la potencia, y como subsecuente aprovechar la energía obtenida del agua para fines de cogeneración térmica, validando el funcionamiento del sistema de enfriamiento.

5.5. Lugar que ubica al objeto de estudio

La experimentación de este proyecto se realiza gracias a las instalaciones de la Universidad de Sonora en la Plataforma Solar de Hermosillo, ubicado en la carretera Hermosillo-Bahía de Kino en el km 21.5.

5.6. Instrumentos de recolección y manejo de datos

La instrumentación requerida para la recopilación de datos que se utilizará para la investigación se presenta en el siguiente listado:

- **Multímetro FLUKE:** Se escogió este tipo de multímetro ya que tiene un amplio rango de medición en los parámetros de voltaje y corriente, además de poder medirlo en corriente continua, que es con la energía que se va a estar trabajando
- **Piranómetro CMP11:** Este artículo cuenta un rango espectral de 285 nm a 2800 nm, que abarca con facilidad las longitudes de onda en las que trabaja el panel solar, además de tener un grado alto de captación del recurso solar, llegando como máximo a 4000 W/m²
- **Sensor de temperatura PT100:** Cuenta con protección metálica para mejorar transmisión de calor, con un rango de trabajo que abarca desde los -100 °C hasta 400 °C
- **Laptop DELL Inspiron 15 7000 Gaming:** Cuenta con un procesador Intel Core i5 y una memoria RAM de 16 GB
- **Adquisidor de datos CAMPBELL CR1000:** Este dispositivo cuenta con una temperatura de operación que va desde los -25 °C a +50 °C, y se utilizará para

realizar las medidas de los sensores, integrar datos y almacenar los datos obtenidos en la memoria.

VI. RESULTADOS

La experimentación se realizó con dos paneles solares con las mismas condiciones eléctricas, donde un panel cuenta con un sistema de enfriamiento, utilizando agua como refrigerante; mientras que el otro no cuenta con un sistema de enfriamiento. Con ello se llevaron a cabo pruebas con ambos paneles, tomando los datos de voltaje, corriente, temperatura de panel y temperatura del agua de entrada y de salida. Los resultados se muestran a continuación, donde se evaluó en condiciones de cielos despejados y con un horario que abarca desde las 10:30 am hasta 3:30 pm. Para recopilar la información se utilizó termopares, multímetro y un adquisidor de datos Campbell CR1000.

De primera instancia se realizó una gráfica comparativa entre la temperatura del agua de entrada y de salida, el cual se presentan dos días diferentes de experimentación. En ambas pruebas se situaron los paneles mirando hacia el sur y con una inclinación de 18° , donde los periodos de tiempo que se realizaron fueron de 11:00 am hasta las 14:30 pm, ya que son las mejores horas para la captación de luz solar, sin embargo, los datos se encuentran seccionados en un periodo de tiempo, como se muestra en la figura 15, donde hubo más estabilidad en la lectura para ambos casos. Para el primer día de experimentación la temperatura ambiente promedio que se tuvo en el día fue de 42°C , mientras que para el segundo día llegó a 41°C , ambos con cielos despejados.

En la gráfica 15 se puede observar para ambos días la ganancia de temperatura del fluido que adquiere por transferencia de calor a través del tiempo, llegando a una temperatura máxima de 49.43°C para el día uno y manteniéndose constante en ese rango. Para el segundo día se obtuvo una máxima de 44.26°C y una mínima de 26.59°C , llegando a estabilizarse en una constante cercana a la máxima temperatura alcanzada. Para ambos casos se puede observar una diferencia considerable de casi 20°C de temperatura entre la entrada y la salida del agua. Así la temperatura promedio de entrada y de salida para el día 1 fue de 34.02°C y 47.82°C , respectivamente; mientras que para el día dos fue de 27.80°C y 42.47°C ; teniendo un promedio global de temperatura de entrada y salida de 30.91°C y 45.14°C , respectivamente.

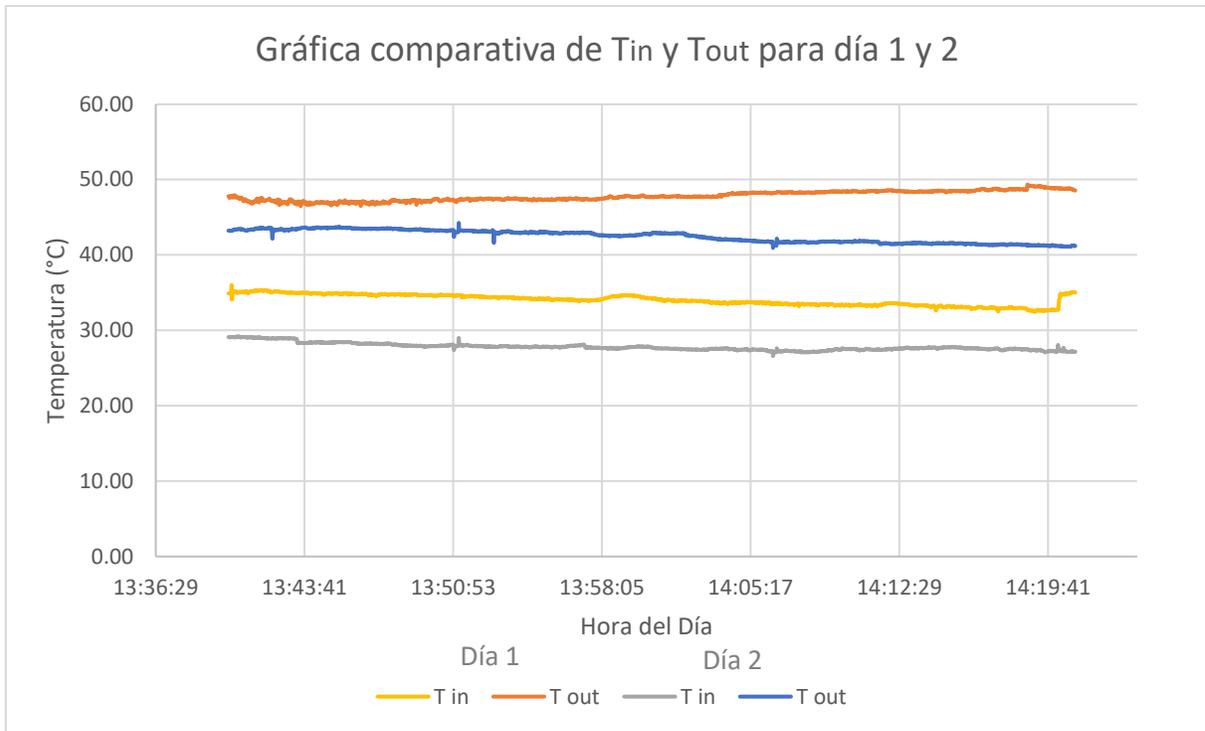


Figura 15. Comparativa de temperatura de entrada y salida del agua para día 1 y 2

Fuente: Elaboración propia

Con las pruebas realizadas se pudo obtener los datos de ganancia de energía térmica que se obtuvo a raíz de las lecturas de temperatura de entrada y de salida por medio de la siguiente fórmula:

$$Q = m * Cp * \Delta T$$

Donde:

Q = ganancia de calor

m = flujo de masa (kg/s)

Cp = calor específico (J/kg/°C)

ΔT = diferencia de temperaturas (°C)

En la figura 17 se muestra la gráfica de calorimetría del segundo día de prueba del sistema, seccionado en el horario de 13:30 a 14:20 horas, ya que fue el horario donde hubo una constancia en las lecturas sin variaciones. Como se puede observar, la ganancia de calor obtenida por el sistema está en el orden de los 500 watts térmicos, teniendo una ganancia

energética como sistema de 5.7 veces superior que solamente la potencia eléctrica que puede producir el panel, ya que éste entrega una potencia máxima de 87 W.

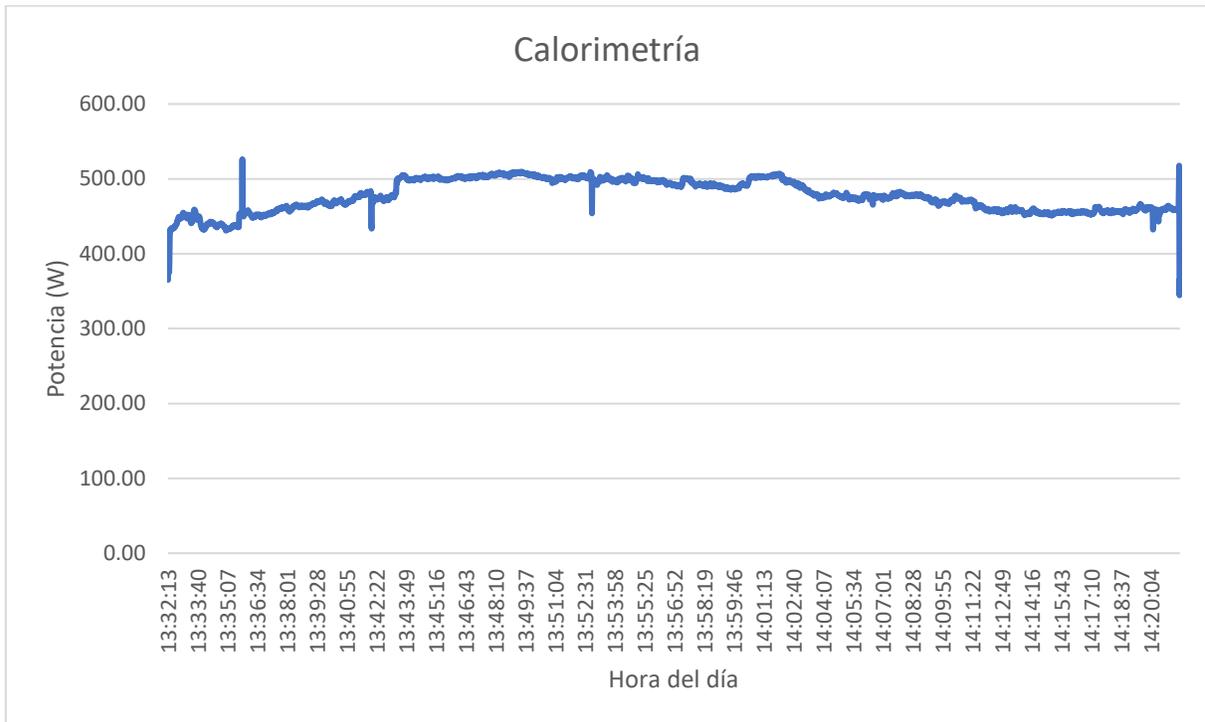


Figura 16. Calorimetría de panel con sistema de enfriamiento

Fuente: Elaboración propia

Las mediciones de temperatura de los paneles solares se tomaron con un solo termopar, turnando la recopilación de los datos en periodos de 15 a 20 minutos entre cada panel solar. En la figura 18 se presenta los valores obtenidos de temperatura de ambos paneles solares en el primer día de prueba, donde el cuadro rojo que se muestra en la gráfica representa las lecturas del panel solar sin sistema de enfriamiento llegando a alcanzar temperaturas mayores a los 70 °C. Por otro lado, se puede notar un decremento de temperatura del panel solar con sistema de enfriamiento comparándolo contra el panel solar sin sistema de enfriamiento, donde su temperatura ronda en los 50 °C, teniendo variaciones en las lecturas por deficiencias en la sujeción del termopar con la superficie posterior de cada panel solar.

En la figura 19 se presentan los valores obtenidos de temperatura de ambos paneles solares en el segundo día de prueba, donde los cuadros rojos representan las lecturas del panel solar sin sistema de enfriamiento, en la cual se tomaron mediciones cada 15 minutos para cada panel solar, con excepción de la primera lectura del panel con sistema de enfriamiento. De esta manera la figura 19 describe un comportamiento estable contrastando

las temperaturas alcanzadas por ambos paneles, el cual se tiene una similitud de temperaturas alcanzadas tanto en el día 1 como en el día 2 de pruebas, llegando a alcanzar una temperatura máxima sin el sistema de enfriamiento de 68 °C contra 45 °C con sistema de enfriamiento. Sin embargo para el recuadro número 3 de la figura 19 se pueden ver variaciones y ruido por un mal contacto entre el panel solar y el termopar.

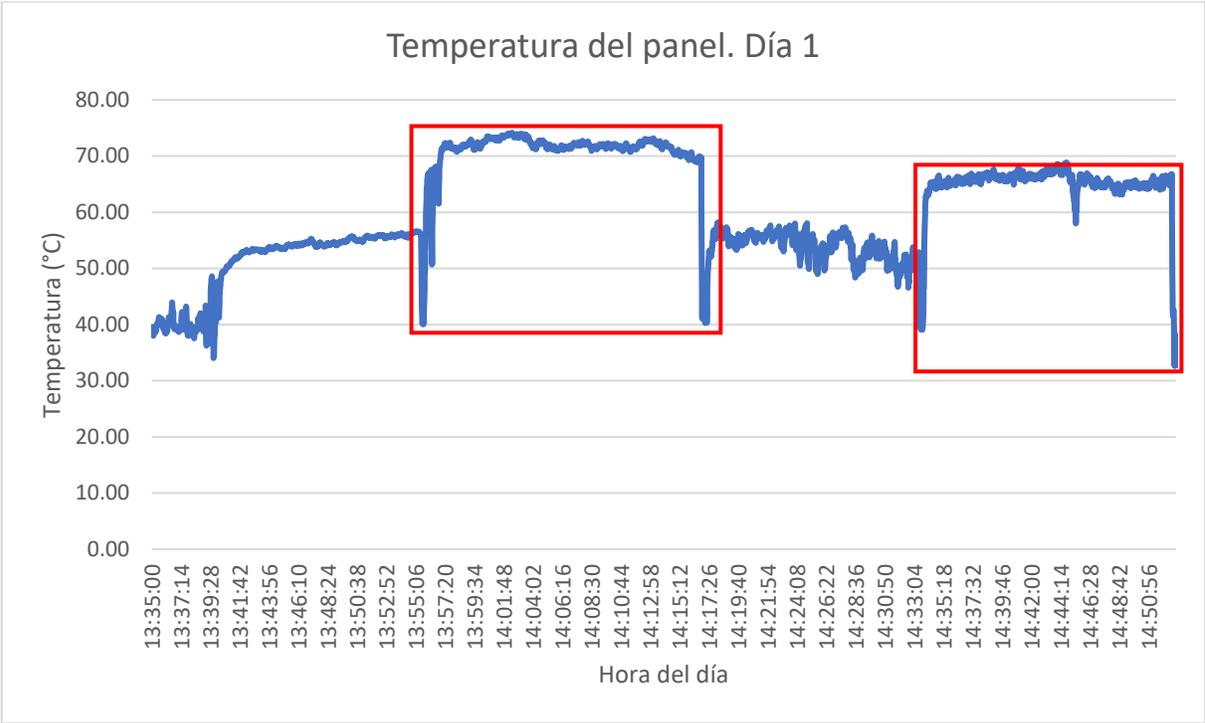


Figura 17. Temperatura del panel. Día 1

Fuente: Elaboración propia

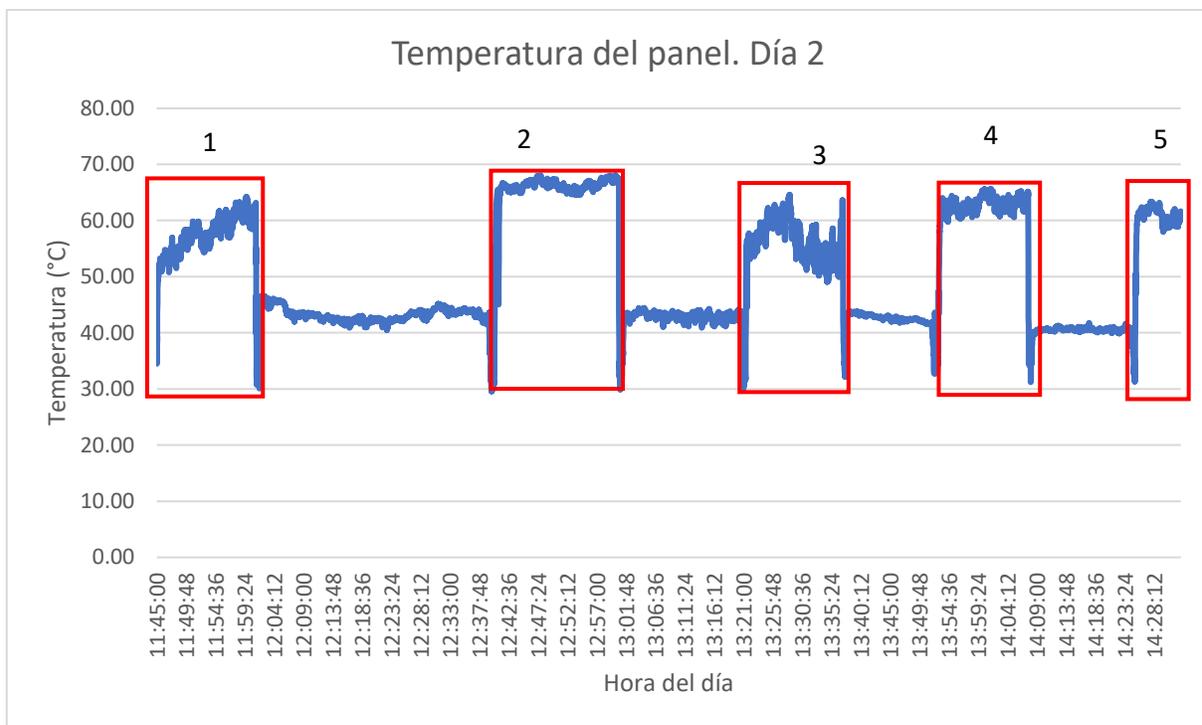


Figura 18. Temperatura del panel. Día 2

Fuente: Elaboración propia

Para poder evaluar el punto de máxima potencia teórica generada por los paneles solares se realizó una curva I-V característica con el software SAM (System Advisor Model, por sus siglas en inglés) dada por las características del panel de fabricación en su ficha técnica, donde se puede apreciar en la figura 20. Los puntos de inflexión que se muestran en la gráfica representan el punto de máxima potencia del panel, además se realiza una comparación a diferentes irradiancias, mostrando las diferentes potencias que se puede generar. En la figura 21 y 22 se muestra la radiación global horizontal existente para los días evaluados, el cual conforman el día 10 y 11 de junio, teniendo cielos despejados para ambos días.

El comportamiento teórico aproximado para la potencia máxima generada se puede observar en la línea negra de la figura 20, la cual se acerca a la radiación que se encontraba en el periodo de tiempo de ambos días de evaluación (véase figura 21 y 22), obteniendo radiaciones por encima de las condiciones de STC. De esta manera, conociendo el voltaje máximo alcanzado con el sistema de enfriamiento de 19.56 V y sin sistema es de 18.45 V; se puede calcular la corriente teórica dada por la gráfica con valores de 4 A y 5 A respectivamente.

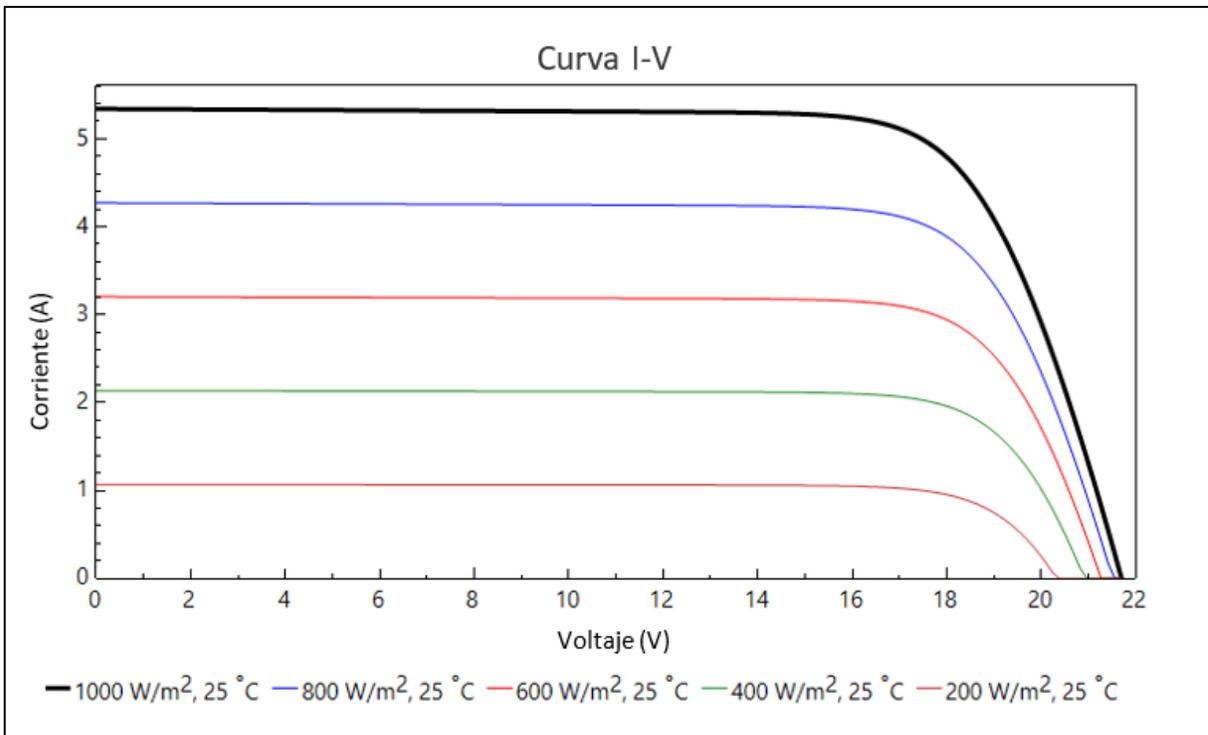


Figura 19. Gráfica característica de la curva I-V del panel Kyocera de 87 W

Fuente: Elaboración propia con software SAM

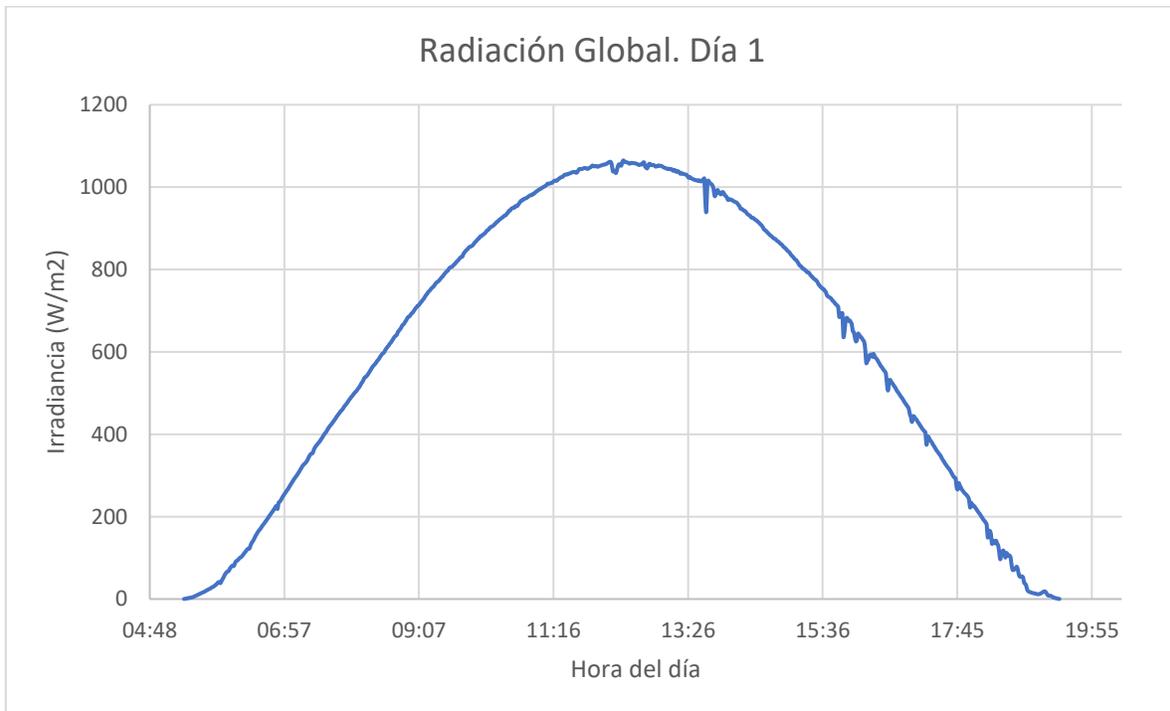


Figura 20. Radiación Global registrada en día 1

Fuente: Elaboración propia con datos de la Plataforma Solar de Hemsillo

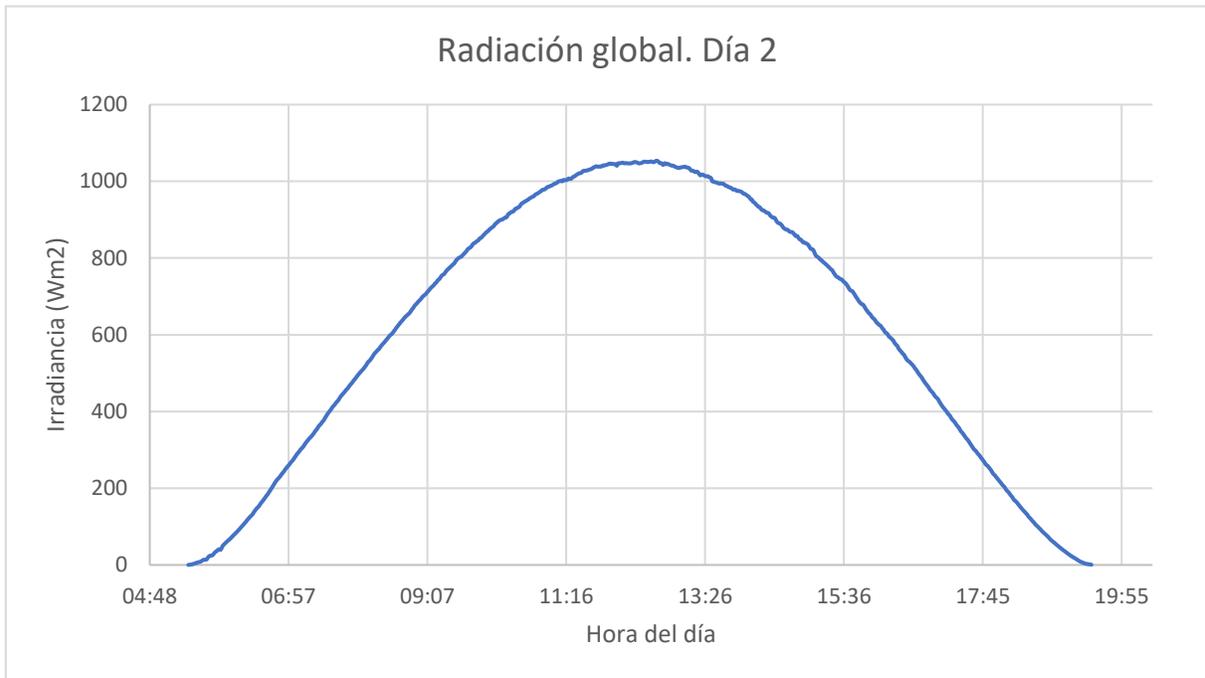


Figura 21. Radiación Global registrada en día 2

Fuente: Elaboración propia con datos de la Plataforma Solar de Hemisillo

Para calcular la potencia máxima real de trabajo de ambos paneles, se calculó primeramente la cantidad de radiación solar incidente real del panel solar, donde se aplicaron una serie de ecuaciones, ya que la irradiancia de las figuras 21 y 22 son dadas en un plano horizontal, cuando la posición de los paneles solares en la cual se realizó la evaluación fue con una inclinación de 18° , por esa razón, la energía incidente de los rayos solares cambia, ya que las superficies no se encuentran totalmente perpendicular a la dirección de los rayos del sol, donde la radiación global en el plano horizontal promedio en el lapso de tiempo en que se hizo la evaluación fue de 981.13 W/m^2 y la radiación incidente en un ángulo de 18° fue de 947.28 W/m^2 . El procedimiento para calcular la irradiancia que incide en el panel solar se realizó aplicando las siguientes ecuaciones:

$$S_{Modulo} = S_{incidente} \sin(\alpha + \beta)$$

$$\alpha = 90 - \phi + \delta$$

$$\delta = 23.45^\circ \sin \left[\frac{360}{365} (284 + d) \right]$$

Donde:

S_{modulo} : Radiación solar incidente sobre una superficie inclinada

$S_{\text{incidente}}$: Radiación solar perpendicular al sol

α : ángulo de elevación

β : ángulo de inclinación del módulo

δ : ángulo de declinación

\varnothing : latitud

d: día juliano

Para evaluar el desempeño real del comportamiento de los paneles solares en condiciones reales, con los valores obtenidos se realizó una relación entre el V_{oc} y el V_{max} , además de la I_{sc} e I_{max} con las características STC del panel solar, y con ello se pudo obtener los valores de V_{max} y I_{max} del panel con sistema de enfriamiento y sin el sistema. Esta relación se efectuó ya que no se contaba con una carga variable y los datos que se pudieron obtener fueron voltajes en circuito abierto y corriente en corto circuito, tomando la lectura más alta dada por las mediciones como V_{oc} y I_{sc} . En la tabla 5 se muestra la relación dada para cada parámetro, con la cual, se pudo obtener la potencia eléctrica de ambos paneles en condiciones normales de trabajo mostradas en la tabla 6.

Tabla 5. Relación de características STC entre V_{oc} - V_{max} y I_{sc} - I_{max} del panel solar

| Características STC Panel Solar Kyocera 87W | | | | | | |
|---|------|------------|-----------|------|------------|--|
| | | Relación V | | | Relación I | |
| Voc | 21.7 | 0.80 | I_{sc} | 5.34 | 0.94 | |
| Vmax | 17.4 | | I_{max} | 5.02 | | |

Fuente: Elaboración propia con los datos técnicos del panel solar KYOCERA KC85T

Tabla 6. Potencia eléctrica generada con panel solar, con sistema y sin sistema de enfriamiento

| Experimentación | | | | | |
|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|---------------------|
| | Voc (V) | Vmax (V) | Isc (A) | Imax (A) | Potencia (W) |
| Pcon | 19.56 | 15.68 | 3.87 | 3.64 | 57.06 |
| Psin | 18.45 | 14.79 | 5.43 | 5.10 | 75.52 |

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 6 se presentan las potencias eléctricas para el panel solar con sistema de enfriamiento y sin sistema, donde se muestra que la potencia eléctrica generada con el panel con sistema de enfriamiento es menor que el mismo panel sin ningún sistema de

enfriamiento, aún con altas temperaturas de celda. Sin embargo, se realizó una evaluación como sistema donde se obtiene un incremento de energía, tanto térmica como eléctrica, de 5.7 más que el panel sin sistema de enfriamiento. Como se puede observar en la figura 23, la potencia máxima alcanzada con el sistema está en el orden de 534 W tanto térmicos como eléctricos, en comparación de la potencia eléctrica que generó el panel solar sin sistema de enfriamiento que fue del orden de 75 W.

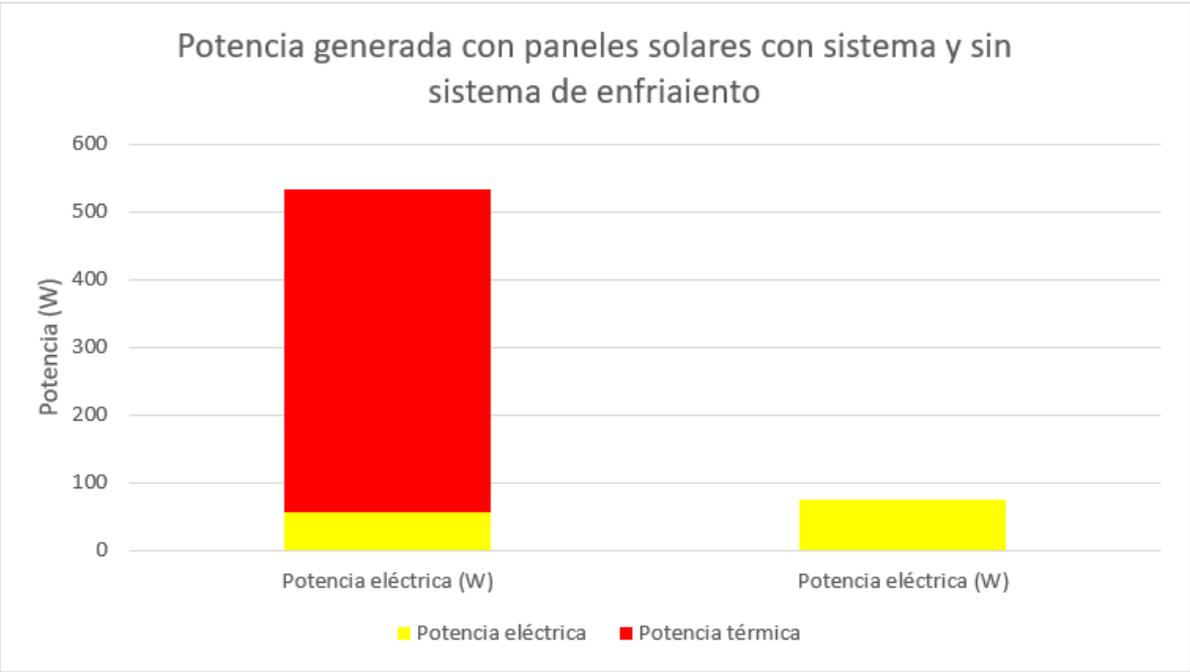


Figura 22. Gráfica comparativa de potencia como sistema

Fuente: Elaboración propia

VII. DISCUSIÓN

El uso de energías renovables impulsa el crecimiento económico, crea nuevas oportunidades de empleo, mejora el bienestar humano y contribuye a un futuro seguro para el clima (Alegría, 2021), por ello se decidió buscar una solución para incrementar la eficiencia de un panel fotovoltaico, ya que según reportes de la IRENA (2019a) (Agencia Internacional de Energías Renovables, por sus siglas en inglés), declara que el crecimiento de la energía solar FV juega un papel importante en la transformación del sistema energético global, aun cuando ésta tiene eficiencias que rondan entre los 15-20% de eficiencia de conversión eléctrica (Green et al., 2017).

Por ello se pensó en un sistema de enfriamiento para panel solar que pueda aprovechar la energía tanto eléctrica como térmica, la cual, esta última la produce involuntariamente al estar en contacto con el ambiente y el sol, desperdiándose en calor disipado al ambiente (Angulo C., 2018), de esta manera se busca incrementar la eficiencia energética al usar un sistema de enfriamiento a base de agua como refrigerante para generar un mayor rendimiento, en donde se utilice el flujo de calor para procesos de precalentamiento de agua, buscando posicionar el calor solar como fuente de energía complementaria tanto en industria en sus procesos como en los hogares como uso doméstico.

Como se puede observar en la figura 23 en la sección de resultados, el desempeño del panel solar con sistema de enfriamiento a base de agua logró tener una eficiencia muy por encima que el panel solar sin sistema de enfriamiento, en la magnitud de 5.7 veces más que su contra parte, sin embargo, en la parte de generación energía eléctrica se obtuvo menos potencia de la esperada, aun cuando la temperatura del panel fue más baja y sus voltajes aumentaron, donde la teoría nos dice que la temperatura ejerce una mayor variación en su voltaje, tanto positiva como negativa, que la variabilidad de su corriente (Guerrero, 2013).

Sin embargo, conforme a la experimentación realizada, la causa de generar una menor potencia eléctrica en el panel solar con sistema de enfriamiento, fue que el vidrio empleado es un vidrio convencional, utilizado comúnmente en los hogares y/o muebles, con una anchura de 6 mm y con un alto contenido de hierro, donde el vidrio que se utiliza para fabricar los paneles solares es un vidrio especial con bajo contenido en hierro para mejorar su transmisividad (Alonso Lorenzo, s/f), de esta manera disminuyó la radiación de

incidencia de panel solar, afectando de gran manera su corriente y por lo tanto generando menor potencia.

Por su parte, el flujo de agua que se utiliza como refrigerante retiene una porción del espectro de radiación que perjudica el vidrio, ya que absorbe las longitudes de ondas infrarrojas que rondan entre los 700 nm siendo las causantes de elevar la temperatura, además reduce la reflexión de la luz mejorando la transmitancia de las capas que captan la radiación solar debido a su baja refracción (Mehrotra et al., 2014). De este modo, se realizó una prueba de I_{sc} confirmando que el componente que mayor afecta el sistema de enfriamiento propuesto fue el vidrio, donde se tiene una pérdida de eficiencia de 22.51% de su corriente máxima de corto circuito en comparación con el agua, la cual afecta un 8.54% en su corriente máxima de corto circuito.

VIII. CONCLUSIONES

En el presente proyecto se diseñó y adecuó un prototipo de sistema de enfriamiento con agua como refrigerante para un panel solar, con capacidad de reducir la temperatura de panel y mejorar la capacidad de producir energía eléctrica y energía térmica que adquiere el flujo de agua en su constante flujo. De esta manera, este proyecto representa una contribución con los objetivos del desarrollo sustentable de la ONU, en especial los objetivos 7, 9, 13 y 14, los cuales toman en cuenta energía asequible y no contaminante, innovación en industria, ciudades y comunidades sostenibles y acción por el clima.

La evaluación realizada no nos dio los resultados esperadas tanto en la potencia eléctrica como en la corriente de corto circuito por el panel solar con sistema de enfriamiento, sin embargo, nos generó un mayor voltaje y como sistema se pudo obtener una producción de potencia total más alta de la esperada, considerando tanto la potencia térmica como eléctrica, donde se dio un incremento de potencia de 5.7 veces más que la potencia eléctrica generada únicamente con el panel solar sin sistema enfriamiento. Esto es importante, ya que nos dice que este tipo de experimentación en sistemas de enfriamiento para cogeneración puede ser viable en su uso para la industria en sus procesos como precalentado de agua, además de poder utilizarse de igual manera dentro de los hogares para el uso de agua caliente alcanzando temperaturas en el orden de los 50 °C.

Es importante destacar que el vidrio utilizado para el sistema de enfriamiento no es un vidrio especial ni de la mejor calidad, ya que por falta de presupuesto se tuvo que optar por un vidrio convencional de hogar en vez de uno con mejor calidad. Sin embargo, esta investigación sirve como punta de iceberg para la búsqueda de mejoras en los materiales y poder llevar su nivel de madurez tecnológica de una función crítica analítica y experimental en prueba de concepto a la validación del sistema en un entorno relevante y de esta manera seguir generando información en mejoras para la energía fotovoltaica y en su aprovechamiento térmico.

IX. RECOMENDACIONES

De primera instancia se recomienda utilizar un mejor recubrimiento, el cual en sus características contenga un bajo contenido en hierro para mejorar la transmitancia del vidrio dejando pasar mayor cantidad de luz y radiación; y de esta manera mejorar la corriente que se genera. Por otro lado, utilizar un banco de carga variable para suministrar cargas eléctricas para tener un mejor control en las mediciones y llevar un registro de los datos evaluados con mayor precisión. Además, se recomienda que cada prueba a evaluar tenga su manera autónoma de adquisición de datos, para evitar ruidos y malas conexiones al momento de la lectura y tener menos variaciones en su representación gráfica.

El flujo másico de agua que se inyecta al sistema de enfriamiento es de suma importancia, ya que éste es el responsable de bajar la temperatura del panel solar y de absorber toda la energía térmica posible por los rayos solares incidentes como de la temperatura ambiental, donde se podría variar el flujo de agua inyectado para buscar cuántos litros por segundo son los más provechosos para la ganancia térmica del fluido, buscando temperaturas mayores a los 50 °C.

La parte de un sellado hermético juega un papel importante para evitar la aparición de fugas del líquido refrigerante, donde en la sección de metodología se describe que se utilizó una cinta doble especial para espejos resistente al agua y con una buena calidad de adhesión, sin embargo se tomó un tiempo considerable para lograr la hermeticidad completa del sistema de enfriamiento y que no existieran fugas, donde se sugiere buscar un método de sellado más eficiente para evitar posible fugas a través del tiempo en una etapa más madura de este tipo de sistema una vez puesto en marcha.

Por último, la investigación y experimentación de este diseño de sistema de enfriamiento se evaluó con un panel solar, donde se recomienda realizar pruebas con un mayor número de paneles solares conectados en serie o paralelo con este tipo de sistema de enfriamiento, para evaluar el comportamiento que se presenta en un sistema más complejo, evaluar los diferentes retos que esto presenta con el fin de buscar un incremento de la eficiencia como sistema, tanto eléctrico como térmico.

X. REFERENCIAS

- Abdulgafar, S.A., Omar, O.S. y Yousif, K.M., 2014. Improving The Efficiency Of Polycrystalline Solar Panel Via Water Immersion Method. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (An ISO Certified Organization)*, [en línea] 3(1), pp.8127–8132. Disponible en: <www.ijirset.com>.
- AEMET, 2020. *La Radiación Solar*. [en línea] Disponible en: <http://www.aemet.es/documentos/es/eltiempo/observacion/radiacion/Radiacion_Solar.pdf> [Consultado 10 dic. 2020].
- Agroui, K., Belghachi, A., Collins, G. y Farenc, J., 2007. Quality control of EVA encapsulant in photovoltaic module process and outdoor exposure. *Desalination*, 209(1-3 SPEC. ISS.), pp.1–9.
- Aguilera González, V.E. y Sandoval Espinosa, D.A., 2014. *Dimensionamiento De Un Sistema Fotovoltaico Para La Alimentación De Oficinas De Una Nave Industrial*. Instituto Politécnico Nacional.
- Alegría, A., 2021. *Energías renovables permitirían mayor crecimiento económico : CIDE*. [en línea] La Jornada. Disponible en: <<https://www.jornada.com.mx/notas/2021/06/30/economia/energias-renovables-permitirian-mayor-crecimiento-economico-cide/>> [Consultado 13 jul. 2021].
- Almanza, R. y Muñoz Gutiérrez, F., 2003. *Ingeniería de la Energía Solar II*. [en línea] Cromocolor. Disponible en: <<http://www.iingen.unam.mx>>.
- Alonso Lorenzo, J.A., s/f. *¿Cómo se construye un módulo fotovoltaico ? – Laminación , curado y enmarcado*. Disponible en: <<https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/modulo-fotovoltaico-laminacion-curado-y-enmarcado/>> [Consultado 6 abr. 2021].
- ANES, 2010. *Balance Nacional de Energía 2010*. [en línea] Disponible en: <<https://anes.org.mx/index.php/balance-de-energia/>> [Consultado 30 mar. 2021].
- Angulo C., M., 2018. *Desarrollo de un sistema fotovoltaico de concentración para aplicaciones de co-generación*. Centro de investigaciones en óptica, AC.
- Bachiller, R., 2009. El sol: Nuestra estrella, nuestra energía. *Anuario del Observatorio Astronómico*, pp.371–382.
- Bañuelos Sánchez, P., 2018. *Crecimiento poblacional : detonante de una enorme necesidad energética*. [en línea] UDLAP. Disponible en: <<https://contexto.udlap.mx/crecimiento-poblacional-detonante-de-una-enorme-necesidad-energetica/>> [Consultado 14 abr. 2021].
- Baptista, P.C., Silva, C.M., Farias, T.L. y Heywood, J.B., 2012. Energy and environmental impacts of alternative pathways for the Portuguese road transportation sector. *Energy Policy*, 51, pp.802–815.
- Barbir, F., Veziroğlu, T.N. y Plass, H.J., 1990. Environmental damage due to fossil fuels use. *International Journal of Hydrogen Energy*, 15(10), pp.739–749.
- Bermúdez, A.S., Incháustegui Moreno, A.V., Díaz Guerrero, T. de J. y Iveth Osuna, E., 2019. *Efecto ambiental y socioeconómico de la producción de energía eléctrica*. [en línea] Ciencia y

- Desarrollo. CONACYT. Disponible en: <<https://www.cyd.conacyt.gob.mx/?p=articulo&id=482>> [Consultado 8 abr. 2021].
- Betancourt, R., 2003. *Transferencia molecular de calor masa y/o cantidad de movimiento*. Primera ed. *Transferencia molecular de calor, masa y/o cantidad de movimiento*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Blanco-Cano, X. y Kajdic, P., 2009. El sol, nuestra estrella. *Revista Digital Universitaria*, [en línea] 10, oct., p.17. Disponible en: <<http://www.revista.unam.mx/vol.10/num10/art67/art67.pdf>>.
- Boxwell, M., 2012. *Solar Electricity Handbook: A simple, practical guide to solar energy*. Sixth Edit ed. [en línea] United Kingdom: Greenstream Publishing. Disponible en: <<http://library1.nida.ac.th/termpaper6/sd/2554/19755.pdf>>.
- Bridges, A., Felder, F.A., McKelvey, K. y Niyogi, I., 2015. Uncertainty in energy planning: Estimating the health impacts of air pollution from fossil fuel electricity generation. *Energy Research and Social Science*, [en línea] 6, pp.74–77. Disponible en: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.erss.2014.12.002>>.
- CENACE, 2020. *Programa de Ampliación y Modernización de la Red Nacional de Transmisión y Redes Generales de Distribución del Mercado Electro Mayorista*.
- COEES, 2017. *Mapa de Ruta de Energía de Sonora*. [en línea] Disponible en: <<http://www.promexico.mx/documentos/mapas-de-ruta/energia-sonora.pdf>>.
- COEES, 2021. *Proyectos de energías renovables en la Megarregión Sonora-Arizona*. [en línea] Disponible en: <<https://coees.sonora.gob.mx/2015-10-12-23-04-02/contenido-energias/proyectos-de-energias-renovables-en-sonora.html>> [Consultado 30 mar. 2021].
- Durisch, W., Bitnar, B., Mayor, J.C., Kiess, H., Lam, K. hang y Close, J., 2007. Efficiency model for photovoltaic modules and demonstration of its application to energy yield estimation. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91(1), pp.79–84.
- Friesen, G., Pavanello, D. y Virtuani, a., 2010. Overview of Temperature Coefficients of Different Thin Film Photovoltaic Technologies. *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 6-10 September 2010, Valencia, Spain*, [en línea] (JANUARY), pp.4248–4252. Disponible en: <<http://www.eupvsec-proceedings.com/proceedings?paper=9122>>.
- Gas Natural Fundación, 2011. *El impacto ambiental de las distintas fuentes energéticas de generación eléctrica*. [en línea] Energía y Medio Ambiente. Disponible en: <http://www.aytojaen.es/portal/RecursosWeb/DOCUMENTOS/1/0_1150_1.pdf> [Consultado 8 abr. 2021].
- Gobierno de México, 2015. Resumen ejecutivo de la Reforma Energética. *Diario Oficial de la Federación*, p.23.
- González, E., 2017. *El espectro electromagnético y la captación del módulo fotovoltaico*. - CCEEA. [en línea] CCEEA. Disponible en: <<https://ccea.mx/blog/ciencia/el-espectro-electromagnetico-y-la-captacion-del-modulo-fotovoltaico>> [Consultado 18 feb. 2021].
- Green, M.A., Hishikawa, Y., Warta, W., Dunlop, E.D., Levi, D.H., Hohl-Ebinger, J. y Ho-Baillie, A.W.H., 2017. Solar cell efficiency tables (version 50). *Progress in Photovoltaics: Research and*

- Applications*, 25(7), pp.668–676.
- Grubišić-Čabo, F., Nižetić, S. y Marco, T.G., 2016. Photovoltaic panels: A review of the cooling techniques. *Transactions of Famena*, 40(June), pp.63–74.
- Grupo Energos, 2020. *Aprovechamiento de la energía solar en México y el mundo*. [en línea] Disponible en: <<https://www.grupoenergoss.com/post/energia-solar-en-mexico-su-potencial-y-aprovechamiento#:~:text=Según la International Renewable Energy,de medición de radiación solar>> [Consultado 8 abr. 2021].
- Guerrero García, J.J., 2019. *Instalaciones solares fotovoltaicas*. Madrid: Síntesis.
- Guerrero, J.G., 2013. *Enfriamiento de paneles fotovoltaicos mediante aprovechamiento de energía geotérmica de superficie*. [en línea] UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE. Disponible en: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2011.03.003>><<https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.08.001>><<http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2014.12.018>><<http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2011.08.005>><<http://dx.doi.org/10.1080/00206814.2014.902757>><<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.021>>.
- Hadipour, A., Rajabi Zargarabadi, M. y Rashidi, S., 2020. An efficient pulsed- spray water cooling system for photovoltaic panels: Experimental study and cost analysis. *Renewable Energy*, [en línea] 164, pp.867–875. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.021>>.
- Haidar, Z.A., Orfi, J. y Kaneesamkandi, Z., 2018. Experimental investigation of evaporative cooling for enhancing photovoltaic panels efficiency. *Results in Physics*, [en línea] 11, pp.690–697. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.10.016>>.
- Homadi, A., Hall, T. y Whitman, L., 2020. Study a novel hybrid system for cooling solar panels and generate power. *Applied Thermal Engineering*, [en línea] 179(May), p.115503. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115503>>.
- Honsberg, C. y Bowden, S., 2016. *Module Materials*. [en línea] PV Education. Disponible en: <<https://www.pveducation.org/pvcdrom/modules-and-arrays/module-materials>> [Consultado 6 abr. 2021].
- Honsberg, C. y Bowden, S., 2019. *Masa de aire*. [en línea] Disponible en: <www.pveducation.org> [Consultado 14 abr. 2021].
- IDEAM, 2021. *Radiación Solar*. [en línea] Disponible en: <<http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/radiacion-solar-ultravioleta#:~:text=La energía procedente del Sol,de radiación de onda corta>> [Consultado 31 mar. 2021].
- Incropera, F.P. y DeWitt, D.P., 1999. *Fundamentos de transferencia de calor*. Cuarta ed. *Fundamentos de Transferencia de Calor*. Prentice Hall,.
- International Energy Agency, 2020. *Renewables 2020. Analysis and forecast to 2025*. [en línea] Disponible en: <<https://webstore.iea.org/download/direct/4234>> [Consultado 1 dic. 2020].
- International Renewable Energy Agency (IRENA), 2019. *Renewable Capacity 2019*. [en línea] (March), p.3. Disponible en: <www.irena.org/publications>.
- Irwan, Y.M., Leow, W.Z., Irwanto, M., Fareq, M., Gomesh, N. y Safwati, I., 2015. Comparison between DC Brushless Fan and DC Hybrid Solar Panel Cooling System. *Applied Mechanics and Materials*, 793, pp.373–377.

- Katkar, A., Shinde, N. y Patil, P., 2011. Performance & Evaluation of Industrial Solar Cell w . r . t . Temperature and Humidity. *Ijrmnet*, 1(1), pp.69–73.
- Khaligh, A. y Onar, O.C., 2010. *Energy harvesting: Solar, wind, and ocean energy conversion systems*. United States of America: CRC Press.
- Krauter, S., 2006. *Solar Electric Power Generation - Photovoltaic Energy Systems*. Rio de Janeiro: Springer.
- Krauter, S., Hanitsch, R. y Straus, P., 1991. Simulation-Program for Selecting Efficiency Improving Strategies of PV-Module-Encapsulations under Operating Conditions. *Proceedings of renewable energy sources*, 91(July), pp.48–53.
- Kreith, F., Bohn, M.S. y Manglik, R.M., 2012. *Principios de Transferencia de Calor*. Séptima Ed ed. [en línea] *Journal of Chemical Information and Modeling*. Disponible en: <<http://www.elsevier.com/locate/scp>>.
- Lillo Sarret, M., 2017. *Diseño De Una Estación De Recarga Para Vehículos Eléctricos Móvil Y Autosuciente*. [en línea] Universidad Politécnica de Cataluña. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/115326/TFG_MARC_LILLO_2017_DEE.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Lorente, J., 2010. *La radiación solar*. [en línea] Curso de fotoprotección. Disponible en: <https://www.portalfarma.com/Profesionales/campanaspf/categorias/Documents/MAQUETA_CION_MATERIAL_FORMATIVO_fotoproteccionfotproc2010.pdf> [Consultado 10 dic. 2020].
- Maani, T., Celik, I., Heben, M.J., Ellingson, R.J. y Apul, D., 2020. Environmental impacts of recycling crystalline silicon (c-Si) and cadmium telluride (CDTE) solar panels. *Science of the Total Environment*, [en línea] 735, p.138827. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138827>>.
- Martínez Hernández, D., 2006. *Control digital para convertidor multinivel alimentado con energía solar*. [en línea] Universidad de las Amériicas Puebla. Disponible en: <http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/meie/martinez_h_d/capitulo6.pdf>.
- Mehrotra, S., Rawat, P., Debbarma, M. y Sudhakar, K., 2014. Performance of a Solar Panel With Water Immersion Cooling Technique. [en línea] 3(3), pp.1161–1172. Disponible en: <www.ijset.net>.
- Miralles, J. y Massanés, R., 2000. *Versión digital A M B I E N T A L 16 Energía fotovoltaica*. Barcelona: Fundación Terra.
- Naciones Unidas, 2020. *Energy*. [en línea] Department of Economic and Social Affairs. Sustainable Development. Disponible en: <<https://sdgs.un.org/topics/energy>> [Consultado 22 nov. 2020].
- Naciones Unidas, 2020a. *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible: [en línea] Los objetivos de desarrollo sostenible*. Disponible en: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2020/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2020_Spanish.pdf>.
- Naciones Unidas, 2020b. *Población*. [en línea] Objetivos del Desarrollo Sostenible. Década de acción. Disponible en: <[https://www.un.org/es/global-issues/population#:~:text=Se espera que la población,de 11.000 millones para 2100.](https://www.un.org/es/global-issues/population#:~:text=Se%20espera%20que%20la%20poblaci%C3%B3n,de%2011.000%20millones%20para%202100.)> [Consultado 14 abr. 2021].
- NASA, 2021. *NASA Prediction of Worldwide Energy Resources*. [en línea] Disponible en:

- <<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>> [Consultado 8 abr. 2021].
- Oxford Languages, s/f. *Definición de fotón*.
- Pern, F.J., 1997. Ethylene-Vinyl Acetate (EVA) encapsulants for photovoltaic modules: Degradation and discoloration mechanisms and formulation modifications for improved ppiotostability. *Angewandte Makromolekulare Chemie*, 252, pp.195–216.
- Perpiñan Lamigueiro, O., 2009. *Energía Solar Fotovoltaica*. Novena ed. [en línea] España: Crative Commons. Disponible en: <<https://oscarperpinan.github.io/esf/ESF.pdf>>.
- Pó, J.M., 2011. Assessment of Stc Conversion Methods Under Outdoor Test Conditions. En: *26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*. pp.3458–3462.
- Popescu, A., Panaite, C. y Stadoleanu, O., 2013. Combined Photovoltaic and Thermal Solar Panels - Enhanced Energy Conversion and Heat Transfer. *Termotehnica*, 17(S1), pp.135–140.
- PRODESEN, 2018. *Programa de Desarroolo del Sistema Eléctrico Nacional 2018-2032*. [en línea] Disponible en: <<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/331770/PRODESEN-2018-2032-definitiva.pdf>>.
- REN21, 2020. *Renewables 2020 Global Status Report*. [en línea] *REN21 Secretariat*. Disponible en: <<http://www.ren21.net/resources/publications/>>.
- Rodríguez García, J. y Virgós Rovira, J.M., 1999. *Fundamentos de óptica ondulatoria*. Oviedo: Universidad de Oviedo.
- Rosa-Clot, M., Rosa-Clot, P., Tina, G.M. y Scandura, P.F., 2010. Submerged photovoltaic solar panel: SP2. *Renewable Energy*, 35(8), pp.1862–1865.
- Roy, U. y Majumder, M., 2016. *Climate Change and Its Impacts*. [en línea] European Geosschiences Union. Disponible en: <<https://www.egu.eu/policy/science/climate-change-and-its-impacts/>> [Consultado 8 abr. 2021].
- Sahay, A., Sethi, V.K., Tiwari, A.C. y Pandey, M., 2015. A review of solar photovoltaic panel cooling systems with special reference to Ground coupled central panel cooling system (GC-CPCS). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [en línea] 42, pp.306–312. Disponible en: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.009>>.
- Secreatría de Energía, 2018. *Informe pormenorizado sobre el desempeño y las tendencias de la industria eléctrica nacional 2017*. [en línea] Disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/415850/Informe_Industria_Electrica_2017.pdf>.
- Solartronic, 2003. Irradiaciones global, directa y difusa, en superficies horizontales e inclinadas, así como irradiación directa normal, en la República Mexicana. *Irradiaciones global, directa*, [en línea] 52(90), pp.1–64. Disponible en: <<https://aplicaciones.iingen.unam.mx/ConsultasSPII/DetallePublicacion.aspx?id=644>>.
- Tafalla, M., 2002. ¿Cómo nació el Sol? *Anuario del Observatorio Astronómico*, pp.325–337.
- Tagüeña Parga, J., 2005. *Asómate a la materia: ¿Qué es un semiconductor?*. Primera ed. Distrito Federal: UNAM.

Tina, G.M., Rosa-Clot, M., Rosa-Clot, P. y Scandura, P.F., 2012. Optical and thermal behavior of submerged photovoltaic solar panel: SP2. *Energy*, [en línea] 39(1), pp.17–26. Disponible en: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2011.08.053>>.

Zapata, M.A.V., Feria, O.S., Huerta, R. de G.G., Galan, O.V., Hernandez, S.A., Flores, R.S., Matsumoto, Y. y Alcantara, K.S., 2009. *Tecnologías Solar-Eólica-Hidrógeno-Pilas de Combustible como fuentes de energía*. Primera ed. *Libro de Ciencia y Tecnología N°2*. Ecatepec de Morelos: Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec.