



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**

CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS SOLARES HIBRIDOS PVT

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRÍA EN SUSTENTABILIDAD ENERGETICA**

**NOMBRE DEL SUSTENTANTE
ALFREDO TETL RIVERA GARCIA**

**DIRECTOR: DR. DIEGO SEURET JIMÉNEZ
CODIRECTOR: DR. ÁLVARO ZAMUDIO LARA**

**NOMBRE DE LOS SINODALES:
DR. J JESÚS ESCOBEDO ALATORRE
DR. JOSÉ ANTONIO MARBÁN SALGADO
DR. J. GUADALUPE VELÁSQUEZ AGUILAR**

CUERNAVACA, MORELOS 2020



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Instituto de
Investigación en
Ciencias
Básicas y
Aplicadas

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

Jefatura de Posgrado en Sustentabilidad Energética



Cuernavaca, Morelos, a 10 de marzo de 2020.

DRA. ELSA CARMINA MENCHACA CAMPOS
DIRECTORA INTERINA DEL CIICAP
P R E S E N T E

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada **CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS SOLARES HIBRIDOS PVT** que presenta el alumno **ALFREDO TETL RIVERA GARCÍA**, para obtener el título de **MAESTRÍA EN SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA**

Nos permitimos informarle que nuestro voto es:

NOMBRE	DICTAMEN	FIRMA
DR. J JESÚS ESCOBEDO ALATORRE	Aprobado	
DR. JOSÉ ANTONIO MARBÁN SALGADO	Aprobada	Jose Antonio M.S.
DR. J. GUADALUPE VELÁSQUEZ AGUILAR	Aprobado	
DR. ÁLVARO ZAMUDIO LARA	Aprobado	
DR. DIEGO SEURET JIMENEZ	Aprobado	

PLAZO PARA LA REVISIÓN 20 DÍAS HÁBILES (A PARTIR DE LA FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO)

NOTA. POR CUESTION DE REGLAMENTACIÓN LE SOLICITAMOS NO EXCEDER EL PLAZO SEÑALADO, DE LO CONTRARIO LE AGRADECEMOS SU ATENCIÓN Y NUESTRA INVITACIÓN SERÁ CANCELADA.

ECMC*MLGE/nmc.

RESUMEN

ABSTRACT

AGRADECIMIENTOS

CONTENIDO

INDICE DE FIGURAS.....	4
RESUMEN.....	6
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN	9
1.1 Antecedentes	9
1.2 Objetivo	10
1.2.1 Objetivos específicos.....	10
1.3 Planteamiento del problema.....	11
1.3 Justificación.....	12
1.5 Hipótesis.	15
1.6 Alcance.	15
CAPITULO 2. CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE LAS CELDAS SOLARES.....	16
2.1 La celda solar fotovoltaica.....	16
2.2 Parámetros de la celda solar.....	17
2.2.1 Corriente de corto circuito I_{SC}	17
2.2.2 Voltaje a circuito abierto V_{oc}	18
2.2.3 Factor de llenado (Fill Factor FF).	18
2.2.4 Eficiencia de conversión.	19
2.3 Circuito Equivalente.	20
2.3.1 Modelo de dos diodos.	20
2.3.2 Modelo de un solo diodo	22
2.4 Factores que afectan la eficiencia de una celda solar.....	23
2.4.1 Resistencia en serie y en derivación (R_s y R_{sh}).....	23
2.4.2 Intensidad de luz.	24
2.4.3 Mecanismos de recombinación.	25
2.4.4 Efecto de la temperatura.....	27

2.5 Breve historia de las celdas solares.....	28
2.6 Clasificación de las celdas solares.....	31
2.6.1 Celdas solares de primera generación.....	31
2.6.2 Celdas solares de segunda generación.....	32
2.6.3 Celdas solares de tercera generación.....	33
CAPITULO 3. COLECTORES SOLARES TÉRMICOS.....	34
3.1 Colectores solares de baja temperatura.....	36
3.1.1 Colectores de placa plana.....	36
3.1.2 Colectores de tubo de vacío.....	36
3.2 Colectores solares de alta temperatura.....	38
3.2.1 Concentración lineal.....	39
3.2.2 Concentración puntual.....	41
CAPITULO 4. DESARROLLO DEL DISEÑO DE UN SISTEMA SOLAR HÍBRIDO FOTOVOLTAICO TÉRMICO (PVT).....	43
4.1 Antecedentes.....	43
4.2 Sistema térmico.....	44
4.2.1 Fluido de trabajo.....	45
4.2.2 Geometría del colector.....	46
4.2.3 Tasa de flujo másico.....	48
4.2.4 Selección de material.....	49
4.2.5 Modelo físico del sistema térmico.....	49
4.3 Sistema eléctrico.....	51
4.3.1 Eficiencia eléctrica.....	53
4.4 Sistema híbrido.....	53
4.4.1 Eficiencia del sistema híbrido.....	54
CAPITULO 5. RESULTADOS Y ANALISIS.....	55
5.1. SolidWorks.....	55
5.2 ANSYS.....	55
5.2.1 ANSYS Workbench.....	56
5.2.2 Preprocesamiento.....	56
5.2.3 Procesamiento.....	57
5.2.4 Post procesamiento.....	58

5.2.5 Interpretación De Resultados.....	59
5.2.6 Flujo Turbulento.....	60
5.2.7 Análisis Térmico.....	62
5.2.8 Eficiencia térmica.....	67
5.2.9 Error.....	69
CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	70
REFERENCIAS	71

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Disminución en la eficiencia respecto a la temperatura en celdas solares [4]......	11
Figura 2. Capacidad instalada en México del SEN 2014-2015 [6]......	13
Figura 3. Niveles de radiación promedio anual [KW/h] en la república mexicana [6].	14
Figura 4. Banda del GAP de un material semiconductor [7]......	16
Figura 5. Curva I-V típica de una celda solar fotovoltaica.....	17
Figura 6. Factor de llenado de una celda solar [8].	19
Figura 7. Circuito equivalente de dos diodos [10]......	20
Figura 8. Circuito equivalente de un solo diodo [10].	22
Figura 9. Efectos de la resistencia R_s y R_{sh} en la eficiencia de la celda solar [8]... 24	
Figura 10. Relación de la intensidad de la luz con respecto a la corriente generada [1]......	25
Figura 11. Sección transversal de colector solar de placa plana convencional [30].36	
Figura 12. Colector térmico de tubos de vacío [31]......	37
Figura 13. Concentrador Fresnel reflectivo [33]......	39
Figura 14. Sistema de concentración solar de canal parabólico [34].	40
Figura 15. Sistema de receptor central o torres de energía [36]......	41
Figura 16. Sistema de concentración solar de disco parabólico [37].	42
Figura 17. Antecedente que sirvió de inspiración para mejor el diseño del sistema solar híbrido.....	43
Figura 18. Propuesta de diseño del sistema térmico.	44
Figura 19. Diseño del colector solar de doble paso con 32 aletas internas.	47
Figura 20. Diseño del colector solar de doble paso con 36 aletas internas.	47
Figura 21. Diseño del colector solar de doble paso con 40 aletas internas.	48
Figura 22. Perfil del sistema térmico y las variables que involucra.....	51
Figura 23. Eficiencia de las diferentes tecnologías de celdas [45].	52

Figura 24. Apariencia y constitución de una celda solar de triple juntura de sustrato de Germanio [46].....	52
Figura 25. Curva característica corriente-voltaje (I-V) de la celda de triple juntura [46].....	53
Figura 26. Simulación en ANSYS Workbench.	56
Figura 27. Ejemplo de mallado del intercambiador de calor (disipador) con configuración interna de 40 aletas.	57
Figura 28. Visualización de las líneas de corriente en el post procesado en CFD post.....	59
Figura 29. Flujo Turbulento en geometría de 32 aletas.	61
Figura 30. Flujo Turbulento en geometría de 36 aletas.....	61
Figura 31. Flujo turbulento en geometría de 40 aletas.	62
Figura 32. Grafica de temperatura del dispositivo promedio para diferentes flujos masicos y geometrías internas.	63
Figura 33. Temperatura del dispositivo con geometría de 32 aletas internas.	64
Figura 34. Temperatura del dispositivo con geometría de 36 aletas internas.....	64
Figura 35. Temperatura del dispositivo con geometría de 40 aletas internas.	65
Figura 36. Temperatura de salida del agua para diferentes flujos masicos y geometrías internas.	65
Figura 37. Temperatura de salida del agua con geometría de 32 aletas internas. ..	66
Figura 38. Temperatura de salida del agua con geometría de 36 aletas internas. .	66
Figura 39. Temperatura de salida del agua con geometría de 40 aletas internas. ..	67
Figura 40. Grafica de eficiencia para diferentes flujos masicos.	68

RESUMEN

Coletores solares y paneles fotovoltaicos aprovechan la radiación solar y la transforman en energía térmica y eléctrica respectivamente. Sin embargo, requieren dos instalaciones completamente independientes; implicando disponer de mayor superficie. Ante esto los sistemas solares híbridos, ofrecen una propuesta para combinar sistemas fotovoltaicos con intercambiadores de calor. Al hacer circular un líquido frío por debajo de un conjunto de módulos fotovoltaicos, el sistema se enfría, aumentando su eficiencia de conversión de energía, al mismo tiempo que se aprovecha el calor.

Dicho calor puede volverse un problema, ya que, a altas temperaturas, se reduce drásticamente la eficiencia de las celdas solar y se arriesga a un daño estructural permanente debido al estrés térmico. Situación que nos hizo preguntarnos si es posible mantener la eficiencia de las celdas solares sometidas a altas temperaturas o reducir las pérdidas al mínimo, mediante la circulación de un líquido refrigerante. Logrando así aumentar la eficiencia del sistema en conjunto respecto a los sistemas térmicos y fotovoltaicos por separado. Obteniendo mayor eficiencia en una menor área.

Para lo cual se propuso el diseño de un sistema híbrido de concentración solar. Mediante un concentrador solar parabólico (no desarrollado en este trabajo), se hará incidir una radiación concentrada estimada de 3000 W/m^2 sobre un eje focal, en el cual se encontrarán celdas solares de luz concentradas montadas en un intercambiador de calor del tipo de placa plana de estructura de doble paso y aletas internas en configuración laberinto.

Probando con tres diseños diferentes de la configuración interna del intercambiador de calor y se simuló en ANSYS. se hizo circular agua a temperatura ambiente variando el flujo masico en valores desde 0.03 hasta 3 kg/s. registrando las temperaturas promedio de salida del agua y del dispositivo, así como sus eficiencias térmicas y global del sistema. Es importante señalar que el objetivo principal, no es calentar el fluido, sino enfriar el dispositivo y aprovechar el calor transfiriéndolo al agua.

ABSTRACT

Solar collectors and photovoltaic panels take advantage of solar radiation and transform it into thermal and electrical energy respectively. However, they require two completely separate facilities; implying having more surface. Given this, hybrid solar systems offer a proposal to combine photovoltaic systems with heat exchangers. By circulating a cold liquid below a set of photovoltaic modules, the system cools, increasing its energy conversion efficiency, while taking advantage of the heat.

Such heat can become a problem, since, at high temperatures, the efficiency of solar cells is drastically reduced and risk of permanent structural damage due to thermal stress. Situation that made us wonder if it is possible to maintain the efficiency of solar cells subjected to high temperatures or reduce losses to a minimum, by circulating a coolant. Thus, increasing the efficiency of the system as a whole with respect to thermal and photovoltaic systems separately. Obtaining greater efficiency in a smaller area.

For which the design of a hybrid solar concentration system was proposed. Using a parabolic solar concentrator (not developed in this work), an estimated concentrated radiation of 3000 W / m² will be incised on a focal axis, in which there will be concentrated solar cells of light mounted on a plate-type heat exchanger flat with double pass structure and internal fins in a labyrinth configuration.

Testing with three different designs of the internal configuration of the heat exchanger and simulated in ANSYS. Water was circulated at room temperature, varying the mass flow in values from 0.03 to 3 kg / s recording the average water and device outlet temperatures, as well as its thermal and overall system efficiencies. It is important to note that the main objective is not to heat the fluid, but to cool the device and take advantage of the heat by transferring it to the water.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, quiero dar las gracias a mi familia, a mis padres y mis hermanos por siempre darme su apoyo en todas las decisiones que me han llevado hasta este momento en mi vida y sobre todo por todo el amor que me han brindado, cada uno a su manera.

Un agradecimiento especial al Dr. Diego Seuret, por todo el apoyo y comprensión que ha tenido conmigo para el desarrollo de este trabajo. Mas que un asesor es un amigo, y aunque el no lo crea todos sus consejos y palabras han impactado en mi vida.

Agradezco también al CONACYT por la beca otorgada durante el periodo de mi maestría. Así también al Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp) de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM) donde pude realizar mi trabajo. De igual manera a los miembros de mi comité, por su apoyo y tiempo que dedicaron a mi proyecto.

A mis amigos, ellos saben quienes son, les doy las gracias por su amistad y cariño a lo largo de mi vida, a Alejandro Castro, quien me ayudo a comenzar y me hubiera gustado mucho que estuviera conmigo en el final.

Por último, quiero agradecer a la Mtra. Reyna Falcón Castrejón, por todo el amor, cariño, comprensión y sobre todo ayuda para la realización de este trabajo, sien ella, no estaría donde estoy ahora. De verdad, muchas gracias.

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El sol es considerado como el origen de todas las energías renovables por la radiación que emite; produciendo diferentes fenómenos como el viento, gradientes de temperatura marinos, ciclo hidráulico, fotosíntesis, etc. Dicha radiación es transformada en energía térmica y eléctrica mediante dispositivos que generalmente trabajan por separado.

La tecnología fotovoltaica ha logrado enormes progresos desde su invención a mediados del siglo XIX. Actualmente los paneles solares utilizan celdas de silicio y se han convertido en una alternativa muy prometedora y popular para aprovechar la energía solar y convertirla en electricidad. Se sabe que para una celda de silicio monocristalino, la eficiencia de conversión es menor del 30%, por lo tanto, una gran parte de la energía solar se desperdicia a través de la disipación de calor y es necesario trabajar en la mejora de la eficiencia y la reducción del costo de fabricación [1-2]. Ante esto, nuevas tecnologías tales como: celdas de múltiples capas y sistemas fotovoltaicos de luz concentrada, ofrecen mejorar considerablemente la eficiencia, sin embargo, son costosas hoy en día y requieren de condiciones de operación complejas.

Por otro lado, la tecnología solar térmica permite utilizar la energía proveniente de la insolación solar. Los colectores solares térmicos se han aplicado a los sectores domésticos (baño, cocina, calefacción de espacios, calefacción de piscinas, etc.) y comerciales.

Por lo general el tiempo de recuperación de energía (EPBT por sus siglas en inglés) para el sistema solar térmico es mucho menor que el de los sistemas fotovoltaicos por que puede reducirse utilizando un sistema híbrido; el cual se define como un dispositivo de conversión de energía que combinan celdas fotovoltaicas con un intercambiador de calor. La combinación de los dos

enfoques anteriores no es una simple superposición de los materiales y los costos, sino que proporciona una solución viable para aumentar significativamente la eficiencia global del sistema [3]; Al hacer circular un fluido (usualmente aire o agua) por un colector solar que se encuentra acoplado a un conjunto de celdas o paneles solares, se reduce la temperatura de operación de los dispositivos fotovoltaicos, aprovechando el calor extraído para aumentar la temperatura del fluido.

Actualmente, se han hecho diferentes estudios que justifican la implementación de los Sistemas Solares Híbridos Fotovoltaicos Térmicos (PVT por sus siglas en inglés), sin embargo, es necesario continuar en la optimización de diversos parámetros tales como: diseño del colector solar, configuración, fluidos de enfriamiento (aire, agua), flujo del fluido de trabajo, tipos de celdas solares (luz difusa, luz concentrada), pero sobre todo eficiencias eléctrica, térmica y combinada. Estos y otros factores han permitido el desarrollo del presente trabajo.

1.2 Objetivo

Diseño, simulación, análisis y cálculo de la eficiencia de un sistema solar híbrido fotovoltaico térmico (PVT).

1.2.1 Objetivos específicos

- Cálculo de la eficiencia térmica de conversión.
- Cálculo de la eficiencia eléctrica de conversión.
- Cálculo de la eficiencia combinada.
- Modelo para determinar la eficiencia combinada.

- Disminuir la temperatura de trabajo de los paneles que se emplearan, para mantener su eficiencia en valores nominales.
- Aprovechamiento del calor para la obtención agua caliente para aplicaciones domesticas e industriales.
- Reducir la superficie necesaria para obtener electricidad y agua caliente simultáneamente.
- Aprovechar al máximo la radiación solar por metro cuadrado.
- Incrementar la vida útil de las instalaciones fotovoltaicas.

1.3 Planteamiento del problema

El rendimiento de las celdas fotovoltaicas que se comercializan en la actualidad está comprendido entre un 15% y un 25%, es decir, que sólo una pequeña parte de la radiación solar realmente se aprovecha en forma de energía eléctrica, la mayor parte se pierde en forma de calor. Este rendimiento es menor cuanto más alta es la temperatura (0.4% / °C). El aumento de temperatura en las celdas supone un incremento en la corriente, pero al mismo tiempo una disminución mucho mayor en proporción de la tensión, como se muestra en la Figura 1. El efecto global es que la potencia del panel disminuye al aumentar la temperatura de trabajo, además se arriesga a un daño estructural permanente debido al estrés térmico.

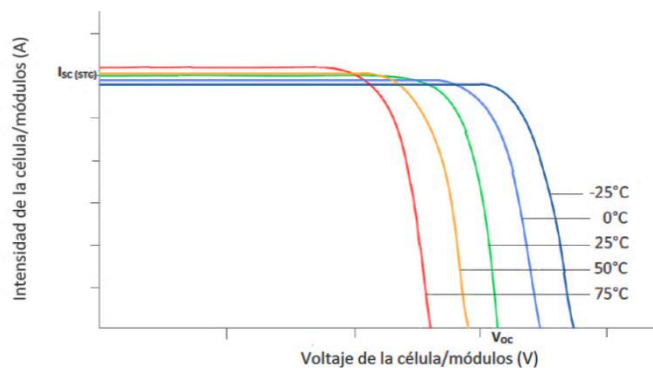


Figura 1. Disminución en la eficiencia respecto a la temperatura en celdas solares [4].

Por otra parte, para la instalación de equipos de energía solar fotovoltaica y térmica, se requieren dos instalaciones completamente independientes; esto implica tener que disponer de más superficie para realizar ambas instalaciones. Se ha calculado que por cada vivienda (cuatro personas, 100 m²) hacen falta uno o dos metros cuadrados de paneles solares.

Los materiales utilizados para las celdas fotovoltaicas son en su mayoría muy sensibles a la temperatura de modo que si la temperatura aumenta, la eficiencia eléctrica disminuirá. Sin embargo, si la energía térmica que causa el incremento de la temperatura en las celdas solares se canaliza y utiliza de manera adecuada, se evitará el aumento de temperatura en las celdas fotovoltaicas (a medida que se enfrían) incrementando así la eficiencia global del sistema al mismo tiempo en una menor área.

El presente proyecto pretende aportar alguna solución viable a los problemas planteados.

1.3 Justificación.

La población en el mundo crece a un ritmo acelerado aproximadamente de 1.4% al año, de igual forma la demanda de energía aumenta para satisfacer sus necesidades. Alrededor del 80% de dicha energía utilizada en el mundo proviene de combustibles fósiles y recientemente se han encontrado reservas suficientes para los próximos años [5].

Desde la revolución industrial el uso de hidrocarburos aumento desconociendo el daño que ocasionan al medio ambiente; las investigaciones de las últimas décadas han demostrado los efectos y consecuencias que su uso indiscriminado provocaron. Este hecho ha abierto las puertas a la implementación de las energías renovables como una salida y solución al deterioro que se le ha ocasionado al planeta.

Para el caso de México la capacidad instalada del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) fue de 68,044 MW, siendo el 71.7% correspondiente a centrales eléctricas convencionales y 28.3% a centrales eléctricas con tecnologías limpias. La capacidad instalada se incrementó 4% respecto a la capacidad registrada al cierre del 2014 (Ver figura 2). Las tecnologías limpias registraron un crecimiento anual de 6.9% al cierre del 2015 como resultado de la instalación de nuevas centrales eólicas y geotérmicas.

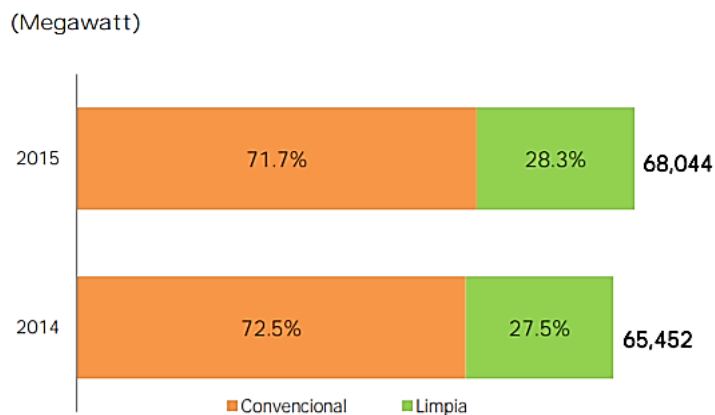


Figura 2. Capacidad instalada en México del SEN 2014-2015 [6].

El país cuenta con una posición geográfica privilegiada en cuanto a la radiación solar que incide, ya que gran parte del territorio (como se muestra en la figura 3) se llega a niveles de más de 2000 KW/h promedio anual. Son nueve centrales fotovoltaicas en operación distribuidas sobre todo en el centro y norte del país que representan menos del 0.1% de la capacidad total y el 0.03% de la generación eléctrica.

En el mundo, el 70% de la capacidad instalada y el 67% de la generación eléctrica en plantas fotovoltaicas se concentran en Alemania, China, Japón, Italia y Estados Unidos. La tendencia mundial muestra un crecimiento en el aprovechamiento de la energía solar por medio de paneles fotovoltaicos; ya que más del 60% de total de la capacidad de esta tecnología en el mundo se instaló en los últimos años.

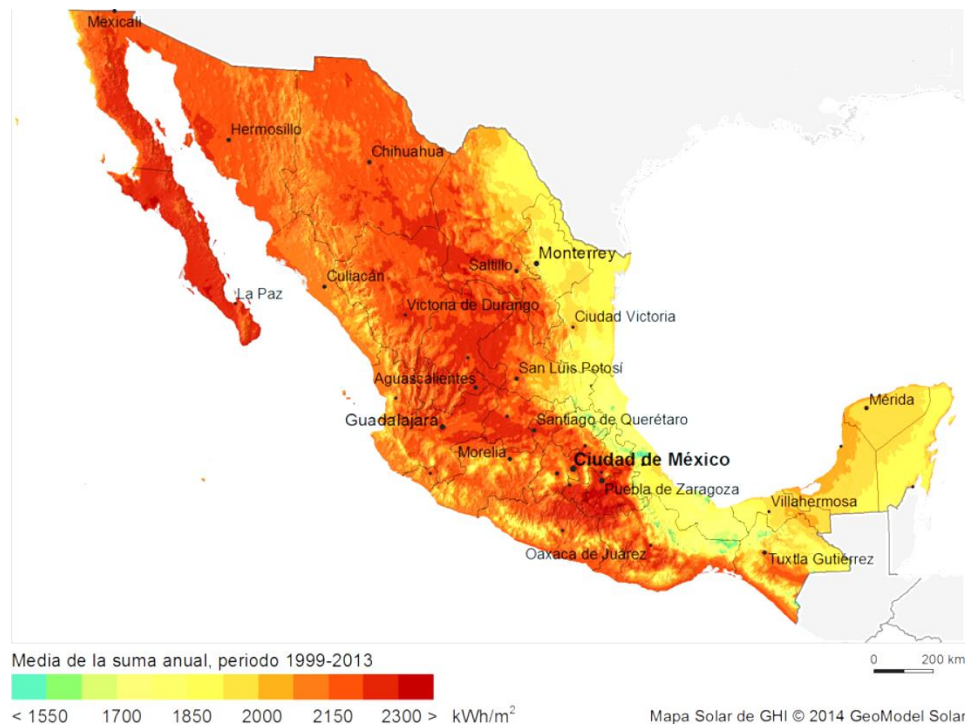


Figura 3. Niveles de radiación promedio anual [KW/h] en la república mexicana [6].

Se espera que la energía fotovoltaica incremente su participación en la generación de energía eléctrica gracias a la reducción de los costos de fabricación y los nuevos desarrollos tecnológicos que mejoraran la eficiencia de los sistemas, así como su acoplamiento en sistemas solares híbridos fotovoltaicos térmicos.

La demanda de energía a nivel mundial crece muy rápido, una posible solución para hacer frente al reto es el aprovechamiento de la radiación solar por medio de celdas fotovoltaicas, aunque su exposición a altas temperaturas nos ha hecho buscar una solución; para ello diversas investigaciones proponen el desarrollo de sistemas solares híbridos fotovoltaicos térmicos que combinan lo mejor de la tecnología térmica y fotovoltaica. Aprovechando al máximo el espectro solar en una superficie menor mejoran la eficiencia del sistema obteniendo, tanto agua caliente como electricidad en un mismo dispositivo. Esto se vuelve una propuesta novedosa e interesante a desarrollar.

1.5 Hipótesis.

¿Es posible mantener (Ideal) la eficiencia de las celdas solares sometidas a altas temperaturas o reducir las pérdidas al mínimo, mediante la circulación de un líquido refrigerante? Logrando así aumentar la eficiencia del sistema en conjunto respecto a los sistemas térmicos y fotovoltaicos por separado, obteniendo mayor eficiencia en una menor área.

1.6 Alcance.

El intercambiador de calor puede ser empleado en otros proyectos que involucren transferencia de calor como sistemas de refrigeración, bombas de calor, etc. por su buena eficiencia de conversión. Además del aprovechamiento al máximo del espectro solar para aplicaciones domésticas y comerciales.

CAPITULO 2. CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE LAS CELDAS SOLARES

SOLARES

2.1 La celda solar fotovoltaica.

Las celdas solares son dispositivos que convierten la radiación solar en energía eléctrica. Durante la conversión los fotones de luz son absorbidos por los electrones de valencia que rodean el núcleo de los átomos de un material semiconductor, en la mayoría de los casos silicio. Estos fotones absorbidos excitan los electrones, elevándolos a un estado de energía superior o a orbital más alto. Los electrones excitados luego se convierten en portadores de carga que permiten el flujo de corriente eléctrica a través del material (Véase figura 4).

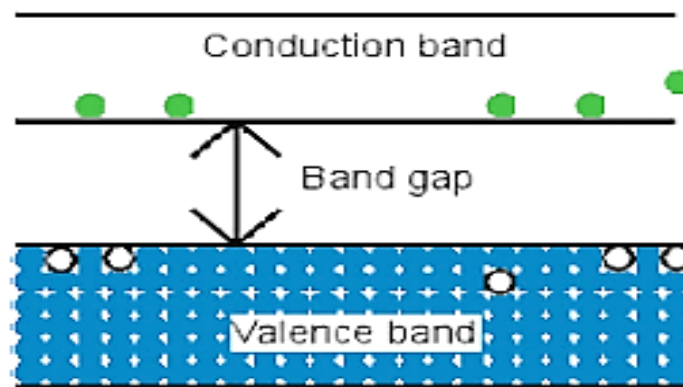


Figura 4. Banda del GAP de un material semiconductor [7].

El intervalo de banda es la barrera de energía que los electrones deben superar para moverse desde la banda de valencia a la banda de conducción.

En otras palabras, los electrones deben ser excitados por fotones de una determinada energía, mínima para saltar la banda prohibida que es proporcional a la tensión de circuito abierto del semiconductor. Con un aumento en la temperatura, los electrones tienen un estado de energía en reposo superior, la reducción efectiva de la banda prohibida. Con una

reducción de intervalo de banda la tensión de circuito abierto del semiconductor de la celda fotovoltaica (PV por sus siglas en inglés) disminuye mientras que la corriente permanece en gran parte [7].

2.2 Parámetros de la celda solar.

Los principales parámetros que se utilizan para calcular el rendimiento de las celdas solares son: la potencia máxima (P_{max}), la densidad de corriente de cortocircuito I_{sc} , el voltaje a circuito abierto V_{oc} y el factor de llenado FF. Estos parámetros se determinan a partir de la curva característica I-V (Ver figura 5). La eficiencia de conversión η puede determinarse a partir de estos parámetros.

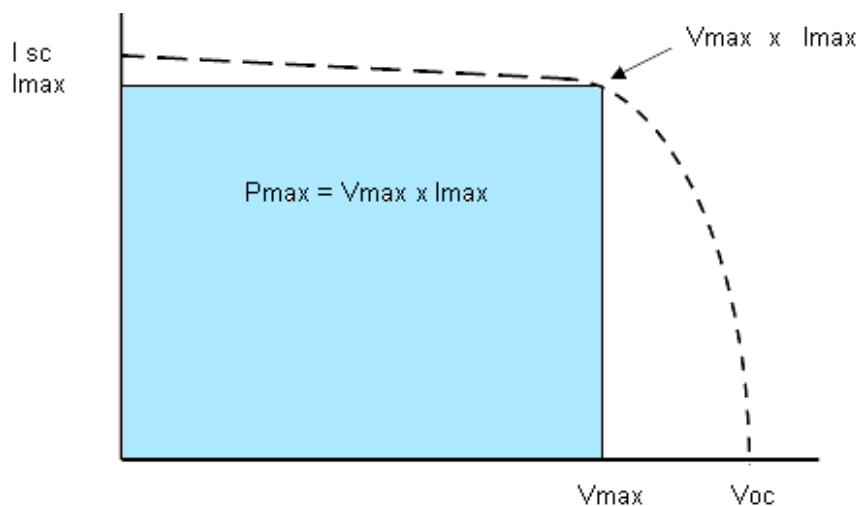


Figura 5. Curva I-V típica de una celda solar fotovoltaica.

2.2.1 Corriente de corto circuito I_{sc} .

La corriente de cortocircuito I_{sc} es la que fluye a través del circuito externo cuando los electrodos de la celda solar están cortocircuitados. La corriente de cortocircuito depende de la densidad del flujo de fotones incidente en la célula

solar que está determinada por el espectro de la luz que incide sobre ella; de igual forma el área de la celda afecta la I_{sc} .

Finalmente, la corriente máxima que puede suministrar la celda está ligada en gran medida a sus propiedades ópticas, como la absorción en la capa absorbente y la reflexión.

2.2.2 Voltaje a circuito abierto V_{oc} .

El voltaje a circuito abierto es la tensión máxima que suministra una celda solar, y esto se produce a corriente cero, es decir, cuando no fluye corriente a través del circuito externo.

V_{oc} corresponde al voltaje de polarización directa, en el cual la corriente oscura compensa la fotocorriente y dependiendo de la densidad de corriente fotogenerada, se puede calcular a partir de la ecuación 1 suponiendo que la corriente neta es cero.

$$V_{oc} = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{J_{ph}}{J_0} + 1\right) \quad (1)$$

2.2.3 Factor de llenado (Fill Factor FF).

El factor de llenado es la relación entre la potencia máxima ($P_{max}=I_{mp}V_{mp}$) generada por una celda solar y el producto de V_{oc} por I_{sc} . Gráficamente, el Fill Factor (FF) es una medida de “cuadratura” de la celda solar y también es el área del rectángulo más grande que se ajusta en la curva I-V ilustrado en la figura 6.

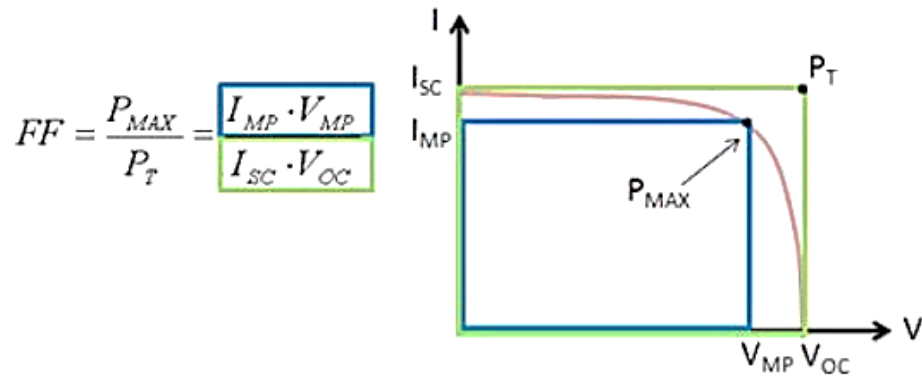


Figura 6. Factor de llenado de una celda solar [8].

Como el FF es una medida de la cuadratura de la curva I-V, una celda solar con un voltaje alto tiene un FF más grande, ya que la porción redondeada de la curva I-V ocupa menos área.

$$FF = \frac{J_{mp} V_{mp}}{J_{sc} V_{oc}} \quad (2)$$

2.2.4 Eficiencia de conversión.

La eficiencia de conversión se calcula como la relación entre la potencia máxima generada y la potencia incidente en la celda solar. El valor de irradiancia de 1000 W / m^2 para el espectro AM1.5 a 25°C se ha convertido en un estándar para medir la eficiencia de conversión de las celdas solares.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{J_{mp} v_{mp}}{P_{in}} = \frac{J_{sc} V_{oc} FF}{P_{in}} \quad (3)$$

Los parámetros típicos de una célula solar de silicio cristalino comercial son; $I_{sc} = 35 \text{ mA / cm}^2$, V_{oc} hasta 0.65 V y FF en el rango de 0.75 a 0.80 . La eficiencia de conversión se encuentra en el rango de 17 a 18% [9].

2.3 Circuito Equivalente.

Existen dos circuitos equivalentes que funcionan muy bien para describir la relación no lineal de la curva I-V característica de las celdas solares. Modelo de un solo diodo y modelo de dos diodos. Los parámetros principales que describen el comportamiento de la celda son; la fotocorriente generada, corriente de saturación, resistencia en serie, resistencia en derivación y el factor de idealidad.

2.3.1 Modelo de dos diodos.

De manera ideal, puede describirse el comportamiento de una celda solar por medio de una fuente de corriente conectada en paralelo a un diodo rectificador. Sin embargo, es necesario colocar otro diodo que regule la corriente de recombinación de la zona de carga espacial y una resistencia shunt o derivación puesta en paralelo con la fuente, que representa el corto circuito de la corriente cerca de los bornes de la celda debido a las impurezas del semiconductor y las no idealidades. Adicionalmente, los contactos de metal de la celda y la resistencia del material se representan mediante una resistencia conectada en serie con los elementos de la celda shunt como se observa en la Figura 7.

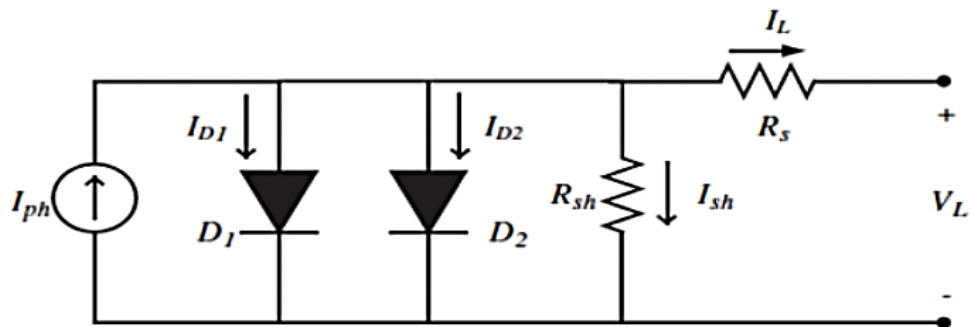


Figura 7. Circuito equivalente de dos diodos [10].

Es conveniente que los valores de las resistencias sean infinitamente pequeña para la resistencia en serie e infinitamente grande para la de derivación.

La corriente I_L total de la celda se calcula por medio de la ecuación 4:

$$I_L = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - I_{sh} \quad (4)$$

Dónde:

I_{ph} : Fotocorriente generada por la fuente

I_{D1} , I_{D2} : Corriente del diodo 1 y 2

I_{sh} : Corriente de la resistencia en derivación

Las corrientes de los dos diodos se representan por la ecuación de Shockley en las ecuaciones 5 y 6, mientras que la corriente de la resistencia en derivación se expresa en la ecuación 7.

$$I_{D1} = I_{SD1} \left[\exp \left(\frac{q(V_L + I_L R_s)}{n_1 kT} \right) - 1 \right] \quad (5)$$

$$I_{D2} = I_{SD2} \left[\exp \left(\frac{q(V_L + I_L R_s)}{n_2 kT} \right) - 1 \right] \quad (6)$$

$$I_{sh} = \frac{V_L + I_L R_s}{n_2 kT} \quad (7)$$

Dónde:

R_s : Resistencia en serie.

R_{sh} : Resistencia en derivación.

I_{SD1} : Corriente de difusión.

I_{SD2} : Corriente de saturación.

V_L : Voltaje en bornes.

n_1 , n_2 : Factores de idealidad del diodo de difusión y recombinación respectivamente.

k : Constante de Stefan Boltzmann.

T : Temperatura absoluta en Kelvin de la celda solar.

q : la carga del electrón.

Sustituyendo las ecuaciones 6 y 6 la corriente total de la celda se expresa como:

$$I_L = I_{ph} - I_{SD1} \left[\exp\left(\frac{q(V_L + I_L R_s)}{n_1 kT}\right) - 1 \right] - I_{SD2} \left[\exp\left(\frac{q(V_L + I_L R_s)}{n_2 kT}\right) - 1 \right] - \left[\frac{(V_L + I_L R_s)}{R_{sh}} \right] \quad (8)$$

2.3.2 Modelo de un solo diodo

Pese a que las corrientes de difusión y recombinación son linealmente independientes, ambas corrientes usualmente se combinan bajo la introducción de un factor de idealidad “n” de un diodo no-físico. Lo que da lugar a el modelo de un solo diodo. Sirviendo muy bien para ajustar los datos experimentales con los teóricos. El circuito equivalente de este modelo se muestra en la Figura 8.

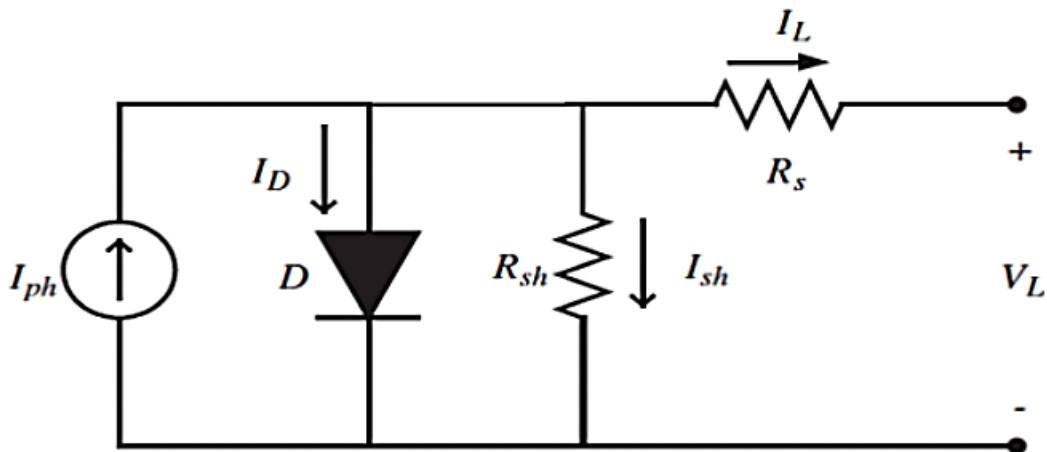


Figura 8. Circuito equivalente de un solo diodo [10].

El modelo de un solo diodo simplifica las ecuaciones para el obtener la corriente tola de la celda, reduciéndola a:

$$I_L = I_{ph} - I_{SD} \left[\exp \left(\frac{q(V_L + I_L R_s)}{n_1 kT} \right) - 1 \right] - \left[\frac{(V_L + I_L R_s)}{R_{sh}} \right] \quad (9)$$

2.4 Factores que afectan la eficiencia de una celda solar.

Diferentes factores afectan la eficiencia de una celda solar, por ejemplo: las resistencias en serie y en paralelo, los niveles de radiación incidentes, los mecanismos de recombinación, factor de idealidad y sobre todo el más importante para el desarrollo de esta investigación el incremento de la temperatura.

2.4.1 Resistencia en serie y en derivación (R_s y R_{sh}).

Los efectos de las resistencias en serie y derivación afectan la eficiencia de las celdas solares, al disipar energía por estas. Son parámetros que difícilmente se puede modificar y dependen del proceso de fabricación de las celdas.

El valor de la resistencia en serie R_s depende de los siguientes aspectos:

- Paso de la corriente a través del emisor y la base de la celda solar.
- La resistencia de contacto entre el metal y el silicio.
- La resistencia de los contactos de metal frontales y traseros.

Por su parte la resistencia en derivación R_{sh} proporciona una ruta alternativa a la corriente generada por la luz. Esta desviación reduce la cantidad de corriente que circula a través de la unión de las junturas del material semiconductor, disminuyendo así el voltaje de la celda.

La afectación de los valores de las resistencias R_s y R_{sh} se puede apreciar de manera clara en el factor de llenado FF, como se aprecia en la figura 9. De

manera ideal se espera que la resistencia en serie sea infinitamente pequeña, para evitar una caída de tensión antes de la carga. Y en el caso de la resistencia en derivación, se espera que su valor sea infinitamente grande, midiendo así una ruta alternativa para que fluya la corriente.

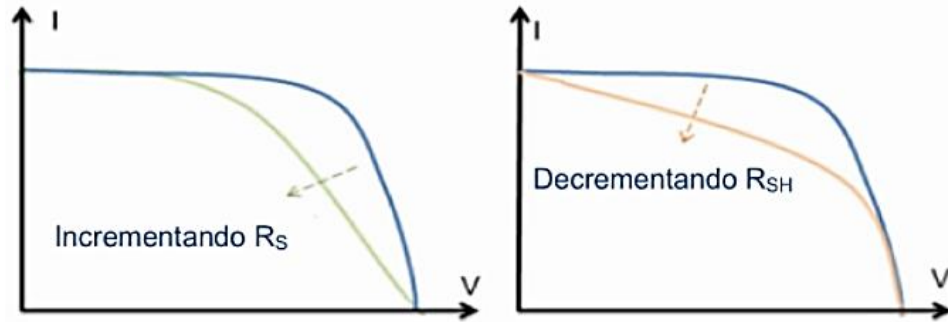


Figura 9. Efectos de la resistencia R_s y R_{sh} en la eficiencia de la celda solar [8].

2.4.2 Intensidad de luz.

La corriente que suministra una celda es proporcional a la intensidad de la radiación que incide sobre ella y al área de esta. En consecuencia, la eficiencia de una celda solar disminuye considerablemente con la disminución de la intensidad de la luz (figura 10). La evaluación de la extensión de esta reducción es sin embargo, menos directa que en el caso de la temperatura, ya que el fabricante solar a menudo no proporciona explícitamente un factor de reducción de la eficiencia en cada nivel de intensidad de la luz.

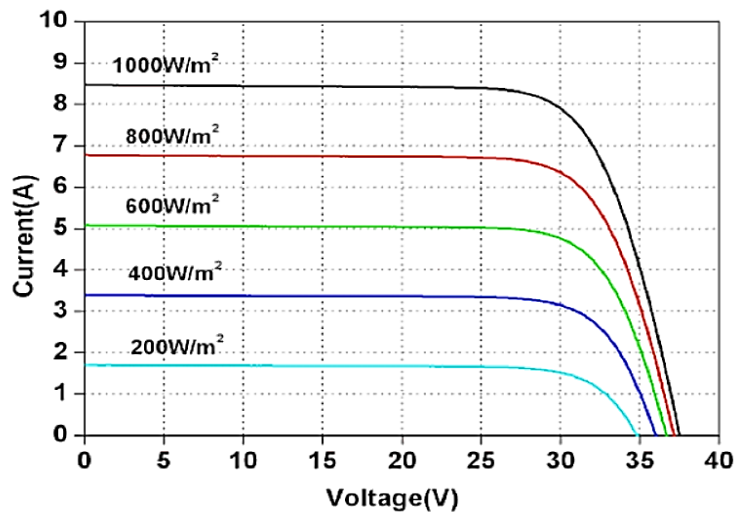


Figura 10. Relación de la intensidad de la luz con respecto a la corriente generada [1].

La variación máxima del FF para la intensidad de la luz entre 1 y 1000 W / m² es aproximadamente del 2% para el Telurio de Cadmio (CdTe), 5% en el caso del silicio amorfo, 22% en el silicio policristalino y 23% para el silicio monocristalino [11]. Lo que afecta la eficiencia de las celdas.

$$\eta = \frac{I_{sc}V_{oc}FF}{G_M} \quad (10)$$

2.4.3 Mecanismos de recombinación.

Al describir el principio de funcionamiento de una celda solar, se dice, que un electrón gana energía suficiente para pasar de la banda de valencia a la banda de conducción; al liberarse el electrón se produce un espacio al que suele llamarse hueco, estrechamente relacionados, ya que no es posible uno sin el otro formándose el par electrón-hueco (par e-h). El proceso inverso también existe, esto ocurre cuando un electrón libre pasa a ocupar un hueco. Se dice entonces que se ha producido una recombinación de un par e-h. Estos procesos ocurren continuamente de forma dinámica en un semiconductor [12].

Existen tres tipos básicos de recombinación en la mayor parte de un semiconductor. Asociada principalmente a la vida útil del material con el que son fabricadas las celdas.

- **Recombinación radiactiva banda a banda:** es el mecanismo de recombinación dominante en los semiconductores de banda prohibida de energía directa como el GaAs. En esta recombinación, un electrón de la banda de conducción se combina con un agujero en la banda de valencia, liberando un fotón; el fotón emitido tiene una energía similar a la banda prohibida, por lo tanto, está sólo débilmente absorbido de manera que puede salir del semiconductor.
- **Recombinación Shockley-Read-Hall:** también llamada recombinación a través de defectos se atribuye a materiales con impurezas. En esta recombinación el electrón que se recombina hace una primera transición desde la banda de conducción a un centro de recombinación, y posteriormente una segunda transición desde el centro de recombinación a la banda de valencia en la que está el hueco. El centro de recombinación es un nivel de energía permitido en la banda prohibida, similar a los niveles donador y aceptor, pero situado a la mitad de la banda. Es el mecanismo dominante en el silicio.
- **La recombinación Auger** implica tres portadores. Un electrón y un agujero se recombinan, pero en lugar de emitir la energía en forma de calor o como un fotón, la energía se da a un tercer portador, un electrón en la banda de conducción. Esta recombinación es la más importante a altas concentraciones de portadores ocasionado por un dopaje alto o un alto nivel de inyección bajo luz solar concentrada. En las células solares basadas en silicio, la recombinación Auger limita la vida útil y la eficiencia final. Cuanto más fuertemente dopado está el material, más corto es el tiempo de vida de las celdas [13].

2.4.4 Efecto de la temperatura.

Los módulos fotovoltaicos son afectados por factores como baja irradiación, suciedad y altas temperaturas de funcionamiento, esto contribuye a degradación dramática en la eficiencia de conversión y la vida técnica de las celdas solares [14-15]. Sin embargo, tienden a verse afectados principalmente por altas temperaturas de operación debido a la radiación del sol, especialmente a la radiación concentrada que tiende a elevar aún más la temperatura de la unión PV.

La celda fotovoltaica absorbe hasta el 80% de la radiación solar incidental, sin embargo, solo una pequeña parte de la energía incidente absorbida es convertida en electricidad según la eficiencia de conversión de la tecnología PV utilizada [16]. El resto de energía es disipada en forma de calor y el módulo fotovoltaico puede alcanzar temperaturas tan altas como 40°C sobre el ambiente. El rendimiento de la celda fotovoltaica disminuye a medida que aumentan las condiciones ambientales; fundamentalmente debidas al aumento de la presencia de portadores intrínsecos que tienden a aumentar la corriente de saturación oscura de la unión p-n. El aumento en la corriente de saturación oscura hace que el voltaje del circuito abierto disminuya linealmente, que para el silicio a 300K corresponde a aproximadamente $-2.3\text{mV} / ^\circ\text{C}$. [17-18].

Los cambios de temperatura principalmente son debido a la dependencia de la temperatura de la tensión de circuito abierto de la celda en función de la tecnología fotovoltaica [19]. Tal propiedad se conoce como Coeficiente de temperatura de la celda PV. De acuerdo con Del Cueto [20], la reducción en la eficiencia debido a la dependencia de la temperatura está en el rango absoluto de 1-2% sobre el rango de temperaturas de 30°C.

2.5 Breve historia de las celdas solares.

En 1839, el fisiólogo francés Alexandre-Edmond Becquerel descubrió el efecto fotovoltaico en una celda electrolítica que estaba hecha de dos electrodos de platino y una solución electrolítica de cloruro de plata disuelto en una solución ácida; donde observo que la corriente de la celda se mejoró cuando su configuración fue irradiada con luz solar.

William Grylls Adams y su estudiante Richard Evans Day en 1876 demostraron el efecto fotovoltaico en una unión semiconductor basada en el platino y selenio, pero el rendimiento fue muy pobre. Siete años después Charles Fritts logró fabricar un dispositivo fotovoltaico basado en una unión de oro y selenio donde la eficiencia de conversión de energía fue de tan solo del 1%.

En 1887, el físico alemán Heinrich Hertz describe el efecto fotoeléctrico como la emisión de electrones a partir de un material que ha absorbido la luz con una longitud de onda más corta que un material de frecuencia de umbral dependiente; para 1905 Albert Einstein explicaba el efecto fotoeléctrico con el supuesto de que la energía de la luz se transportaba con paquetes cuantificados de energía, que hoy llamamos fotones.

Jan Czochralski químico polaco inventó en 1918 un método para cultivar materiales cristalinos de alta calidad, dando inicio a los avances para crecimiento de silicio monocristalino que posteriormente se utilizaría en las celdas solares. Dan Trivich fue el primero en realizar cálculos teóricos sobre el rendimiento de la celda solar para materiales con diferentes bandgaps en el año de 1953. En esta década de 1950 varias compañías y grupos de trabajo comenzaron a desarrollar celdas solares a base de silicio empleadas en los satélites de potencia que orbitan alrededor de la Tierra; entre ellos se encontraban RCA Corporation, Hoffman Electronics Corporation y United States Army Signal Corps.

En los Laboratorios Bell de los Estados Unidos en 1954, científicos como Daryl M. Chapin, Calvin S. Fuller y Gerald L. Pearson, desarrollaron una celda solar basada en silicio con una eficiencia de aproximadamente 6%; sin embargo en esos días la investigación sobre la tecnología fotovoltaica se orientó principalmente en el suministro de aplicaciones espaciales; por ejemplo el satélite estadounidense Vanguard 1, que fue lanzado en 1958 por la marina de los EE. UU. funcionaba con energía solar de Hoffman Electronics y era el cuarto satélite artificial de la Tierra y el primero en ser alimentado con celdas solares [21].

En la década de los 60's Bell Telephone Laboratories lanzó el primer satélite de telecomunicación con tecnología solar y la NASA lanzó el primer Observatorio Astronómico Orbital, que funcionaba con una matriz solar fotovoltaica de 1 kW. Giovanni Francia construyó la primera planta de energía solar concentrada cerca de Génova, Italia que fue capaz de producir 1 MW con vapor sobrecalentado a 100 bar y 500 ° C.

En 1970, el físico soviético Zhores Alferov desarrolló celdas solares basadas en una hetero unión de arseniuro de galio. Esta fue la primera celda basada en materiales semiconductores III-V. En 1976, Dave E. Carlson y Chris R. Wronski desarrollaron los primeros dispositivos fotovoltaicos de capa fina basados en silicio amorfo en los Laboratorios RCA. En 1978, las compañías japonesas SHARP y el Laboratorio de aplicaciones electrónicas de Tokio traen las primeras calculadoras de energía solar en el mercado.

Debido a la crisis del petróleo, inducida por el embargo del petróleo de la OPEP en 1973 y como consecuencia a un precio del crudo en alza, el interés público en la tecnología fotovoltaica para la aplicación terrestre aumentó. En ese momento, la tecnología fotovoltaica pasó de ser una tecnología exclusiva del sector aeroespacial a una tecnología aplicable a las necesidades de la población. A fines de la década de 1970 y principios de 1980, muchas

empresas comenzaron a desarrollar módulos y sistemas fotovoltaicos. En 1980 la Universidad de Delaware demostró que las primeras celdas solares de película delgada basadas en una unión sulfuro de cobre / cadmio-sulfuro tenían una eficiencia de conversión superior al 10%. Para 1985 se presentaron celdas de silicio cristalino con eficiencias superiores al 20% en la Universidad de Nueva Gales del Sur en Australia. La École polytechnique fédérale de Lausanne en 199, publicó la primera celda solar sensible a colorantes de alta eficiencia mediante Michael Grätzel y sus colaboradores. La celda sensibilizada por colorante es un tipo de sistema fotoelectroquímico, en el que se coloca un material semiconductor basado en sensibilizadores moleculares entre un fotoanodo y un electrolito.

En 1994, el Laboratorio Nacional de Energía Renovable de EE. UU., presentó una celda solar de luz concentradora basada en materiales semiconductores III-V por medio de la unión en tándem de indio-galio-fosforo y arseniuro de galio, la cual excedió el límite de conversión del 30%. A partir de 2000, las cuestiones ambientales y económicas comenzaron a ser cada vez más importantes en la discusión pública, que renovó el interés público en la energía solar. Desde principios de este siglo, el mercado fotovoltaico se transformó de un mercado regional a un mercado global, Alemania tomó la delantera con una política progresiva de fijación de tarifas, lo que llevó a un gran mercado e industria solar nacional [22].

Desde aproximadamente 2008, el gobierno chino ha estado invirtiendo fuertemente en su industria fotovoltaica. Como resultado, China ha sido el fabricante de módulos fotovoltaicos dominante desde hace varios años. En 2012, la capacidad de energía solar mundial superó la barrera mágica de 100 GWp [23]. Entre 1999 y 2012, la capacidad fotovoltaica instalada por lo tanto ha crecido con un factor de 100. En otras palabras, en los últimos 13 años, el crecimiento promedio anual de la capacidad fotovoltaica instalada fue de alrededor del 40% [9].

2.6 Clasificación de las celdas solares.

El avance y desarrollo de la tecnología de celdas solares suele dividirse en tres generaciones; silicio cristalino (primera generación), sistemas de capa delgada (segunda generación), sistemas de luz concentrada o celdas multicapas (Tercera generación).

2.6.1 Celdas solares de primera generación

- Silicio monocristalino.

Las celdas solares de silicio monocristalino son los semiconductores más utilizados. Su eficiencia ideal es del 24.7% y la eficiencia del módulo comercial alcanza el 18% [24]. Su mayor ventaja es poseer la mayor eficiencia dentro del silicio cristalino, y su principal desventaja es su alto costo de fabricación.

- Silicio policristalino.

Es un material que consta de múltiples y pequeños cristales de silicio. La eficiencia de conversión de energía para un módulo comercial hecho de silicio policristalino oscila entre 10% y 14% según lo establecido por Hermann en 1998 [25]. Algunas de las ventajas del silicio policristalino son:

- Más fuerte que el silicio monocristalino.
- Se puede cortar en un tercio del grosor del silicio monocristalino.
- Costos más bajos en comparación con los costos de fabricación del silicio monocristalino.
- La producción eléctrica es más alta que la amorfa [26].

Sus desventajas en comparación con otras celdas fotovoltaicas basadas en silicio incluyen ser menos eficientes energéticamente que el silicio monocristalino.

- Silicio amorfo

El silicio amorfo se descubrió por primera vez en 1974. Este material es una forma no cristalina de silicio que tiene una estructura atómica desordenada y es menos sensible a la temperatura.

El silicio amorfo es la tecnología de película delgada más popular con eficiencias que van del 5 hasta el 7% y los diseños de doble y triple unión lo elevan de 8 a 10% [27]. Algunas de las ventajas de las células solares fotovoltaicas de silicio amorfo son las siguientes:

- Alta absorción de la luz del sol (40 veces mayor que el silicio monocristalino).
- Menores costos de fabricación en comparación con otras celdas fotovoltaicas basadas en silicio.
- Se puede depositar en los sustratos de bajo costo (acero, vidrio, plástico).

2.6.2 Celdas solares de segunda generación.

- Celdas de capa delgada.

Las tecnologías fotovoltaicas de capa delgada basadas en materiales inorgánicos se están desarrollando rápidamente, tanto en el laboratorio como en la industria; para su fabricación es necesario depositar una o más capas delgadas de material fotovoltaico sobre un sustrato, el rango de grosor de dicha capa es amplio y varía desde nanómetros hasta micrómetros.

Se ha reportado que celdas solares que utilizan silicio policristalino de capa fina y pueden lograr eficiencias de conversión de potencia fotovoltaica superiores al 19% como resultado del atrapamiento de luz y la pasivación de la superficie posterior con un espesor de silicio óptimo [28]. Todas las

tecnologías fotovoltaicas de capa fina existentes, especialmente la tecnología basada en Cu (In, Ga) Se₂ (CIGS), tienen un alto potencial de reducción de costos en altos volúmenes de producción que proyectan desafíos futuristas para obtener rendimiento suficiente y calidad superior para lograr eficiencias de entre 11% y 12,7%.

2.6.3 Celdas solares de tercera generación.

- Células solares del grupo III-V- Arseniuro de galio (GaAs)

El arseniuro de galio está hecho químicamente de dos elementos principales: galio y arsénico. A logrado una eficiencia de conversión fotovoltaica de más del 25% en celdas solares de unión única, fabricadas en GaAs y cultivadas epitaxialmente en un sustrato monocristalino [29]. Una de las aplicaciones más populares para esta tecnología basada en GaAs es la espacial, ya que es muy resistente frente a las radiaciones solares. Algunas de las ventajas de este tipo de materiales son las siguientes:

- Alto nivel de absorptividad.
- Se necesita un espesor bajo para absorber la luz solar (por lo que se necesita menos material en comparación con otros materiales de otras tecnologías solares).
- Alta resistencia al calor

El sustrato monocristalino que se usa para cultivar GaAs es muy costoso, lo que se supone que es una desventaja. De acuerdo con este hecho, se prefiere principalmente usar menos cantidad de material, por lo que la aplicación se limita a sistemas PV / T concéntricos que necesitan menos área y por lo tanto material.

CAPITULO 3. COLECTORES SOLARES TÉRMICOS.

En el siglo XVIII, el físico suizo Horace Bénédict construyó trampas de calor, las cuales eran una especie de invernaderos miniaturizados; consistían en una caja de vidrio, dentro de otra caja de cristal más grande, con un total de hasta cinco cajas. Cuando se expone a la irradiación solar directa, la temperatura en la caja más interna podría aumentar hasta valores de 108 ° C; lo suficientemente caliente como para hervir agua y cocinar alimentos. Estas cajas se pueden considerar como los primeros colectores solares del mundo.

En las décadas de 1860 y 1870, el inventor francés Augustin Mouchot desarrolló máquinas de vapor con energía solar, utilizando el primer colector solar cilindro parabólico del mundo. La motivación de Mouchot era su creencia de que los recursos de carbón eran limitados. En ese momento, el carbón era la fuente de energía para impulsar los encendidos de vapor, sin embargo, a medida que el carbón se hizo más barato, el gobierno francés decidió que la energía solar era demasiado costosa y dejó de financiar la investigación de Mouchot.

La geometría de los colectores es muy importante en los diseños de sistemas híbridos y también en sus aplicaciones. Usualmente se clasifican en colectores de baja o alta temperatura y por el tipo de fluido de trabajo (aire o en agua) con su respectiva subclasificación como se observa en la tabla 1.

Tabla 1. Tipos de colectores solares.

		Tipo de colector	Nivel de concentración	Temperatura de funcionamiento [°C]
Baja temperatura		Plano	1	30-80
		Tubo de vacío	1	50-200
Alta temperatura	Concentración lineal	Canal parabólico	1-40	60-400
		Reflector lineal de Fresnel	10-40	60-250
	Concentración puntual	Disco parabólico	100-1000	100-1500
		Receptor o torre central	100-1500	150-2000

3.1 Colectores solares de baja temperatura.

3.1.1 Colectores de placa plana.

El colector más convencional para aplicaciones a baja temperatura. Los elementos que lo conforman se muestran en la figura 11.

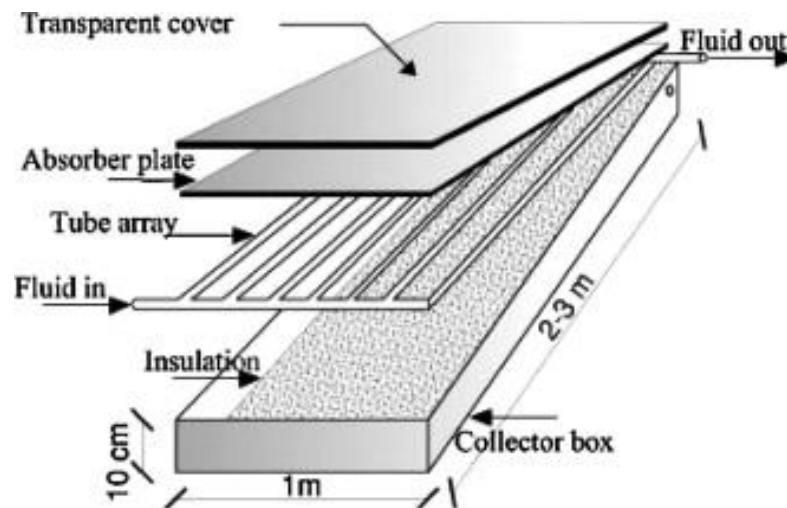


Figura 11. Sección transversal de colector solar de placa plana convencional [30].

Dentro de sus ventajas son sus bajos costos de fabricación y el aprovechamiento de la radiación directa y difusa; ya que no requieren de un sistema de seguimiento solar y pueden alcanzar temperaturas que oscilan entre los 30 y los 80 °C. Respecto a sus desventajas podemos decir que su eficiencia es baja de entre 30 y 50 %, debido a las pérdidas por conducción y convección [30].

3.1.2 Colectores de tubo de vacío.

Los colectores de vacío encuentran su principal aplicación en los sistemas de temperaturas intermedias (calefacción, acondicionamiento de aire, procesos industriales, etc.) y en lugares fríos con diferencias elevadas entre la temperatura del colector y la del ambiente.

Los sistemas de colectores de tubo de vacío se basan en los tubos evacuados que están conformados por dos tubos concéntricos entre los cuales se ha aspirado el aire produciéndose un vacío. En uno de los extremos, ambos tubos se unen sellándose el vacío. Dentro de ambos tubos se sitúan los distintos tipos de absorbedores que determinan los distintos sistemas.

Los tubos evacuados simples son tubos evacuados ensamblados directamente con el depósito acumulador o de manera independiente que pueden contener solo agua o agua más anticongelante. En la pared interior del tubo evacuado se sitúa una capa de color oscuro de material absorbente. Cuando la radiación solar incide sobre la capa de material absorbente se transforma en calor y eleva la temperatura del fluido que está en contacto con él. El fluido se calienta por convección y comienza a ascender a través del tubo siendo reemplazado por fluido frío que a su vez se calienta y reinicia el proceso (ver figura 12). Este tipo de tubo de vacío ofrece la ventaja de tener las ya comentadas escasas pérdidas de calor y los inconvenientes de ser muy sensible a la presión.

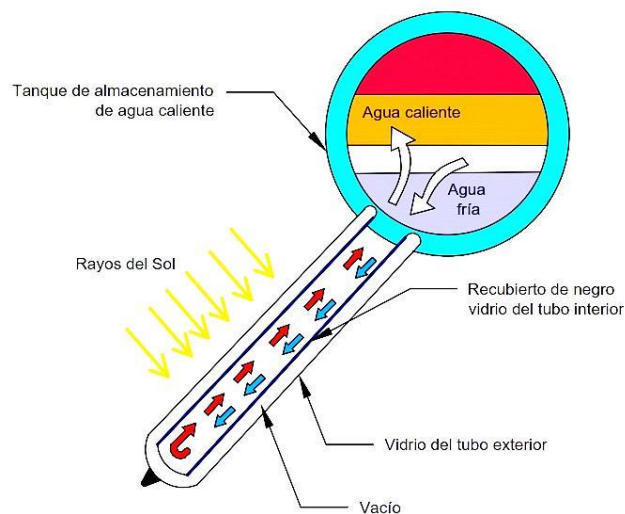


Figura 12. Colector térmico de tubos de vacío [31].

3.2 Colectores solares de alta temperatura.

Esta clase de colectores alcanzan temperaturas elevadas que van del orden de unos cientos hasta un par de miles de grados centígrados dependiendo el tipo y la configuración; para ello es necesario utilizar concentradores solares; dispositivos que reflejan o refractan la luz hacia una área de recepción donde la energía solar se concentra, teniendo una mayor densidad de flujo de radiación por unidad de área. Suelen clasificarse en dos tipos: concentradores puntuales y lineales [32].

Los colectores de concentración solar tienen ciertas ventajas comparados con los colectores planos convencionales:

- Se obtienen mayores temperaturas para la misma superficie de colección.
- La eficiencia térmica es mayor debido a que el área de pérdida de calor es pequeña comparada con el área de recepción.

Dentro de sus desventajas encontramos:

- Estos sistemas no colectan la radiación difusa y solo aprovechan la radiación solar directa. Por lo que se ven afectados por las condiciones climatológicas.
- Se requiere de un sistema de seguimiento solar, para aprovechar la mayor cantidad de radiación directa.
- Las superficies reflectoras pueden perder su reflectancia con el tiempo, además requieren limpieza y mantenimiento periódicos.

3.2.1 Concentración lineal.

Sistemas que concentran la radiación solar en un receptor lineal, situado en el foco del concentrador. Estos dispositivos alcanzan menores temperaturas ya que la región donde se capta la energía solar concentrada presenta un área mayor que en los de foco puntual. Se clasifican por su tipo de colector.

- Colector Fresnel reflectivo.

En este sistema los espejos son planos y están colocados en el mismo plano horizontal, girando a lo largo del día o periódicamente según su orientación, reflejan los rayos del sobre la línea focal por donde pasa un tubo con el fluido de trabajo, ver figura 13. Es común que estos sistemas cuenten con un segundo sistema concentrador en el receptor para asegurar la máxima captación de la energía solar.

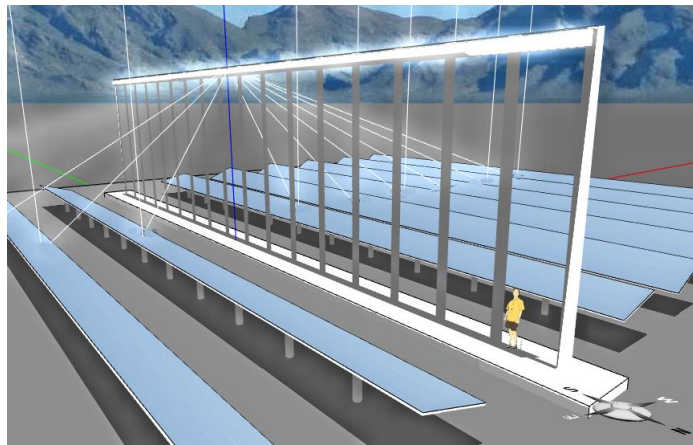


Figura 13. Concentrador Fresnel reflectivo [33].

Este diseño utiliza materiales reflectores y componentes absorbedores de bajos costos. Pese a ser una tecnología con un rendimiento óptico y térmico menores, esto se ve compensado por una menor inversión y menos costes de operación y de mantenimiento. Este sistema también ofrece un espacio en semisombra, algo especialmente útil en climas desérticos; actuando como un

gran paraguas segmentado pudiendo proteger frente al frío de la noche en el desierto y del sol a cosechas, pastos y cuencas acuíferas para evitar una evaporación excesiva.

- Colectores de canales parabólicos

Tecnología de energía solar térmica de concentración más madura y han probado ya su rendimiento. Los primeros sistemas se instalaron en 1912 cerca de El Cairo (Egipto) para generar vapor para una bomba que suministraba agua para irrigación. En aquel momento esta planta era competitiva con instalaciones de carbón en regiones donde el carbón resultaba caro. En el sistema de canal parabólico los rayos solares se concentran en los tubos absorbedores (figura 14) donde se logran temperaturas operativas que oscilan entre 350 y 550°C.

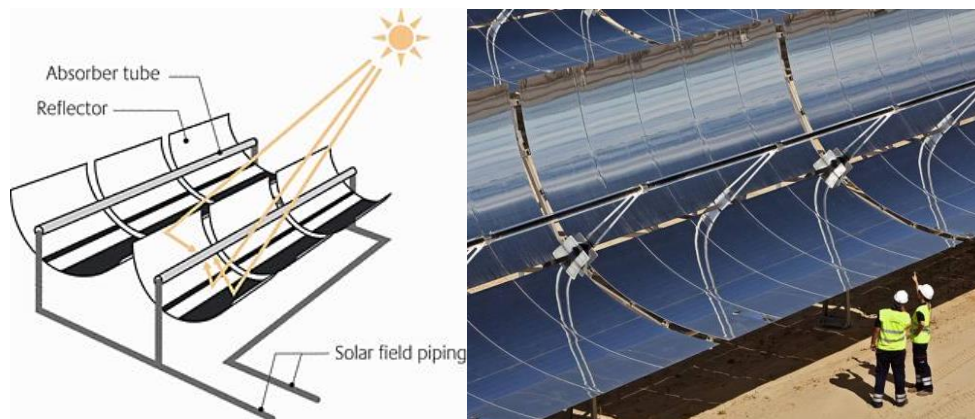


Figura 14. Sistema de concentración solar de canal parabólico [34].

Consisten en un fluido de transferencia térmica (HTF) bombeado por el tubo absorbedor que transfiere la energía térmica a un ciclo convencional de turbina de vapor. Para la transferencia térmica las plantas utilizan aceite térmico sintético que se calienta y se utiliza para producir vapor ligeramente sobrecalentado a alta presión, el cual pasa a una turbina de vapor conectada a un generador para producir electricidad. Como el aceite térmico alcanza una

temperatura tope de unos 400°C, limita la eficiencia de la conversión del ciclo de turbina. Tanto los investigadores como la industria están desarrollando también fluidos avanzados que sustituyan los aceites sintéticos, ejemplo de esto es el uso de sales fundidas como fluidos de transferencia térmica y la generación directa de vapor en los tubos absorbedores. Actualmente se encuentran en periodo de construcción plantas prototipo de ambos tipos [35].

3.2.2 Concentración puntual.

Sistemas que orientan todos los reflectores o espejos hacia un mismo punto, concentrando el flujo de radiación consiguen elevadas temperaturas. Se dividen en dos tipos: sistemas de colector central y de disco parabólico.

- Colector de receptor central (o torres de energía)

Utilizan un conjunto de espejos (heliostatos) distribuidos en una gran superficie, como se aprecia en la figura 15, realiza un seguimiento individual del sol y dirigen la luz hasta la parte superior de una torre. Concentrando la radiación de 600 a 1500 veces se logran unas temperaturas de más de 1000°C. La energía solar es absorbida por un fluido de trabajo y se emplea después para generar vapor y accionar una turbina convencional.

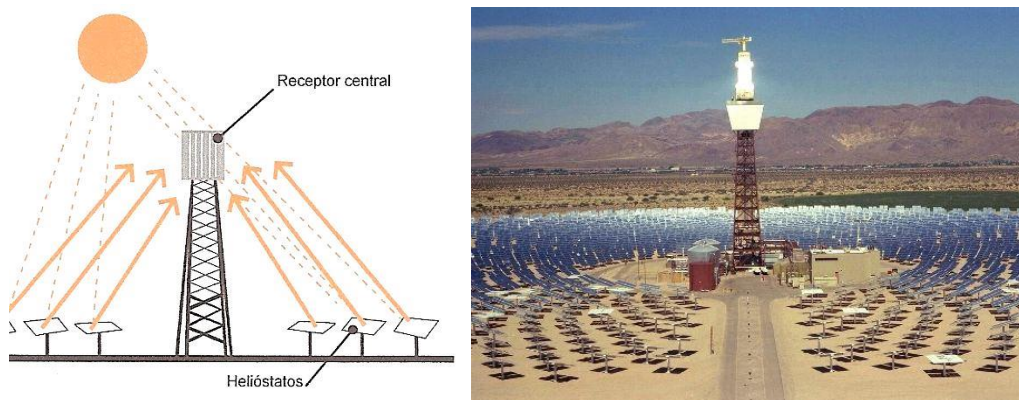


Figura 15. Sistema de receptor central o torres de energía [36].

- Colectores de disco parabólico

Unidades individuales con un generador de motor montado en el punto focal del reflector (figura 16). La unidad de generador a motor puede incorporar un motor Stirling o una turbina de gas de pequeño tamaño. Debido a su tamaño son especialmente aconsejables para el suministro de energía descentralizada y en instalaciones remotas e independientes.



Figura 16. Sistema de concentración solar de disco parabólico [37].

CAPITULO 4. DESARROLLO DEL DISEÑO DE UN SISTEMA SOLAR HÍBRIDO FOTOVOLTAICO TÉRMICO (PVT).

En este capítulo se describen los parámetros y condiciones necesarios para el diseño de un nuevo módulo PVT, que cumpla principalmente con el objetivo de extraer el calor de las celdas solares que afectan su rendimiento y transferirlo a un fluido de trabajo para su posterior aprovechamiento. Esto quiere decir que se ha buscado la manera de disminuir la temperatura de trabajo a la que opera el sistema fotovoltaico, siendo un extra la ganancia y eficiencia del sistema térmico.

4.1 Antecedentes.

Partimos de un modelo con el que se trabajó previamente (Figura 17). Este diseño cuenta con una geometría de prisma rectangular, con una entrada y salida en los extremos del cuerpo, con la ausencia de elementos que afecten el flujo; el régimen del fluido es laminar, no deseable para la transferencia de calor. Así también el canal es de un solo sentido, reduciendo el tiempo de interacción de las moléculas del fluido con las paredes.

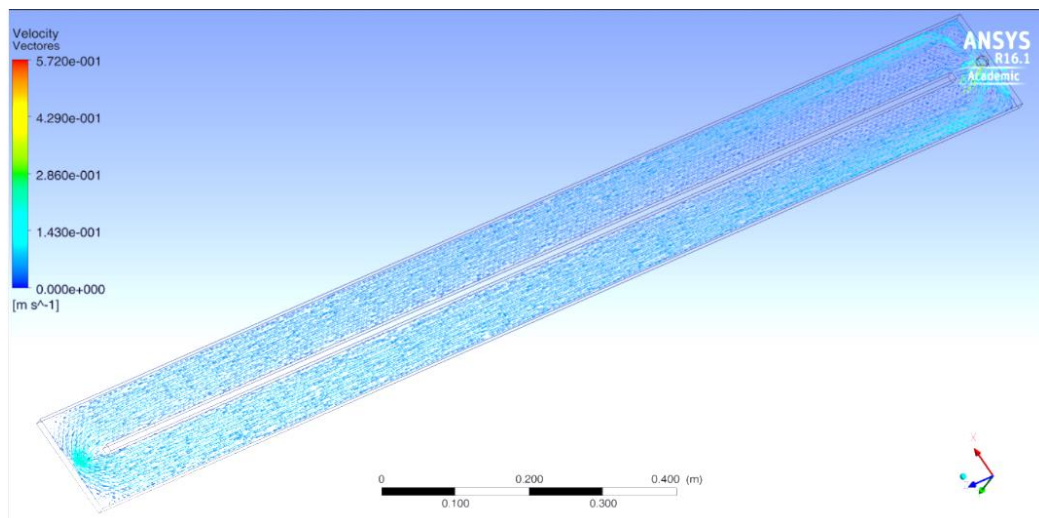


figura 17. Antecedente que sirvió de inspiración para mejor el diseño del sistema solar híbrido.

4.2 Sistema térmico.

De acuerdo con lo antes mencionado, se propone un sistema híbrido de concentración solar.

Mediante un concentrador solar parabólico (no desarrollado en este trabajo), se hará incidir una radiación concentrada estimada de 3000 W/m^2 (Q_{rad_3}) sobre un eje focal, en el cual se encontrarán las celdas solares (especificadas más adelante) montadas en un intercambiador de calor del tipo de placa plana al que le llegará una radiación en la cara opuesta a la concentración solar de 1000 W/m^2 (Q_{rad_1}), mostrado en la figura 18.

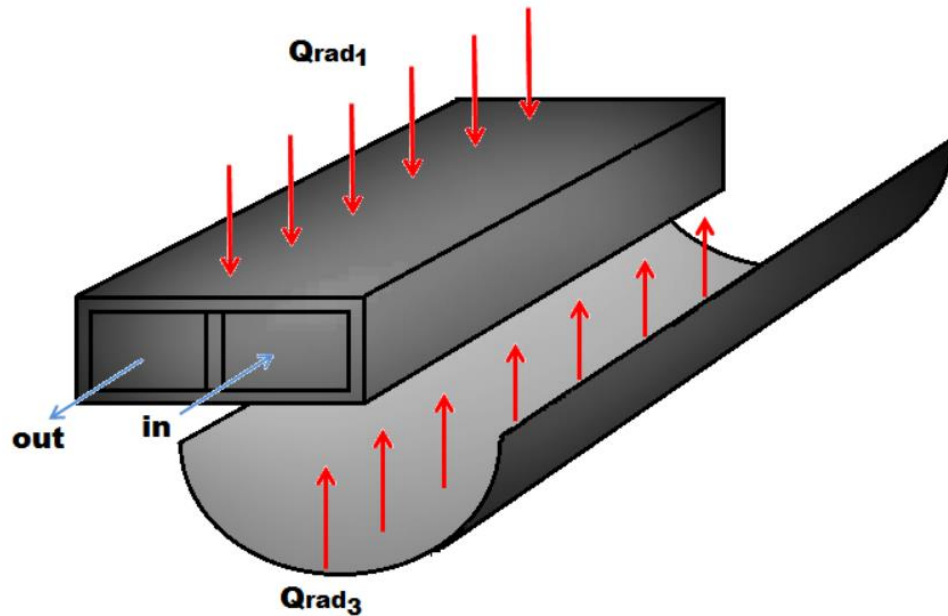


Figura 18. Propuesta de diseño del sistema térmico.

4.2.1 Fluido de trabajo.

Definir el fluido de trabajo es importante cuando se está diseñando un sistema solar híbrido, las dos opciones más comunes en la actualidad son aire y agua. En la tabla 2 se pueden apreciar las ventajas y desventajas de los sistemas híbridos que emplean el aire como fluido de trabajo [38-39].

Tabla 2. Ventajas y desventajas de los sistemas híbridos.

FLUIDO DE TRABAJO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Aire	<p>Sin congelación y sin ebullición del fluido colector.</p> <p>Sin daños si se producen fugas.</p> <p>Uso mínimo de material y bajo costo operativo y de mantenimiento.</p>	<p>Baja capacidad de calor y conductividad térmica, lo que provoca una baja transferencia de calor.</p> <p>Baja densidad, lo que resulta en una gran transferencia de volumen.</p> <p>Altas pérdidas de calor por fugas.</p> <p>Posible ruido.</p> <p>Menos aplicaciones en comparación con los colectores de agua.</p> <p>Velocidad de transferencia de calor relativamente lenta debido a una menor conductividad térmica.</p> <p>Baja capacidad calorífica específica de aire necesitando mayor volumen de aire por unidad de área de recolección.</p>

Un líquido como el agua resulta ser un mejor fluido de trabajo deseable en colectores de sistemas PVT, debido a su alta capacidad de calor y excelentes propiedades. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la operación con líquidos nos hace considerar otros parámetros que afectan el rendimiento de los sistemas híbridos, como lo son: flujo másico, régimen del flujo (laminar o turbulento), velocidad del flujo, temperatura de entrada del agua, longitud de colector entre otros [40]. Aun así, se optó por definir el agua como el fluido encargado de refrigerar el sistema en este proyecto.

4.2.2 Geometría del colector.

Ya que los colectores son los encargados de hacer el intercambio de calor; su geometría es muy importante en los diseños de sistemas híbridos y en sus aplicaciones; por esa razón es que se decidió plantear el diseño partiendo de un colector plano, el cual en su geometría cuenta con:

- Estructura de doble paso: Canal que mejora la transferencia de calor mediante el aumento de la difusividad térmica en el fluido; se prolonga el tiempo de interacción del flujo con el intercambiador, siendo más eficientes que los colectores de un solo paso [41-42].
- Aletas internas: Diferentes investigaciones han mostrado los efectos de aletas internas en los colectores solares, concluyendo que el rendimiento de transferencia de calor se incrementa, e incluso mejorar aún más al disminuir el paso de aletas y aumentando la conductividad térmica del material de estas [43-44].
- Configuración laberinto: Con la finalidad de aumentar el área de contacto del metal con el fluido de trabajo se añaden aletas perpendiculares al flujo, esto se traduce en una mayor transferencia de calor. De igual forma la configuración de dichas aletas permitirá

aumentar la turbulencia del fluido, razón por la cual se escogió la configuración en laberinto [7].

Por lo anterior se propusieron tres geometrías con configuración de aletas internas diferentes; 32, 36 y 40 aletas mostradas en las figuras 19, 20 y 21 respectivamente. Con base en un prisma rectangular de dimensiones (1.9mX0.13mX0.02m).

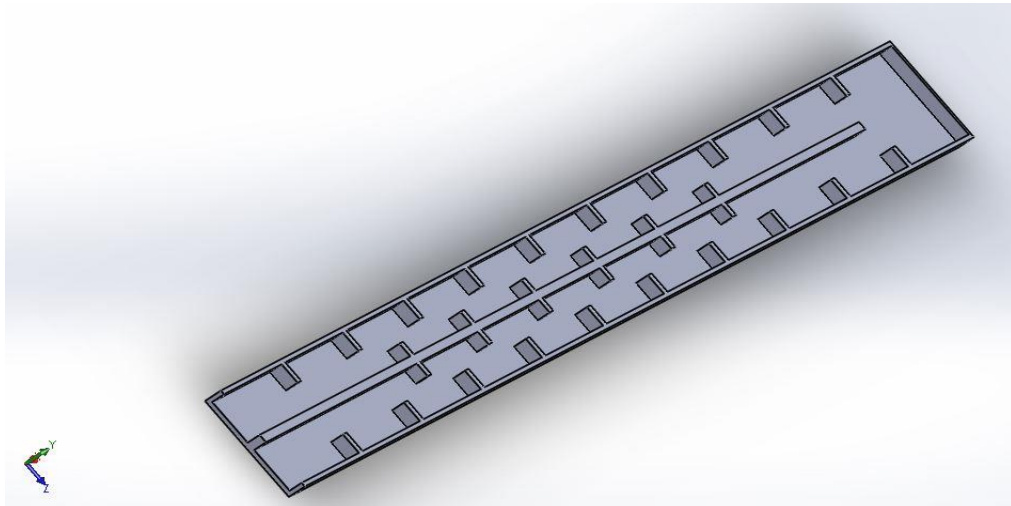


Figura 19. Diseño del colector solar de doble paso con 32 aletas internas.

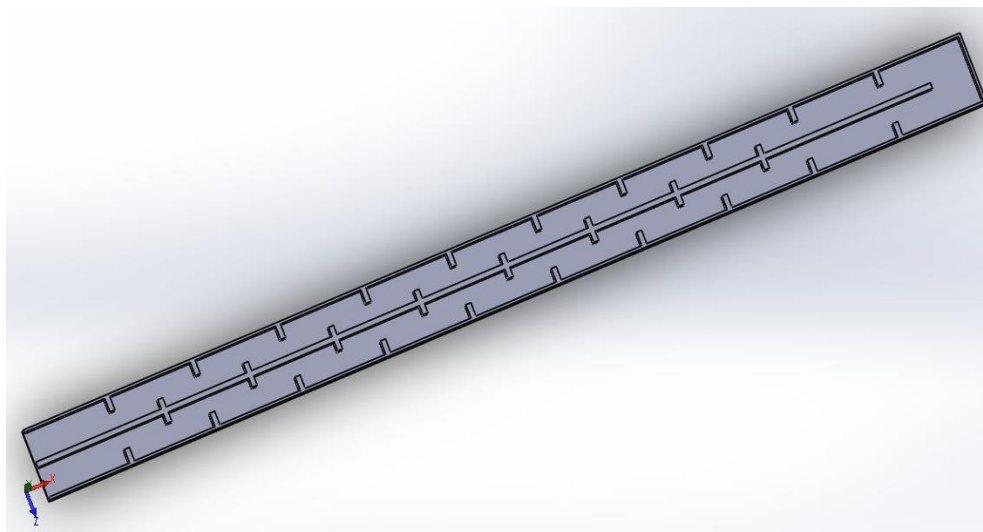


Figura 20. Diseño del colector solar de doble paso con 36 aletas internas.

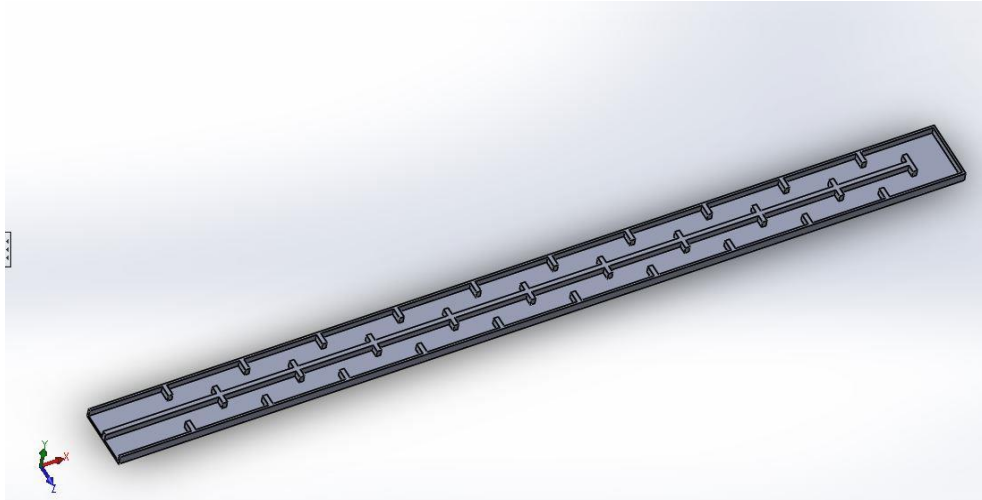


Figura 21. Diseño del colector solar de doble paso con 40 aletas internas.

4.2.3 Tasa de flujo másico.

El caudal másico es uno de los parámetros más importante en el diseño de un sistema PVT. El coeficiente de transferencia de calor por convección es sensible a las variaciones de la tasa de flujo másico. Cuanto mayor sea el coeficiente de transferencia de calor por convección, mayor será la velocidad de transferencia de calor. Esto dará como resultado una mayor eficiencia térmica y eficiencia eléctrica. El tipo de fluido (gas o líquido), la velocidad y la geometría del sistema térmico PVT son los parámetros para controlar la tasa de flujo másico.

En general, a una velocidad de flujo de masa alta, se puede eliminar más calor; dando como resultado una menor temperatura de la placa de absorción. Sin embargo, si el tiempo de residencia del flujo en el canal es demasiado corto debido al aumento de la velocidad, la temperatura de la placa del absorbedor podría no reducirse linealmente tanto como se espera. Para las simulaciones se establecieron flujos másicos que van desde 0.1 hasta 3 kg/s.

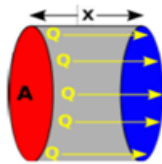
4.2.4 Selección de material.

El aluminio es un elemento muy abundante en la naturaleza, metal ligero, con una densidad de 2700 kg/m³, y con un bajo punto de fusión (660 °C). Su color es grisáceo y refleja la radiación electromagnética del espectro visible y el térmico. Es buen conductor eléctrico (entre 35 y 38 m/ (Ω mm²) y térmico (80 a 230 W/m K), además de ser muy maleable, lo que le permite adaptarse a las necesidades del diseño aunado a su buena conductividad térmica lo hacen el material más adecuado para el modelo propuesto.

4.2.5 Modelo físico del sistema térmico.

El modelo propuesto en este trabajo analiza el fenómeno físico de la transferencia de calor. Transferencia que se da del colector solar al fluido de trabajo (en este caso agua). Es importante mencionar que de los tres mecanismos de transferencia de calor conducción, convección y radiación, este último es despreciado ya que se considera que los valores que puede alcanzar son insignificantes con relación a los otros dos mecanismos.

La conducción es el mecanismo de transferencia de calor en escala atómica. Se produce por el choque de unas moléculas con otras, donde las partículas más energéticas le entregan energía a las menos energéticas, produciendo un flujo de calor desde las temperaturas más altas a las más bajas, expresado en la ecuación 11.



$$Q_{cond} = \frac{kA\Delta T}{\Delta x} \quad (11)$$

Donde:

k = constante de conductividad térmica del material [W/m°C]

A =área de la superficie [m²]

ΔT = Diferencia de temperatura en la superficie

Δx = espesor del material.

Por su parte la convección es el mecanismo de transferencia de calor entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacentes que están en movimiento, descrita por la ecuación 12.

$$Q_{conv} = hA(T_s - T_a) \quad (12)$$

Donde:

h = coeficiente de transferencia de calor por convección [W/m °C]

A = área de la superficie [m²]

T_s = Temperatura de la superficie [°C]

T_a = Temperatura del fluido [°C]

Finalmente, la ecuación que describe el fenómeno de transferencia de calor en el colector solar queda descrita por la ecuación 13 y sustituyendo las variables que se muestran en la figura 22. Se obtiene la ecuación 14.

$$Q_{rad3} + Q_{rad1} = Q_{conv3} + Q_{conv1} + Q_{cond3} + Q_{cond1} + Q_{liq} \quad (13)$$

$$3000 \frac{W}{m^2} + 1000 \frac{W}{m^2} =$$

$$h_3(T_{eq3} - T_3) + h_1(T_{eq1} - T_1) + K_3 \frac{(T_{eq3} - T_b)}{x_3} + K_1 \frac{(T_{eq1} - T_a)}{x_1} + mC_p \Delta T \quad (14)$$

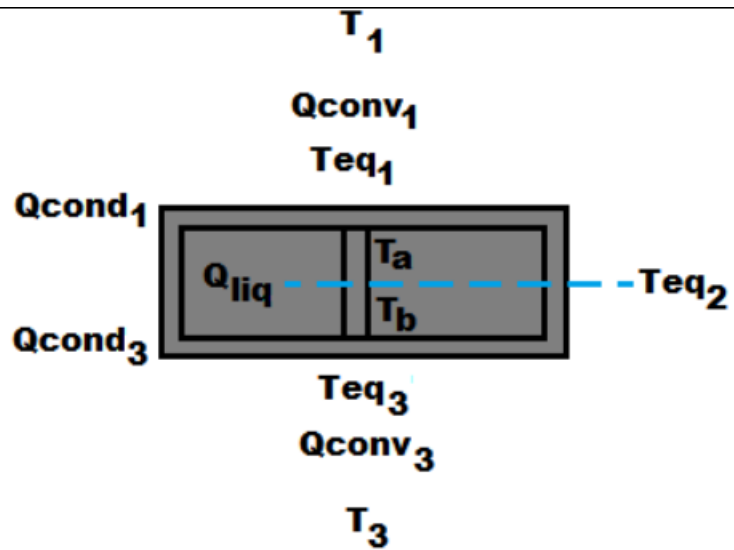


Figura 22. Perfil del sistema térmico y las variables que involucra.

4.3 Sistema eléctrico.

La elección de una celda solar adecuada para un sistema solar híbrido PVT es de suma importancia. Con la llegada de películas delgadas de GaAs para aplicaciones espaciales su eficiencia supera a las celdas tradicionales de silicio cristalino, como lo muestra la figura 23.

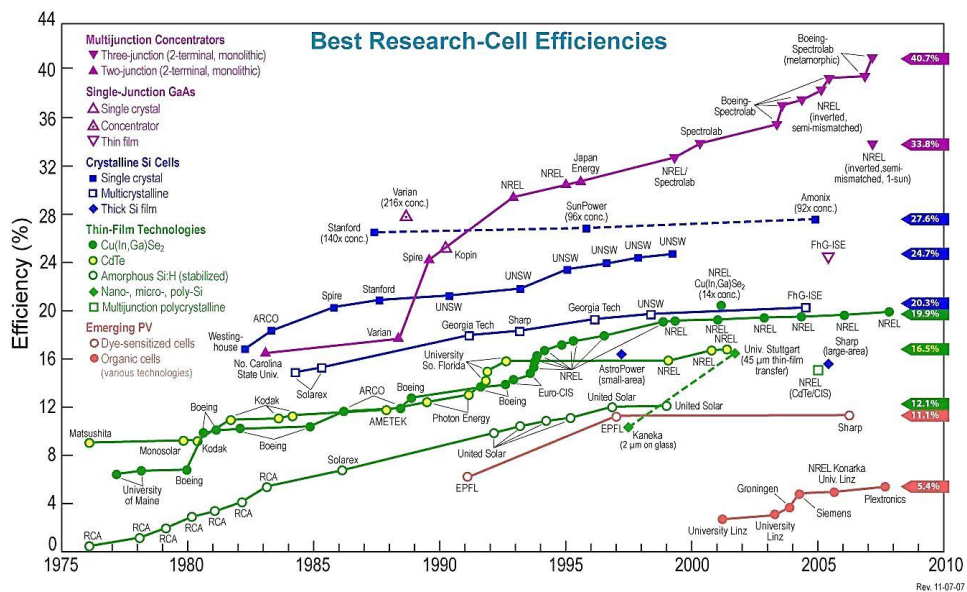


Figura 23. Eficiencia de las diferentes tecnologías de celdas [45].

El surgimiento de la tercera generación de celdas solares de múltiple juntura o capa, se convierten en la mejor opción para el desarrollo del proyecto, no solo por su alta eficiencia que llega hasta el 40%, sino también por su aplicación de luz concentrada y resistencia a altas temperaturas.

Por lo antes mencionado, se optó por trabajar con una celda Spectrolab (figura 24) de triple juntura con sustrato de Germanio (Ge), GaInP (1.82 eV), GaInAs (1.33 eV), Ge (0.66 eV).

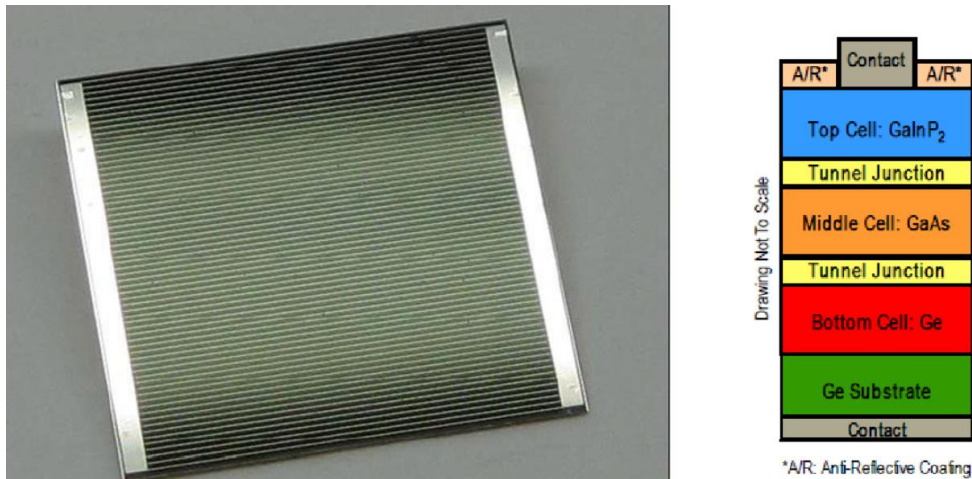


Figura 24. Apariencia y constitución de una celda solar de triple juntura de sustrato de Germanio [46].

También cuenta con las siguientes características, apreciables en la figura 25.

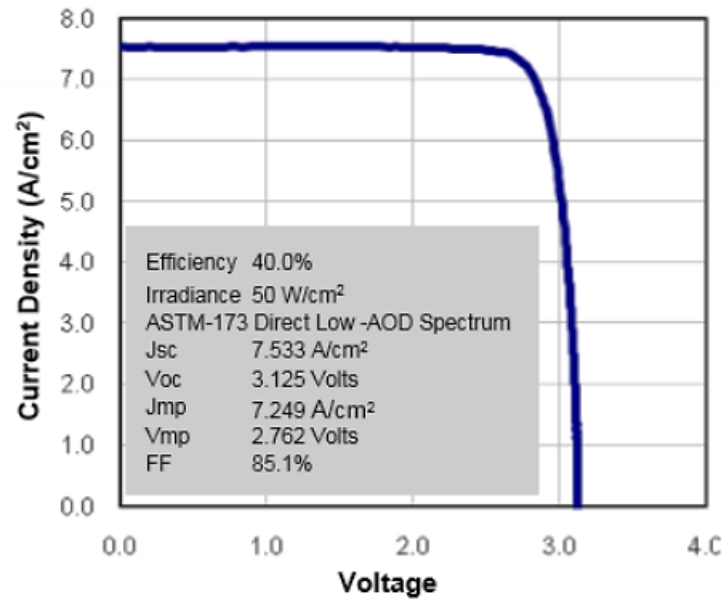


Figura 25. Curva característica corriente-voltaje (I-V) de la celda de triple junta [46].

4.3.1 Eficiencia eléctrica.

Mediante la **ecuación** (3) descrita en la sección 2.2.4, es posible calcular la eficiencia de la celda solar de triple junta, aunque es necesario tomar en cuenta el coeficiente de la temperatura, proporcionado por el fabricante de 0.06%/°C, es decir, que la eficiencia disminuye un 0.06% por cada °C que aumenta la temperatura de la celda.

4.4 Sistema híbrido.

Con el fin de reducir la caída de la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos, por el aumento de la temperatura y aprovechar el calor residual, surgen los sistemas solares híbridos fotovoltaicos térmicos (PVT). Siendo muchos los estudios realizados que demuestran como los sistemas solares híbridos PVT

pueden conseguir un incremento de la eficiencia de conversión de energía, con costos beneficios [47-48].

4.4.1 Eficiencia del sistema híbrido.

La eficiencia del sistema híbrido es la suma de la eficiencia de las celdas fotovoltaicas y el intercambiador de calor, es decir, la suma de la eficiencia térmica y la eléctrica.

$$\eta_o = \eta_E + \eta_T \quad (15)$$

CAPITULO 5. RESULTADOS Y ANALISIS.

5.1. SolidWorks

Una vez establecido el diseño del intercambiador de calor y sus tres diferentes configuraciones (32, 36 y 40 aletas internas); se pasó a construir virtualmente los dispositivos con ayuda de SolidWorks, el cual es un software CAD (diseño asistido por computadora) para modelado mecánico en 2D y 3D [49].

5.2 ANSYS

ANSYS es un ecosistema de programas CAE (Ingeniería Asistida por Computadora) para diseño, análisis y simulación de partes por elementos finitos, incluye las fases de preparación de *meshing* ó mallado, ejecución y post proceso; el programa ejecuta análisis de piezas sometidas a fenómenos físicos comunes en ingeniería y diseño mecánico, puede resolver problemas relacionados a esfuerzos térmicos, esfuerzos mecánicos, análisis de fluidos, vibración, etc [50].

El proceso se divide en tres etapas:

- Preprocesamiento (ICEM CFD).
- Procesamiento (Fluent).
- Post Procesamiento (CFD-Post).

5.2.1 ANSYS Workbench

ANSYS Workbench es una plataforma de software desde donde se crean los proyectos de análisis CAE en diferentes disciplinas, Workbench incluye software y componentes para diferentes fenómenos [50].

Apoyados del módulo de análisis térmico del ANSYS Workbench y en ausencia del fluido refrigerante, se realizó una simulación estableciendo un flujo de calor constante en la cara superior del dispositivo de 3000 W/m^2 y de 1000 W/m^2 en la superficie inferior como se aprecia en la figura 26.

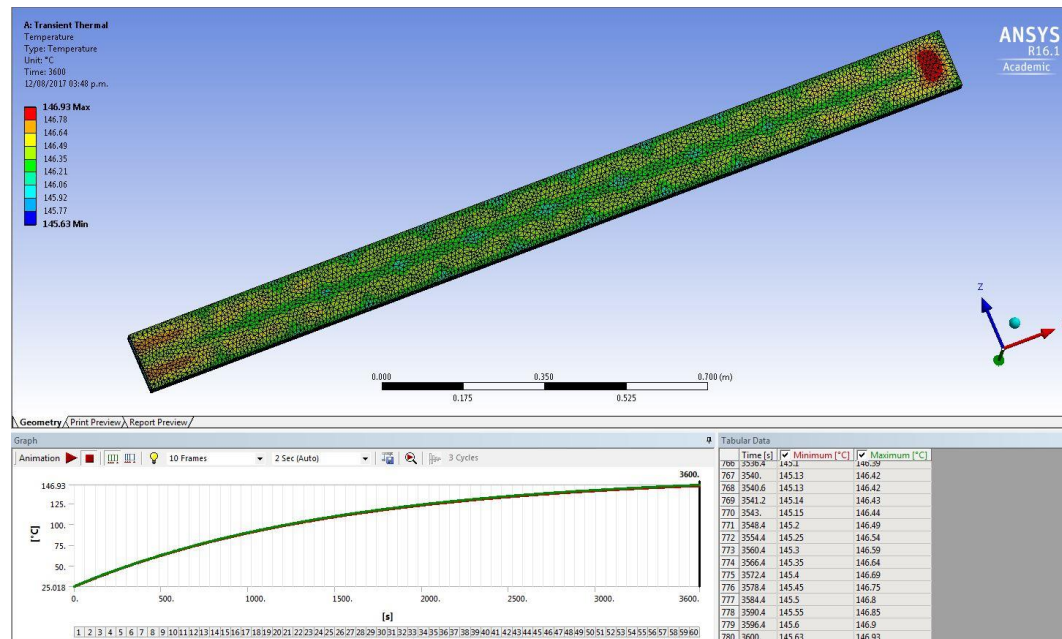


Figura 26. Simulación en ANSYS Workbench.

Se registró una temperatura después de 1 hora de incidencia de 147°C , tomando en cuenta la convección natural del aire $20 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, lo que permitió establecer la temperatura a la que se iba a simular el dispositivo con la presencia de fluido.

5.2.2 Preprocesamiento.

La etapa de preprocesamiento fue desarrollada en el paquete de software incluido en ANSYS ICEM-CFD; el cual permite construir la geometría que se desea estudiar, sin embargo, no fue necesario construir la geometría en ICEM, ya que fue importada de SolidWorks.

Una vez importada la geometría se generó la malla, es decir, se realizó una aproximación discreta del modelo sobre la base de puntos o nodos. Estos nodos se conectan para formar elementos finitos que juntos forman el volumen del material. El mallado fue no estructurado y constó de 390000-406000 elementos como aparece en la imagen 27.

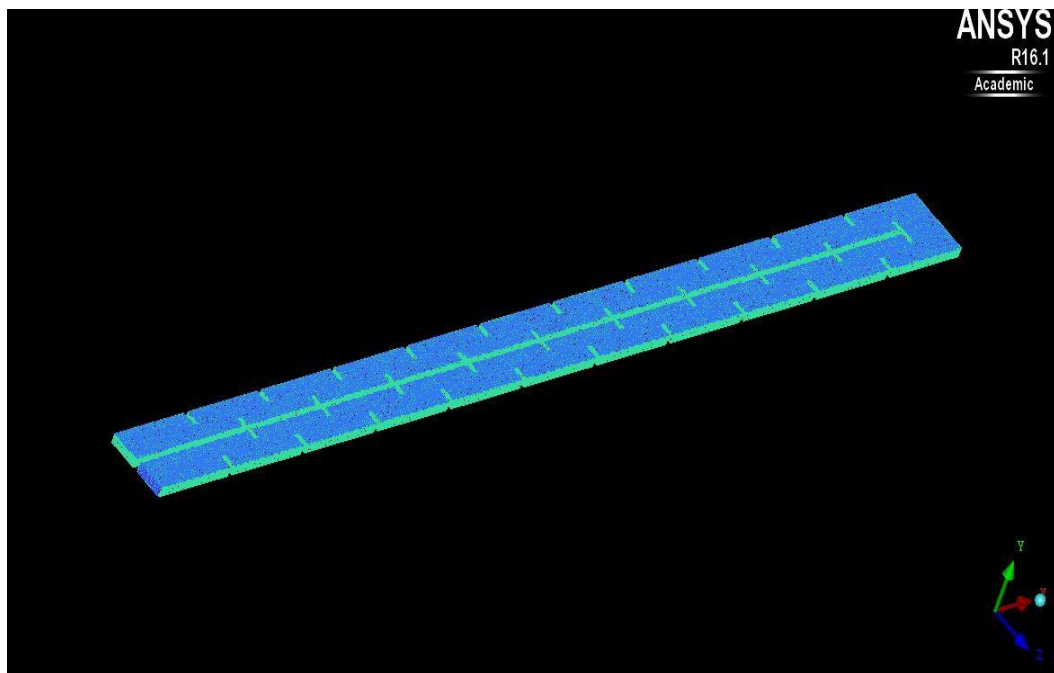


Figura 27. Ejemplo de mallado del intercambiador de calor (disipador) con configuración interna de 40 aletas.

5.2.3 Procesamiento.

El procesamiento se llevó a cabo por medio del software ANSYS FLUENT. Contiene amplias capacidades de modelado físico necesarias para modelar flujo, turbulencia, transferencia de calor y reacciones para diversas aplicaciones.

En esta etapa se especificó el material del dispositivo (aluminio), así como todas sus propiedades intrínsecas. De igual manera se establecieron las entradas, salidas y las condiciones iniciales para la corrida de la simulación. Se indicó agua como fluido de trabajo a 25 °C y con flujos que iban de los 0.03 hasta los 3.5 kg/s; la temperatura inicial de 150°C a la que se encontraba el dispositivo antes de hacer circular el fluido a través de él. Y los modelos de conservación de la energía, transferencia de calor y turbulencia estándar k-epsilon.

Puesta en marcha cada una de las simulaciones correspondientes a cada uno de los diferentes flujos establecidos se observó que el error de convergencia de las ecuaciones era menor al 1%, parámetro bastante aceptable.

5.2.4 Post procesamiento.

Las simulaciones de CFD (Mecánica de Fluidos Computacional) no terminan con la solución de las ecuaciones procesadas; se requiere un procesamiento posterior que brinde a los usuarios una visión completa de los resultados de la simulación, es por eso por lo que ANSYS CFD-Post, es el post procesador común para todas las interpretaciones de la dinámica de fluidos de ANSYS y brinda a los usuarios todo lo que necesitan para visualizar y analizar sus resultados.

Dentro de una interfaz de usuario intuitiva ANSYS CFD-Post genera imágenes para ilustrar el flujo en cualquier nivel de detalle deseado. Desde trazados vectoriales y líneas de corriente hasta núcleos de vórtices y animaciones de flujo. ANSYS CFD-Post proporciona a los usuarios todas las herramientas que

necesitan para producir visualizaciones de sus resultados, como es posible apreciar en la figura 28.

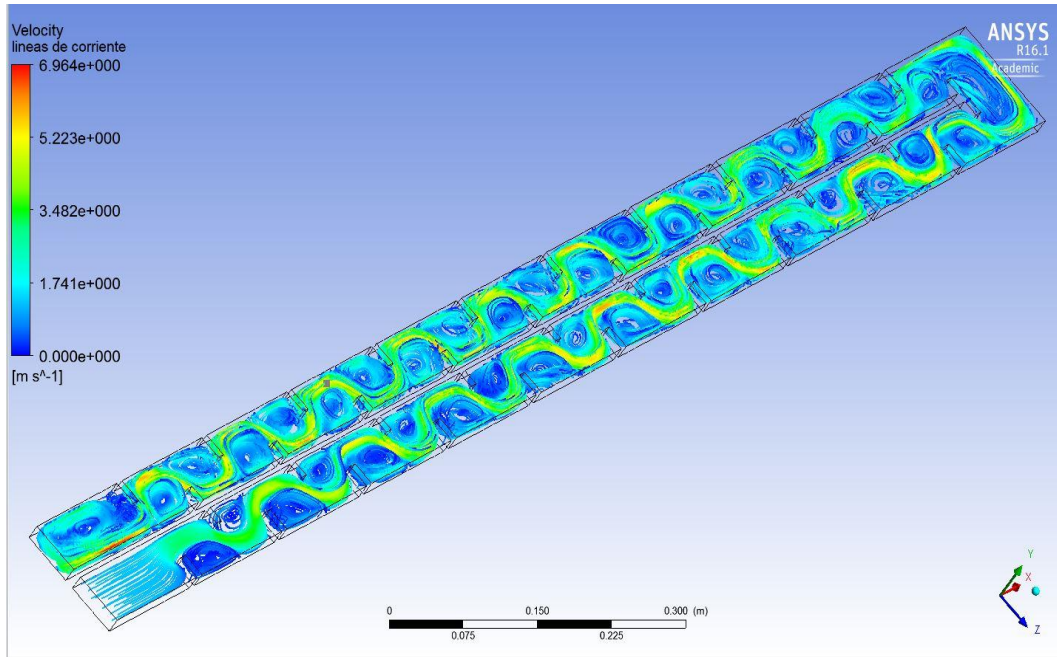


Figura 28. Visualización de las líneas de corriente en el post procesado en CFD post.

Para esta última etapa de la simulación se lograron procesar los resultados y obtener imágenes de las líneas de corrientes, perfiles de temperatura del agua y de las paredes del dispositivo, la velocidad del fluido, entre otros resultados que se presentarán en el siguiente capítulo.

5.2.5 Interpretación De Resultados

Está claro que el uso de simulaciones por computadora son una herramienta poderosa que nos brinda una aproximación a los fenómenos reales, sin embargo, hablamos de una combinación de diversos parámetros, que en este momento son establecidos y normalizados en el programa. El simulador no se equivoca, por lo cual al momento de interpretar los resultados podemos encontrar escenarios donde se observen situaciones con un error considerable y/o que sobrepasan el modelo teórico.

Se realizaron diversas simulaciones de cada una de las geometrías para obtener no solo los mejores resultados, si no aquellos apegados a la realidad y al análisis teórico. Así también se considera una temperatura ambiente de 30°C con un coeficiente de transferencia de calor por convección de 15 w/m²°C que solamente afecta la tapa y la base del dispositivo, ya que hemos considerado mantener las paredes sin interacción con el medio, es decir, adiabáticas. Una temperatura inicial del dispositivo antes de hacer circular agua de 150°C resultado de la incidencia de un nivel de radiación de 3000 W/m².

5.2.6 Flujo Turbulento

Para la transferencia de calor en los fluidos es deseable un flujo turbulento, puesto que, mientras más movimiento exista entre las moléculas, mayor será el intercambio de calor. Razón por la cual se decidió colocar aletas internas dentro de la geometría del intercambiador de calor. Diferentes combinaciones nos arrojaron tres propuestas, 32, 36 y 40 aletas internas.

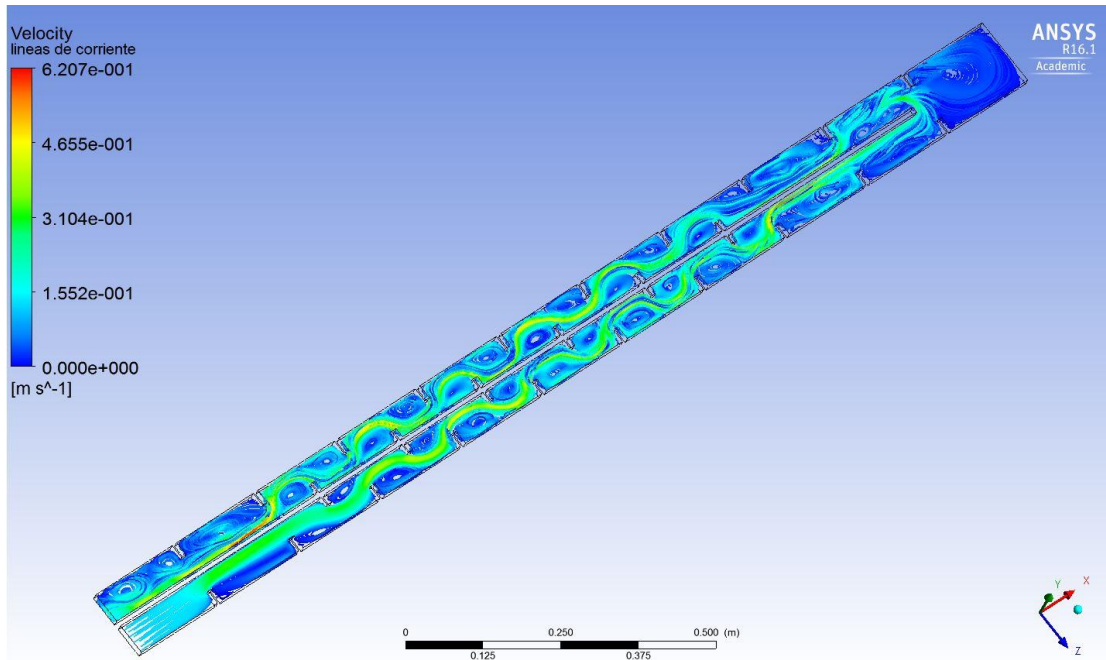


Figura 29. Flujo Turbulento en geometría de 32 aletas.

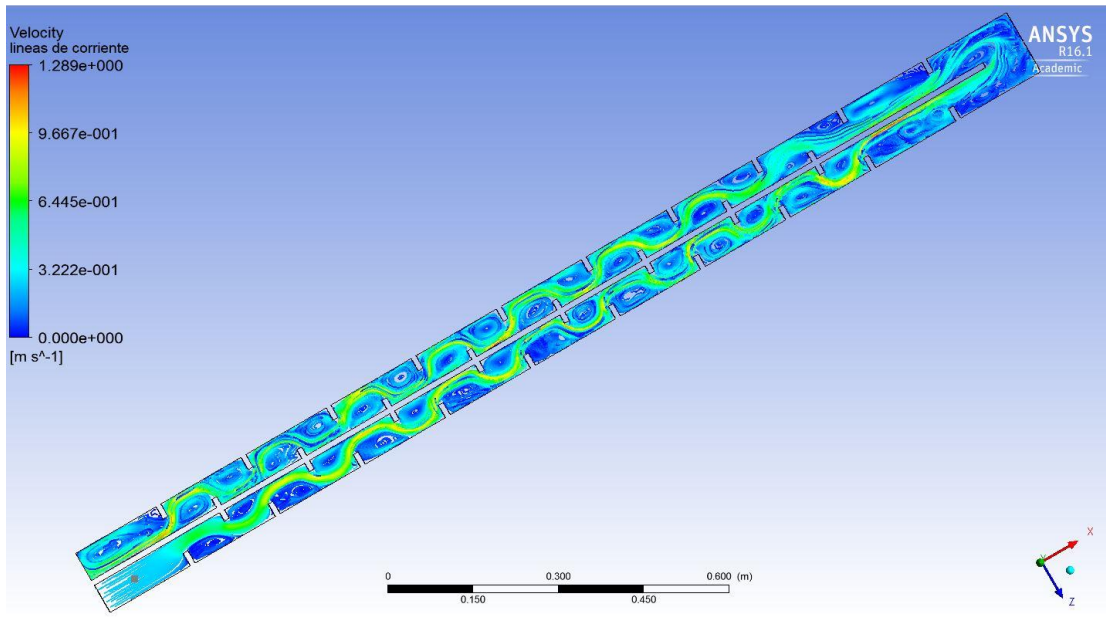


Figura 30. Flujo Turbulento en geometría de 36 aletas.

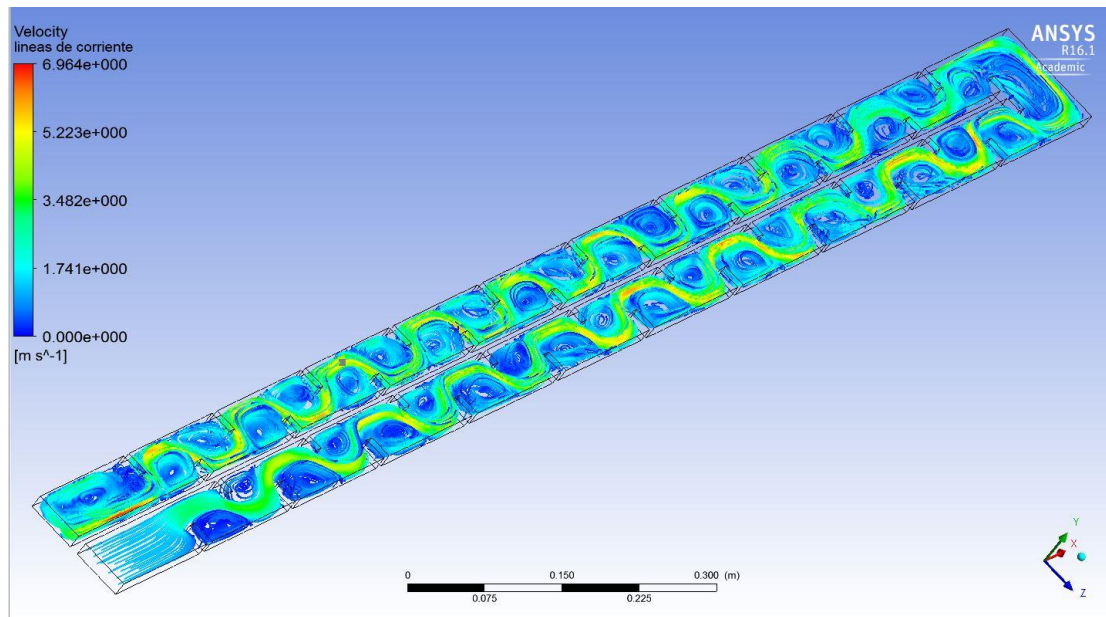


Figura 31. Flujo turbulento en geometría de 40 aletas.

Podemos observar que en las tres geometrías se produce un flujo turbulento, pero en el modelo de 40 aletas la interacción entre las moléculas es mucho mayor. Si bien las áreas de color azul son zonas de estancamiento, propician un favorable intercambio de calor en el agua, además de que al contar con más aletas se incrementa el área de contacto entre el sólido y el fluido mejorando la transferencia de calor.

5.2.7 Análisis Térmico.

Es importante recordar el enfoque de esta investigación para poder hacer el análisis térmico, el objetivo es poder disminuir la temperatura de trabajo del dispositivo sobre el cual van montadas las celdas fotovoltaicas de luz concentrada. Para lo cual se transfiere el calor del dispositivo al agua, siendo el agua calentada un beneficio extra, pero no el objetivo.

Se hizo circular agua a 25°C variando el flujo masico de 1 a 3 hasta 3 kg/s. La temperatura promedio del dispositivo con las tres diferentes geometrías se observa en la siguiente grafica.

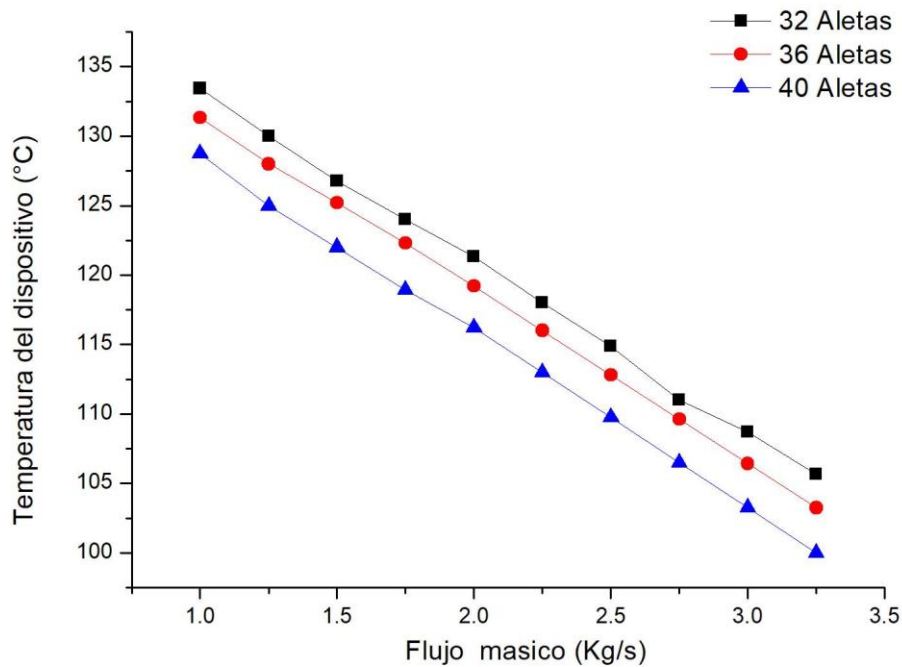


Figura 32. Grafica de temperatura del dispositivo promedio para diferentes flujos masicos y geometrías internas.

Para la variación de flujo masico de 0.1 a 1 kg/s se observa que la temperatura del dispositivo no disminuye de manera significativa, en gran parte debido a que el fluido permanece más tiempo dentro del intercambiador, ganando mucho calor, y disminuyendo la diferencia de temperatura entre el sólido y el fluido.

Las imágenes obtenidas de la simulación confirman como la temperatura en el dispositivo es menor con la geometría de 40 aletas internas, que, en los otros dos modelos propuestos, sin embargo, aun podemos encontrar zonas con temperaturas elevadas, sobre todo a la salida, en gran parte debido a que el fluido al salir ya ha ganado suficiente calor.

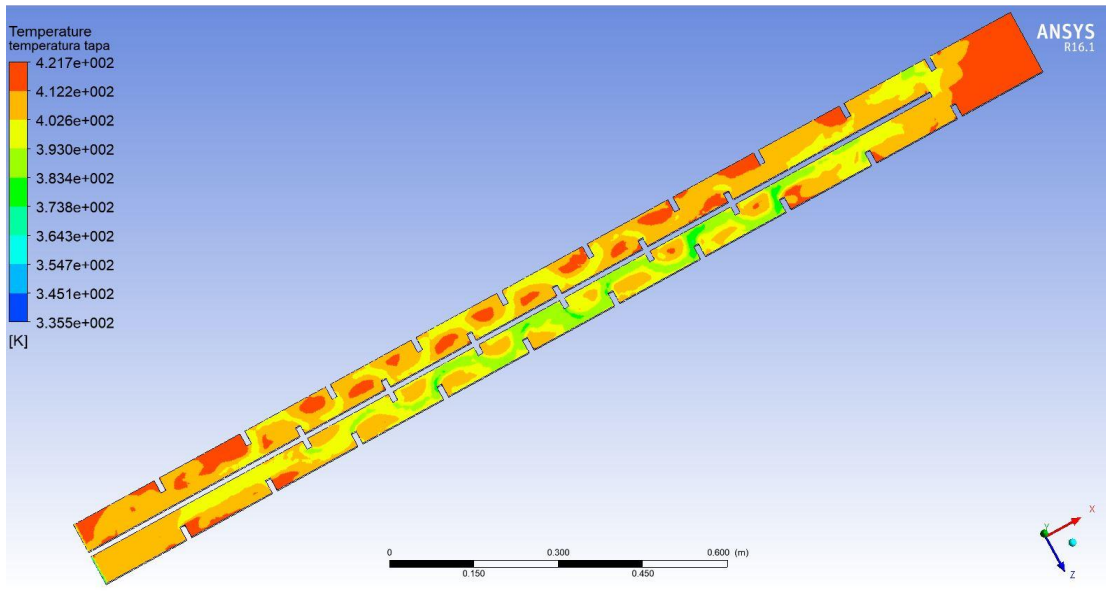


Figura 33. Temperatura del dispositivo con geometría de 32 aletas internas.

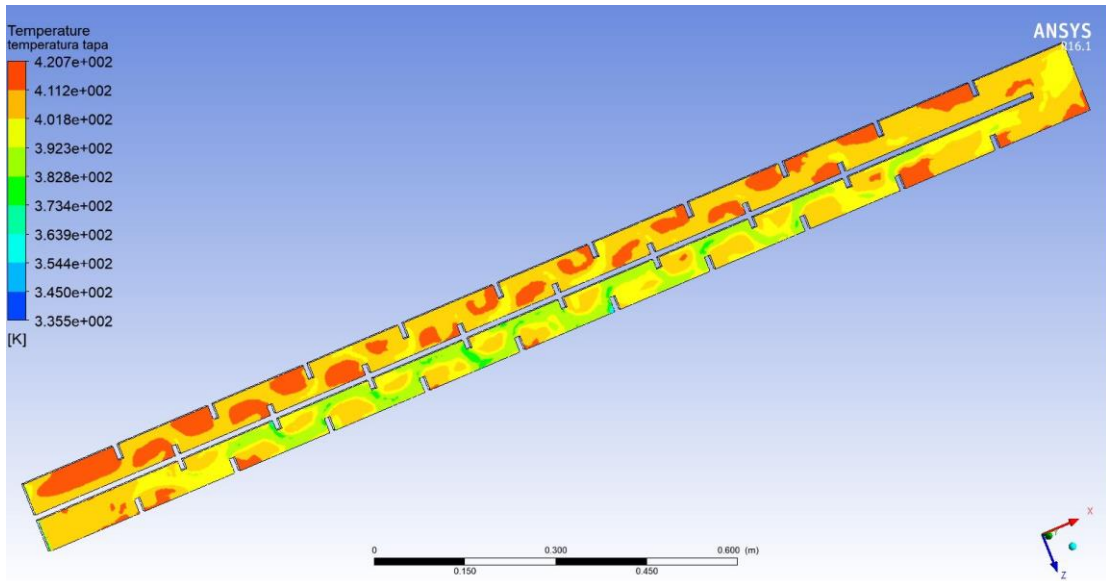


Figura 34. Temperatura del dispositivo con geometría de 36 aletas internas.

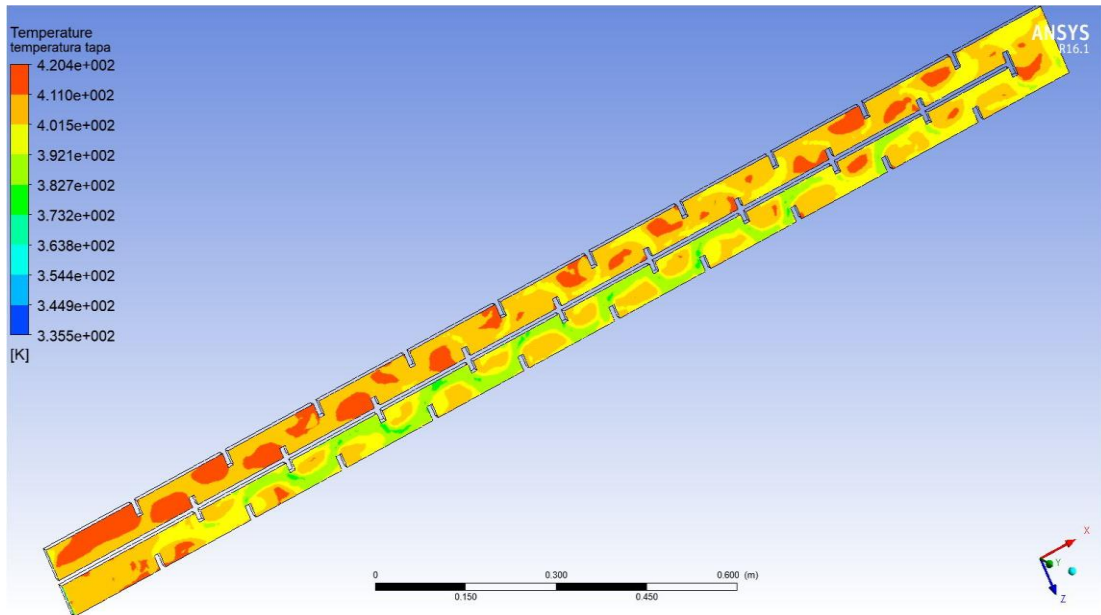


Figura 35. Temperatura del dispositivo con geometría de 40 aletas internas.

Para el caso de la temperatura de salida del agua se obtuvieron los siguientes resultados.

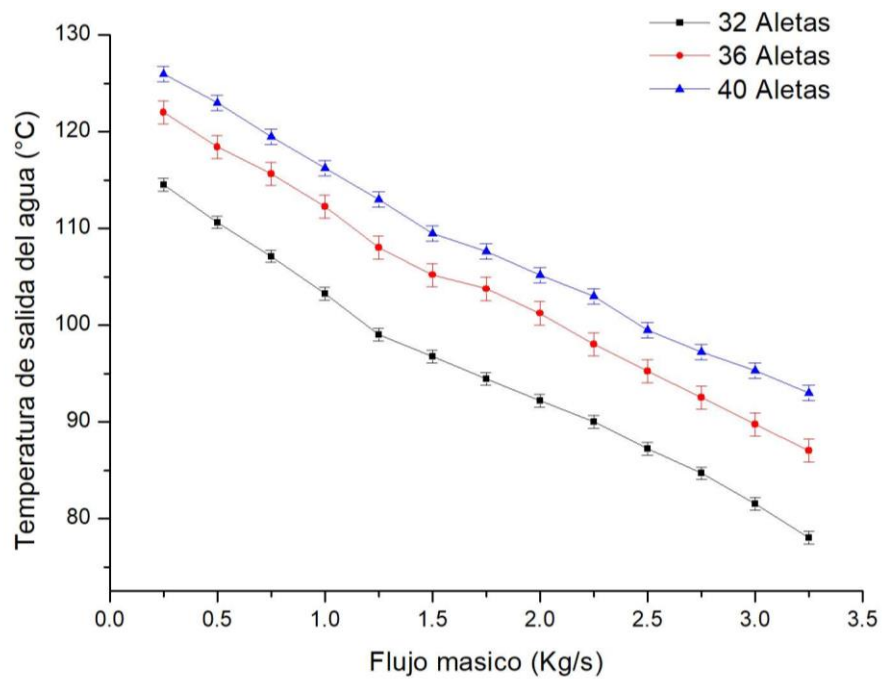


Figura 36. Temperatura de salida del agua para diferentes flujos masicos y geometrias internas.

Una vez más la geometría de 40 aletas internas mostró mejor temperatura de salida del agua en comparación a las otras dos, debido a tener mayor superficie para transferir el calor del sólido al líquido y generar más turbulencia, lo que propicia mejor interacción entre las moléculas del fluido, mejorando la transferencia de calor.

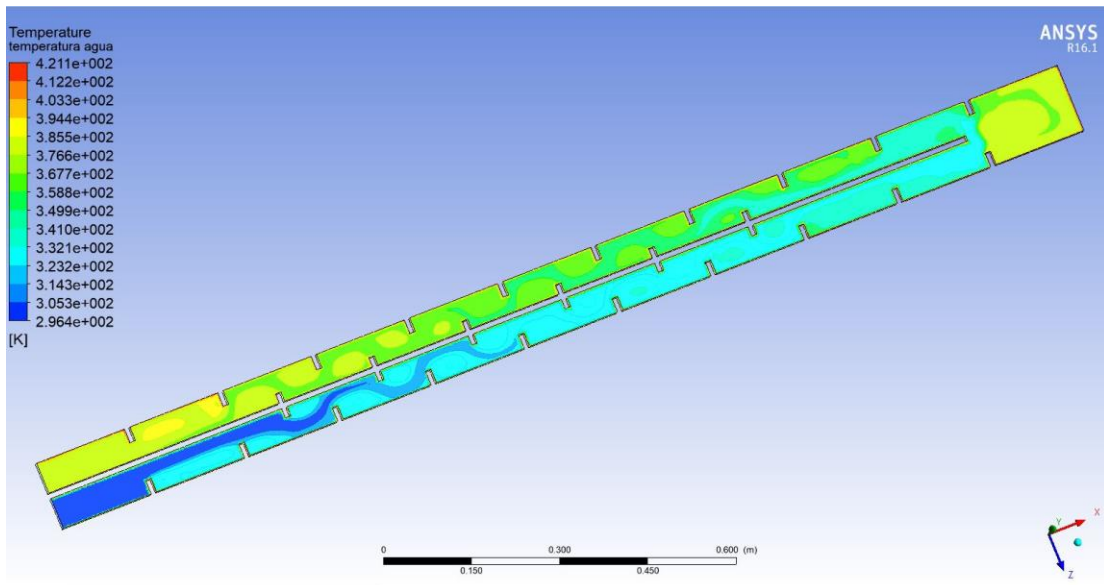


Figura 37. Temperatura de salida del agua con geometría de 32 aletas internas.

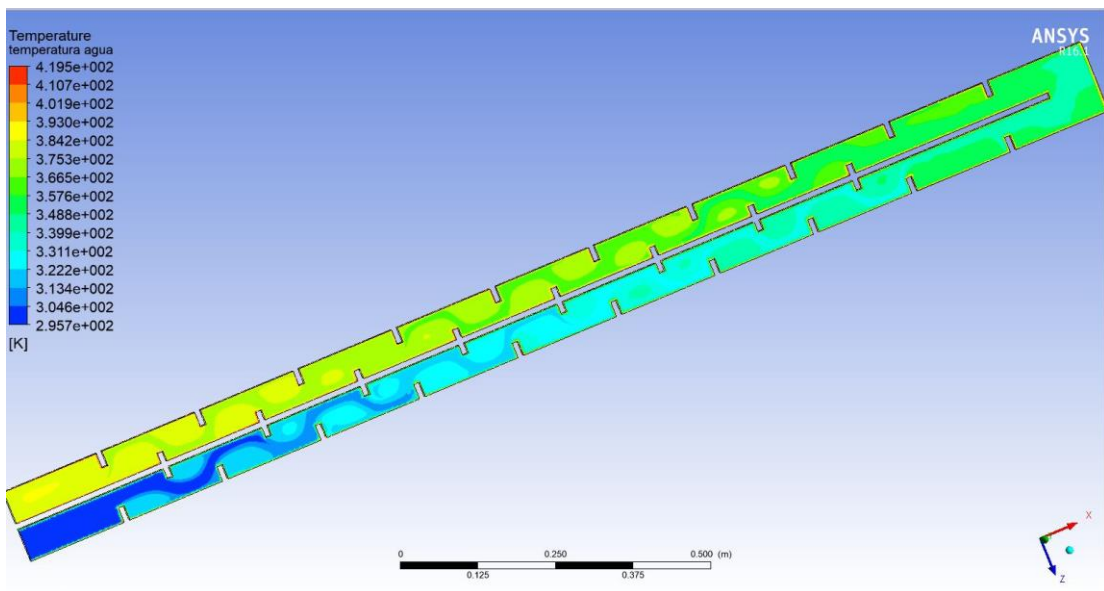


Figura 38. Temperatura de salida del agua con geometría de 36 aletas internas.

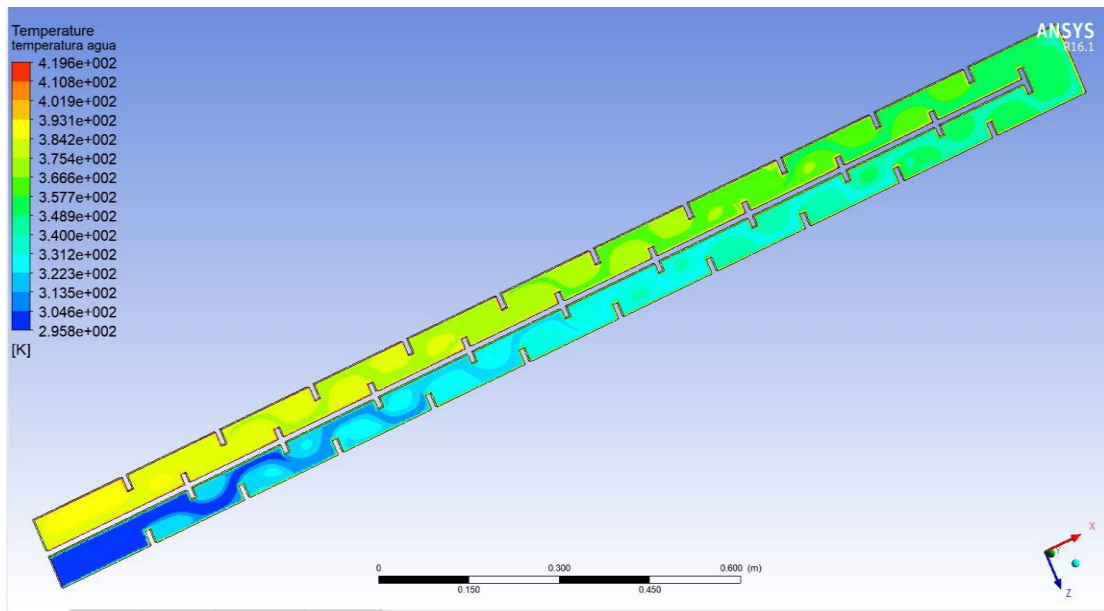


Figura 39. Temperatura de salida del agua con geometría de 40 aletas internas.

Las imágenes obtenidas de la simulación nos permiten observar como el agua va aumentando su temperatura a lo largo de todo su recorrido interno en el intercambiador de calor. Y aunque la escala de colores no permite observar una gran diferencia entre un modelo y otro, la grafica con los valores promedio de salida de temperatura del agua nos ofrecen una diferencia notable.

5.2.8 Eficiencia térmica

La eficiencia térmica del sistema se define como

$$\eta T = \frac{Q_{h20}}{Q_{in}} = \frac{mC_p\Delta T}{Q_{in}}$$

Donde:

Q_{h20}: Calor ganado por el agua

Q_{in}: Calor de entrada del sistema

m: Flujo masico

C_p: Calor especifico del agua

ΔT: Diferencia de temperatura del agua de entrada y de salida

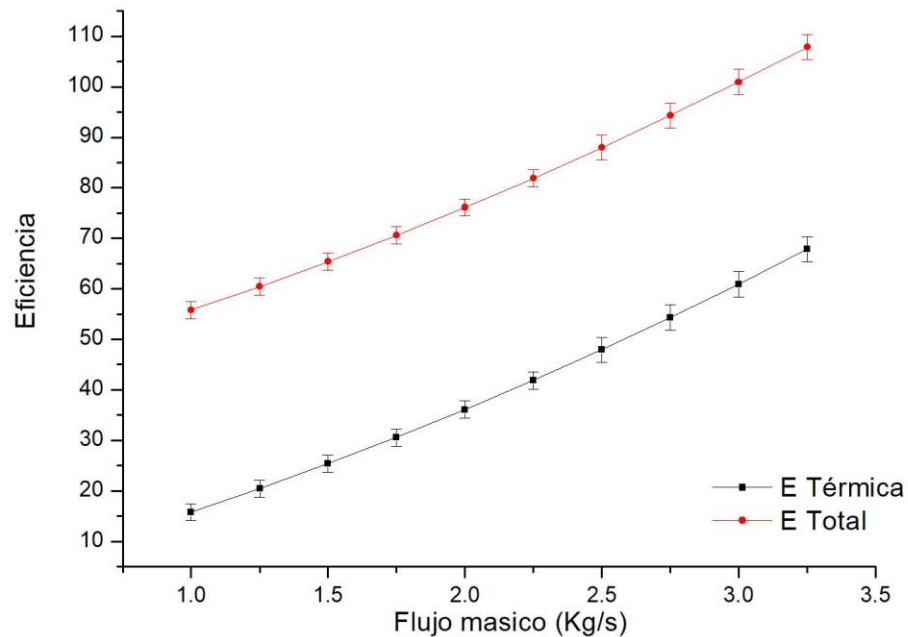


Figura 40. Grafica de eficiencia para diferentes flujos masicos.

En la gráfica anterior utilizamos los datos de la geometría de 40 aletas para obtener la eficiencia térmica. Donde el único parámetro que podemos modificar es el flujo masico, ya que el Cp es un valor constante y el delta de temperatura depende de la simulación del programa. Mientras más grande es el flujo mayor aumenta la eficiencia, sin embargo, a partir de 3 kg/s la eficiencia global del sistema puede sobrepasar el 100%. Recordando que la eficiencia global se obtiene como:

$$\eta_o = \eta_E + \eta_T$$

5.2.6.1 Eficiencia Eléctrica

Es posible calcular la eficiencia de la celda solar de triple junto, aunque es necesario tomar en cuenta el coeficiente de la temperatura, proporcionado por el fabricante de $0.06\%/^{\circ}\text{C}$, es decir, que la eficiencia disminuye un 0.06% por cada $^{\circ}\text{C}$ que aumenta la temperatura de la celda. Y la temperatura máxima de funcionamiento es de 110°C . con un flujo de 1 kg/s se registra una temperatura promedio en el dispositivo de 130°C con lo cual la celda solo pierde 2% de eficiencia, después de 2 kg/s la temperatura del dispositivo llega a 110°C o menos en promedio, dejándola en valores aceptables de acuerdo con la hoja técnica de la celda de luz concentrada.

5.2.9 Error

El modelo resulta con un error promedio de 16% , cuando el delta de temperatura del agua está en el rango de $21 - 15^{\circ}\text{C}$ siendo el rendimiento térmico sobreestimado con la mayor desviación a altas temperaturas de operación.

Se observó que para temperaturas menores a 60°C de delta de temperatura el error disminuye un a 7% , se puede atribuir a que las pérdidas de calor subestimen en el modelo. Cabe señalar que el modelo asume un contacto térmico perfecto entre los componentes, esto podría explicar la sobreestimación del rendimiento térmico.

CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- De las tres geometrías propuestas la de 40 aletas internas presento mejor rendimiento, la temperatura del dispositivo fue la más baja y la temperatura de salida del agua la más alta.
- A medida que el flujo aumenta, la temperatura del dispositivo disminuye.
- En contraparte, la temperatura de salida del agua es menor cuando el flujo es grande.
- Es posible mantener la temperatura de operación de las celdas de luz concentrada en valores iguales o menores a 110°C con flujos masicos mayores a 2 kg/s.

Recomendaciones

- Construir el modelo propuesto para comparar los datos obtenidos de manera experimental con los valores simulados.
- Hacer una simulación en estado transitorio.
- Calcular la parábola que permita alcanzar la concentración solar
- Calcular la afectación por la sombra producto de las dimensiones del dispositivo.

REFERENCIAS

- [1] W. Shockley, H.J. Queisser, Detailed balance limit of efficiency of P–N junction solar cells, *J. Appl. Phys.* 32 (1961) 510–519.
- [2] S. Odeh, M. Behnia, Improving photovoltaic module efficiency using water cooling, *Heat Transfer Eng.* 30 (2009) 499–505.
- [3] D.J. Yang, Z. F. Yuan, P. H. Lee, and H. M. Yin, Simulation and experimental validation of heat transfer in a novel hybrid solar panel, *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 55 (2012) 1076-1082.
- [4] E. Collado, Los efectos de la temperatura en la producción de las instalaciones fotovoltaicas, *ENERGIAS RENOVABLES, El periodismo de las energía limpias.* Publicado: 13 de julio de 2015
- [5] International Energy Agency, *World Energy Balances, Edition of World Energy Statistics*, 2017.
- [6] SENER, Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN), 2016-2030.
- [7] Robert P. Collins and Ernesto Gutierrez-Miravete, Mathematical Model of a Hybrid Solar Panel, *ASME Digital Collection* 37259 (2014), 4-9. Urq
- [8] National Instrument. Part II. Photovoltaic Cell I-V Characterization Theory and LabVIEW Analysis Code. Publish date may 10, 2012.
- [9] Jäger, Klaus, Isabella, Smets, Swaaij, Zeman, *Solar Energy. Fundamentals, Technology, and Systems*, Delft University of Technology, 2014 LB
- [10] M. Wolf and H. Rauschenbach, *Advanced Energy conversión.*3 (1961), P 455.
- [11] J. Randall and J. Jacot, *Renewable Energy.* 28 (2003), 18-51

- [12] [CIEMAT. Fundamentos, dimensionado y aplicaciones de la energía solar fotovoltaica. España 2014.
- [13] P. Auger, Sur les rayons β secondaires produits dans un gaz par des rayons X, C.R.A.S., 177, (1923) 169-171.
- [14] B. Du, E.Hub, M. Kolhec. Performance analysis of water cooled concentrated photovoltaic (CPV) system. Renewable Sustainable Energy Rev. 6 (2012).
- [15] S. Chatterjee, G. Tamizh. BAPV arrays: side-by-side comparison with and without fan cooling. IEEE photovoltaic specialists conference (PVSC) 7 (2011), 537–542.
- [16] Van Helden, Van Zolingen, Zondag. Thermalsystems: PV panels supplying renewable electricity and heat. Prog Photovoltaics Res Appl. 12 (2004), 415–26.
- [17] A. Luque, S. Hegedus. Handbook of photovoltaic science and engineering. 2nd ed. West Sussex: John Wiley & Sons; 2011.
- [18] Michael S. On the evaluation of spectral effects on photovoltaic modules performance parameters and hot spots in solar cells. Ph.D. thesis. University of Fort Hare; 2009.
- [19] X. Xu et al. Thermal modeling of hybrid concentrating PV/T collectors with tree-shaped channel networks cooling system. IEEE ITherm Conference; (2012) 1131-1139.
- [20] Del Cueto J.A. Comparison of energy production and performance from flat plate photovoltaic module technologies deployed at fixed. Proceeding IEEE PV specialists conference, New Orleans, USA; 20–24 May 2002.
- [21] D. M. Chapin, C. S. Fuller, and G. L. Pearson, J. Appl. Phys. 25, 676 (1954).

- [22] S. Chowdhury et al. Energy Policy 68 (2014), 285.
- [23] G. Masson, et al. Global Market Outlook for Photovoltaics 2013-2017, European Photovoltaic Industry Association, Brussels, Belgium (2013).
- [24] E. Franklin, et al. Sliver solar cells: high-efficiency low-cost PV technology Adv. Opto Electron 2007.
- [25] A. M. Hermann. Polycrystalline thin-film solar cells. Review Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 55 (1998), 75-81.
- [26] H.A. Zondag, et al. The yield of different combined PV-thermal collector designs Sol. Energy, 74 (2003), 253-269.
- [27] B. Parida, et al. Review of solar photovoltaic technologies Renew. Sustainable Energy Rev., 15 (2011), 1625-1636].
- [28] M. Powalla, B. Dimmler. CIGS solar cells on the way to mass production: process statistics of a 30 cm x 30 cm module line Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 67 (2001), 337-344.
- [29] S.K. Deb, Recent developments in high efficiency photovoltaic cells Renew. Energy, 15 (1) (1998), 467-472.
- [30] Kamran et al. A review of PV/T technologies: Effects of control parameters, International Journal of Heat and Mass Transfer. 64 (2013) 483-500.
- [31] F. Marcelo, MANUAL TÉCNICO COMERCIAL ENERGÍA SOLAR TÉRMICA, SOPELIA . ISBN: 9789874203717
- [32] Duffie, J., and Beckman. Solar Engineering of Thermal Processes, 2nd Ed., Wiley Interscience, U.S.A. 1991.
- [33] Charles Xie. Modeling linear Fresnel reflectors in Energy3D Engineering Computation Laboratory July 15, 2017.
- [34] La Razon. Planta termosolar perteneciente a Acciona. Madrid feb 2018.

- [35] Greenpeace, SolarPACES y ESTELA, Energía Solar Térmica de Concentración, Perspectiva mundial 2009.
- [36] Servicios OPEXenergy en Centrales Termosolares, Principio Básico de Funcionamiento de una Planta Termosolar. Madrid 2004.
- [37] Application of Solar Energy Chapter: 2, Publisher: InTech Editors: Radu Rugescu, 2013.
- [38] T.T. Chow A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology Appl. Energy, 87 (2) (2010), pp. 365-379
- [39] N. Aste, G. Chiesa, F. Verri Design, development and performance monitoring of a photovoltaic-thermal (PVT) air collector Renew. Energy, 33 (2008), 912-914
- [40] Tina GM, Rosa-Clot M, Rosa-Clot P, Scandura PF. Optical and thermal behavior of submerged photovoltaic solar panel: SP2. Energy 39 (2012), 17–26
- [41] Ho CD, Yeh HM, Wang RC. Heat-transfer enhancement in double-pass flat
- [42] K. Sopian, K.S. Yigit, H.T. Liu, S. Kakac, T.N. Veziroglu Performance analysis of photovoltaic thermal air heaters Energy Convers. Manage., 11 (1996), 1657-1670].
- [43] Ackermann JA, Ong LE, Lau SC. Conjugate heat transfer in solar collector panels with internal longitudinal corrugated fins – Part I: Overall results. Forschung Im Ingenieurwesen 61 (1995), 84–92.
- [44] R. Kumar, M.A. Rosen, Performance evaluation of a double pass PV/T solar air heater with and without fins Appl. Therm. Eng., 31 (2011), 1402-1410.
- [45] NREL, Photovoltaic Research. Consultado 23/05/18 en <https://www.nrel.gov/pv>

[46] SPECTROLAB A Boeing Company. Photovoltaics space products. Consultado 23/05/18 en <http://www.spectrolab.com/space.htm>

[47] Fujisawa T, Tani T. Optimum design for residential photovoltaic–thermal binary utilization system by minimizing auxiliary energy. *Electr Eng Jpn* (English Translation of *Denki Gakkai Ronbunshi*) 137 (2001), 28–35.

[48] Fujisawa T, Tani T. Annual exergy evaluation on photovoltaic–thermal hybrid collector. *Sol Energy Mat Sol C* 47 (1997), 35–48.

[49] SolidWorks Corp, SolidWorks 2015

[50] Ansys Additive Manufacturing Simulation. ANSYS 2016