



CENTRO DE INVESTIGACIONES  
EN ÓPTICA, A.C.

# EVALUACIÓN DE UNA CELDA DE PELTIER COMO DISIPADOR DE CALOR PARA UN SISTEMA FOTOVOLTAICO DE CONCENTRACIÓN



Como Requisito para obtener el grado de:  
Maestro en Optomecatrónica

***Estudiante:***  
***Ing. Jorge Daniel Moreno Gómez***

***Asesor:***  
***Dr. Iván Salgado Tránsito***

***Marzo del 2020***  
***León, Guanajuato, México***

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Iván Salgado Tránsito

Primer sinodal: Dr. Fernando Martell Chávez

Segundo sinodal: Dr. Carlos Pineda Arellano

**TUTOR DE TESIS:**

Dr. Iván Salgado Tránsito

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Iván Salgado Tránsito', written over a horizontal line.

---

**FIRMA**

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios porque gracias a él he podido tener la oportunidad de estar en este punto de preparación.

A mi esposa Cristina Navarro Morales por el apoyo emocional e incondicional que me dio a lo largo de este camino llevándome a este punto culminante.

A mis hijos Jorge Daniel y Franco Paolo por la paciencia que me tuvieron por mi ausencia en este proceso.

A toda mi familia que me apoyo emocionalmente, en especial mi madre Ma. De la Luz Gómez Estrada y padre Manuel Moreno Andrade, y a mis hermanos Leonardo, Virginia, Juan Manuel, José Armando, Ma. Concepción y Luz Guadalupe que me apoyaron a su manera.

A mis amigos de generación que me apoyaron en el recorrido para alcanzar esta meta:

Fabio Vega Nieto

Amanda Desireé Salas Caridad

Iosvani Moré Quintero

Jorge Eduardo Aguirre Rocha

Maria Fernanda González Rodríguez

Ramón Torres

A mis profesores, maestros y doctores del CIO que me ayudaron a alcanzar la meta. En especial a Adrián Coronel Arredondo, Diego Torres Armenta, Ricardo Valdivia Hernández y Geminiano Martínez Ponce.

Y a mí asesor el Dr. Iván Salgado Tránsito que me apoyó en todo momento.

## **ÍNDICE**

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
CAPITULO 1	3
1. PRELIMINARES	
1.1. Necesidad y evaluación del problema.	4
1.1.1. Argumento del problema.	4
1.1.2. Identificación del problema.	5
1.1.3. Alternativas para la solución del problema.	6
1.1.4. Antecedentes.	10
1.2. Objetivos del Proyecto	10
1.2.1. Objetivo general	10
1.2.2. Objetivos específicos	10
1.3. Justificación.	11
CAPITULO 2	12
2. MARCO TEORICO	
2.1. Introducción.	12
2.2. Sistemas solares de Concentración.	12
2.3. Teoría de semiconductores como transformadores de energía	17

*Evaluación de una celda de Peltier como disipador de calor para un sistema fotovoltaico de concentración*

2.3.1. Semiconductores.	18
2.3.1.1. Intrínsecos.	18
2.3.1.2. Extrínsecos.	23
2.3.1.3. Unión <i>pn</i>	27
2.3.2. Efecto fotovoltaico.	30
2.3.3. Celda fotovoltaica.	31
2.3.4. Modelado eléctrico de una celda fotovoltaica.	34
2.3.5. Efecto Termoeléctrico	37
CAPITULO 3	42
3. METODOLOGÍA	4
3.1. Diseño Mecánico.	4
3.1.1. Configuración de diseño mecánico.	5
3.2. Diseño Electrónico.	6
3.1.2. Configuración de diseño electrónico.	10
3. METODOLOGÍA	
3.3. Diseño Mecánico, 42	
3.3.1. Configuración de diseño mecánico, 42	
3.4. Diseño Electrónico, 46	
3.4.1. Configuración de diseño electrónico, 47	
CAPITULO 4	56
4. RESULTADOS.	
4.1. Diseño del prototipo de pruebas.	57
4.2. Resultados de la medición de Temperaturas.	59

*Evaluación de una celda de Peltier como disipador de calor para un sistema fotovoltaico de concentración*

CAPITULO 5		64
5. CONCLUSIONES		
CAPITULO 6		68
6. BIBLIOGRAFÍA		
CAPITULO 7		69
7. ANEXOS		
ANEXO A	Hoja de datos fotocelda HCPV	69
ANEXO B	Hoja de datos Celda Peltier TEC1-12706	73
ANEXO C	Hoja de datos Lente de Fresnel CP220-280	76
ANEXO D	Comportamiento de termopar tipo "K"	77
ANEXO E	Diseño de estructura del sistema de concentración	80

## **RESUMEN**

En esta tesis se desarrolla un análisis experimental para estudiar el comportamiento de una celda Peltier como sistema de enfriamiento para un sistema fotovoltaico de alta concentración.

Las necesidades de incrementar la eficiencia de cualquier sistema, es una meta constante e importante para mejorar su factibilidad técnico-económica, debido a que la optimización de un proceso, es una tarea frecuente en cualquier desarrollo ingenieril.

En un sistema fotovoltaico con concentrador solar, la eficiencia de conversión del sistema está en función de la temperatura del mismo, es por ello que existe la necesidad de bajar su temperatura. Existen mecanismos para bajar la temperatura y uno de ellos se basa en la aplicación de los fenómenos termoeléctricos, que se suponen de larga duración y sin mantenimiento ya que no tienen partes móviles.

Los dispositivos que utilizan los efectos termoeléctricos han mejorado desde que se descubrieron su comportamiento, y como consecuencia los costos se han aminorando y la eficiencia aumentando, permitiendo así a esta tecnología a ser una tecnología factible para utilizarla de manera comercial.

Para cualquier aplicación termoeléctrica se tiene que observar en primera instancia el estudio de los fenómenos termoeléctricos en los semiconductores que se debe tener en cuenta en los módulos termoeléctricos.

Al observar el comportamiento de los semiconductores en este campo, se puede llegar a comprender como actúan y así emplearlos para esta aplicación, ya sea con materiales comerciales o abrir paso a nuevos materiales que permitan aumentar su eficiencia térmica.

Una alternativa novedosa es emplear celdas de Peltier, como sistema de enfriamiento. Considerando que no tiene partes móviles el poco mantenimiento puede ser su mayor ventaja.

Las celdas Peltier usan semiconductores fabricados principalmente de Teluro de Bismuto ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ), que al conectarse de manera serial se crea el efecto Peltier, una cara de la celda caliente y la otra fría, la parte fría es la que se pretende aprovechar para diseñar el sistema de enfriamiento.

El uso de las celdas Peltier comerciales puede ser un inicio para desarrollar un sistema de enfriamiento cada vez más eficiente y al mismo tiempo se tiene que observar el comportamiento de celdas fotovoltaicas para estudiar cómo afecta la temperatura en su eficiencia en la conversión de energía solar a energía eléctrica, teniendo en cuenta que también son semiconductores.

## **INTRODUCCIÓN**

El sistema energético mundial en la actualidad, está basado principalmente en el uso de los combustibles derivados del petróleo, y esto ha generado una gran incertidumbre debido a que es un recurso finito, esto sin contar, los efectos de la contaminación que ha generado desde los inicios de su uso en masa. En la actualidad existen diversas investigaciones para la generación de energía mediante el uso de fuentes de energía renovable, las cuales son abundantes y disponibles en diferentes regiones. Se consideran como fuentes de energía renovable a la Geotermia, la Solar, Eólica, Biomasa, Mareomotriz y Mini-hidráulica, sin embargo, las principales son la Solar y la Eólica.

El aprovechamiento del recurso solar ha tenido una importante proliferación en los últimos años debido a su abundancia y enorme disponibilidad en grandes regiones del planeta. Otro aspecto que ha ayudado a la implementación de sistemas de aprovechamiento de energía solar es el desarrollo de la tecnología y su abaratamiento. Las principales tecnologías son los sistemas fotovoltaicos y los colectores solares para calentamiento. Sin embargo, en la actualidad hay mucha investigación para explorar nuevos mecanismos de aprovechamiento de la energía solar, uno de ellos es el aprovechamiento con materiales termoeléctricos, los cuales generan una diferencia de potencial cuando se presenta un gradiente de temperatura. De esta manera se pueden aprovechar las características de estos materiales para producir electricidad a partir de la energía emitida por el sol.

El uso de la tecnología solar se puede dividir de acuerdo a la aplicación que resulta del aprovechamiento de la conversión de la energía solar, que pueden ser:

- Energía Solar a Energía Térmica.
- Energía Solar a Energía Eléctrica.

En el caso de la Energía Térmica se puede aplicar para calentar una sustancia de forma directa, como puede ser el agua de una alberca, para la generación de electricidad valiéndose del calor, con el objetivo de crear vapor para mover un generador de electricidad, o bien utilizando componentes termoeléctricos; también es posible producir frío utilizando sistemas de adsorción o absorción. La energía térmica puede aprovecharse de mejor manera cuando se utiliza de forma directa ya que no existen pérdidas mecánicas, como es en caso de generar energía eléctrica por medio de turbinas.

Una forma eficiente para producir electricidad es haciendo la conversión directa de energía solar a energía eléctrica, por medio de celdas que hagan esta transformación. A estas celdas se le conocen como celdas fotovoltaicas y en conjunto paneles fotovoltaicos.

Una manera de incrementar la temperatura de trabajo de los sistemas solares es utilizando concentradores solares, los cuales reflejan o concentran los rayos solares en una zona focal de menor tamaño a una sección muy pequeña, en la cual se concentra un área grande de rayos emitidos por el sol a un área más pequeña, aprovechando así al máximo la energía solar.

Existen varios tipos de concentradores solares que van de superficies parabólicas a configuraciones más complejas con espejos o lentes de Fresnel. Estos concentradores tienen por objetivo redirigir los rayos a una sección pequeña (zona focal) que tiene como efecto un incremento de temperatura en el receptor como consecuencia del alto flujo radiativo. Para la generación de electricidad directa este alto flujo radiactivo afecta a la eficiencia del panel fotovoltaico, ya que el aumento de la temperatura en un sistema que no está diseñado para este fin siempre afectará a la



eficiencia del mismo. Lo anterior va tanto en lo natural como en cualquier otro sistema hecho por el hombre, tales como, los sistemas mecánicos, eléctricos, nucleares, etc. En los cuales se debe evacuar el calor que se produce al estar activo el sistema.

Bajo estas condiciones existe la necesidad de tener un sistema de enfriamiento, este tiene como objetivo el mantener a una temperatura a la cual el panel fotovoltaico opere a su máxima eficiencia.

Uno de los métodos utilizados son los intercambiadores de calor, estos trabajan principalmente con dos fluidos separados por un disipador de calor, uno fluye con baja temperatura absorbiendo el calor del otro fluido que fluye a alta temperatura, un ejemplo claro es el sistema de enfriamiento en un automóvil, donde el fluido con baja temperatura es el aire y de alta temperatura es el líquido refrigerante y el disipador es el radiador. Otro método es el de producción de frío a través de la compresión y evaporación de un fluido a diferentes presiones, el cual baja la temperatura por debajo de la temperatura ambiente, un ejemplo claro es el aire acondicionado, el último método es el termoeléctrico, el cual con el uso de semiconductores dirige el calor de un lado hacia otro con una diferencia de potencial entre sus bornes, el más conocido son el uso de las celdas Peltier, que tienen la característica de no tener partes móviles y su uso pocos lo conocen. Debido a los avances en los sistemas con el efecto Peltier, se proyecta enfriar un sistema de alta concentración para celdas fotovoltaicas usando componentes que utilizan este efecto, generando valoración de observar con pruebas contundentes la factibilidad de crear sistemas de este tipo aprovechando sus ventajas.

## 1. PRELIMINARES

### 1.1. NECESIDAD Y EVALUACIÓN DEL PROBLEMA.

#### 1.1.1 Argumento del problema.

El estado actual de nuestro planeta es claro que es debido a la explotación de los recursos naturales, ya que la humanidad con su explosión demográfica y necesidades tecnológicas ha venido creando necesidades para satisfacer a la población de tal manera no se permite la reestructuración del ecosistema natural.

La dependencia hacia los combustibles fósiles y a las energías contaminantes ha creado un problema bastante amplio y complejo, esto como consecuencia de la tecnología que ofrece de manera temporal una cierta mejor condición de vida de los humanos, ésta tecnología son alimentadas principalmente por medio de combustibles fósiles.

Debido a lo anterior se ha comenzado pensar en las alternativas que puedan sustituir una parte significativa al consumo desmedido de combustibles fósiles. Para esta situación existen diferentes tipos de energías que se han estado desarrollando, esto para satisfacer la demanda de electricidad y calor principalmente. De las energías alternativas, las que más interesan son las energías renovables dado que la contaminación es muy inferior a la de los combustibles ya sean fósiles o biomasa. Las energías renovables son llamadas según el recurso que haga posible la generación de energía, tales como

- El viento: **Energía Eólica.**
- El calor de la tierra: **Energía Geotérmica**
- Los ríos y corrientes de agua dulce: **Energía Hidráulica o Hidroeléctrica.**
- Los mareas de los océanos: **Energía Mareomotriz.**
- El Sol: **Energía Solar.**
- Las olas de los mares: **Energía Olomotriz.**

Todas estas energías han dado lugar a tener líneas de investigación por separado, ya que cada una ellas tienen sus ventajas y desventajas, teniendo en cuenta la ubicación donde se requiera generar la energía alternativa.

Específicamente, la energía solar tiene grandes ventajas, lo cual genera un amplio interés para su aplicación doméstica, comercial e industrial. Algunas de ellas pueden ser:

- Es un recurso que se tiene de forma ilimitada en gran parte del globo terráqueo, de tal manera que se puede manipular este recurso de forma libre, en comparación de los altos costos que representan los combustibles fósiles.
- La contaminación ambiental no es un tema para este tipo de energía, ya que existen procesos nocivos al medio ambiente, aunque los desechos de los paneles se deben de regular, esto no se compara con otros tipos de generación de energía.
- Para aprovechar el recurso solar, no genera costo, la inversión sólo radica en los componentes del sistema solar.
- Es completamente flexible, ya que se adapta a la necesidad del proyecto, pudiéndose hacer módulos para instalarse cerca en donde se requiera la energía.
- La conversión de la energía solar a otra forma de energía es completamente silenciosa, evitando así también la contaminación acústica.

Las aplicaciones de la energía solar son las mismas que las aplicaciones que utilizan otros tipos de energía que producen energía eléctrica, con el extra de que se puede puntualizar de acuerdo a la necesidad, como ejemplos podemos tomar, las calculadoras, relojes, sombreros con ventilación, cargadores etc. Además puede ser configurada de forma doméstica, comercial e industrial, esto sin tener en cuenta que se puede también utilizar transformando la energía solar a energía térmica, obteniéndose así, otros usos tales como el calentar el agua para uso doméstico comercial e industrial, estufas solares, inclusive para climatización, entre otros.

En nuestro caso la energía solar es la óptima por la ubicación donde se realiza la investigación y por lo tanto se centrará la atención a este tipo de generación de energía, en particular la generación de electricidad por medio de paneles fotovoltaicos.

Existen una gran variedad de paneles solares fotovoltaicos, (Deltavolt SAC, 2019) tales como:

- Paneles de celdas de silicio.
- Paneles monocristalinos versus paneles policristalinos.
- Placas solares de capa fina.
- Paneles con capas transparentes.
- Celdas orgánicas.
- Celdas de concentración.

### 1.1.2. Identificación del problema

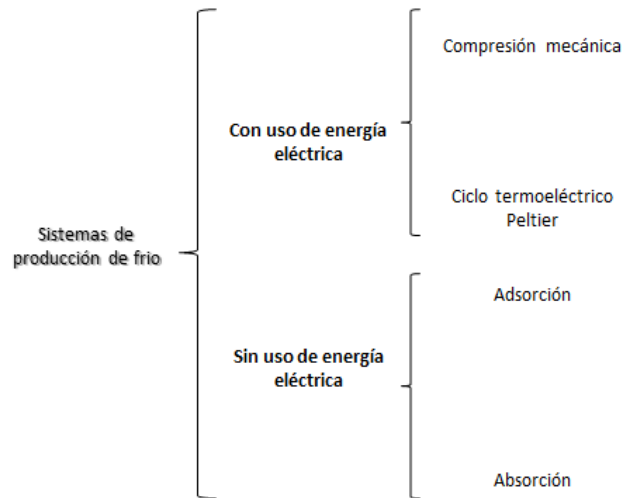
El por qué se eligió la tecnología de concentración, con sus ventajas y desventajas entre el sistema convencional y los sistemas fotovoltaicos de alta concentración (HCPV por sus siglas en inglés High Concentrator Fhotovoltaic).

El interés se presenta en las celdas de concentración, porque éstas representan un desarrollo para aumentar la eficiencia a partir de sistemas ópticos, que permiten concentrar la radiación solar en un espacio muy pequeño.

Al optimizar el aprovechamiento de la energía solar por medio de la concentración, se genera la necesidad crear sistemas de seguimiento solar para orientar el sistema fotovoltaico hacia el sol, además de controlar la alta temperatura generada, esto trae como consecuencia implementar sistemas complejos que requieren un mantenimiento constante que resulta costoso. En la actualidad se ha encaminado a investigar y crear sistemas que disminuyan esta gran desventaja.

Por esta razón se realiza la implementación de un sistema de enfriamiento de bajo mantenimiento, para así aminorar los costos de mantenimiento.

Con el fin de crear el sistema de enfriamiento para un sistema de celdas de concentración, se tienen diferentes alternativas y se pueden clasificar las más comunes como se muestra en el siguiente cuadro sinóptico:



Siendo éstas los principales sistemas de producción de frío, o bien métodos de absorción de calor. Cada uno de ellos con sus características y procesos muy singulares, esto a su vez nos proporciona su rendimiento energético llamado COP, el cual se define como el cociente entre la potencia de refrigeración ( $Q$ ) y la potencia de la fuente de calor absorbida ( $W$ ), (Rodríguez, 2017).

$$COP = Q/W \quad \text{ec. 1.1}$$

### 1.1.3. Alternativas para la solución del problema

**La refrigeración por compresión mecánica**, es una técnica de refrigeración que radica en obligar de manera mecánica, el movimiento de un gas con propiedades especiales (llamado comúnmente refrigerante), a través de un circuito cerrado, dividido en dos zonas, tal como se muestra en la Figura 1.1. La zona de alta presión cede calor ( $Q_{cedido}$ ), por medio de un intercambiador de calor llamado condensador, el cual contiene exceso de calor debido a la compresión del gas refrigerante; con el propósito de que absorba calor ( $Q_{absorbido}$ ), se tiene un intercambiador de calor llamado evaporador, el cual evapora al refrigerante a la presión que se tiene a la salida de la válvula de expansión.

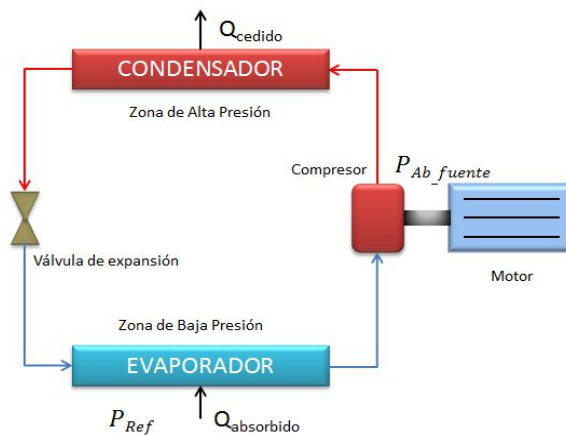


Figura 1.1. Ciclo de refrigeración por medio de compresión mecánica.

### Ventajas:

Los equipos de producción de frío por compresión mecánica, son uno de métodos más comercializados y por ende los más estudiados, en consecuencia obtienen mayor eficiencia con unos valores de COP elevados en comparación con otros métodos de producción de frío. Estos valores pueden variar, (Escalona, 2015), entre 2 y 4, ya que producen, de dos a cuatro veces, energía frigorífica que la energía eléctrica que consumen. Por este motivo, el método por compresión mecánica resulta muy competitivo, dado que su fabricación en serie reduce los costos de fabricación y de mercadeo.

### Desventajas:

A pesar de la gran ventaja que los equipos por compresión mecánica tienen, resulta que para su operación requieren un alto consumo de energía, además por un lado, el refrigerante utilizado puede tener un alto impacto ambiental al existir fugas o al no recuperarlo al hacer mantenimiento al sistema y por otro (Escalona, 2015), el efecto invernadero relacionado al origen de la energía utilizada.

**La refrigeración por celdas Peltier**, La tecnología de la refrigeración termoeléctrica está caracterizada por la flexibilidad de opciones que se ofrece en el diseño y fabricación de módulos termoeléctricos (Universidad Politécnica de Madrid, s.f.). Esta se presenta cuando se hace pasar una corriente eléctrica a través de uno o más pares de semiconductores de tipo n y p. Un refrigerador termoeléctrico es básicamente una bomba de calor que transfiere calor de un lado del dispositivo al otro en contra del gradiente térmico (de baja a alta temperatura) a costa de consumir energía eléctrica, (Lindero, 2010). La polarización es muy importante debido a que ésta define cual es la cara que disipa el calor y cuál es la cara que absorbe el calor, en la Figura 1.2 se muestra de manera gráfica este comportamiento.

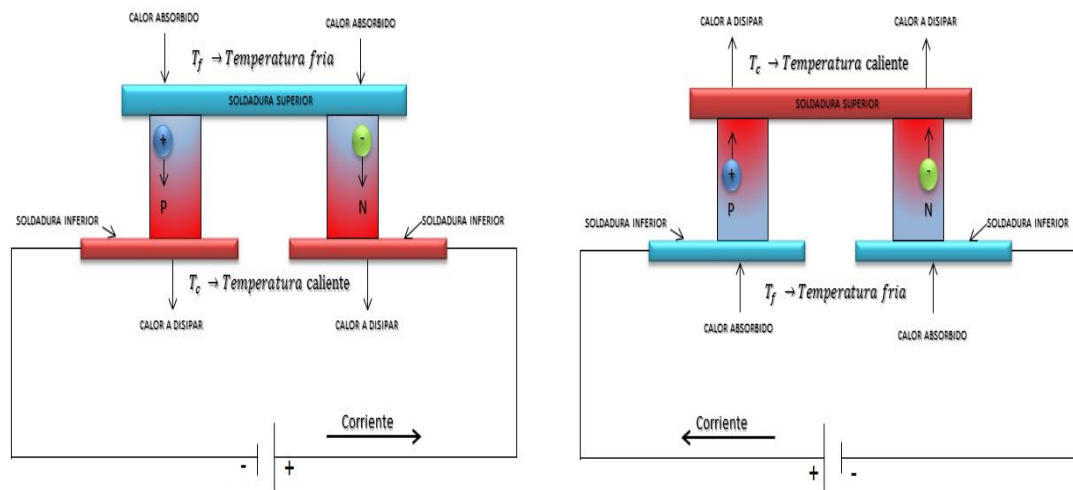


Figura 1.2. Polarización de las celdas Peltier.

### Ventajas:

- Tamaño reducido de las celdas Peltier.
- No tiene partes móviles
- Poco mantenimiento.

- Puede cambiar de calentar a enfriar con sólo cambiar polarización.

Desventajas:

- El consumo de energía eléctrica puede ser de consideración en las celdas Peltier.
- Este método de producción de frío tiene un bajo rendimiento.

**La refrigeración por adsorción**, El método de producción de frío basado en la adsorción sólido-gas, resulta ser una alternativa dado a la reversibilidad que implica el ciclo de adsorción, además de que representa un método que resulta ser simple y fácil la implantación de esta tecnología así como su operación. Aunque es un método de compresión, no requiere de un compresor, ya que utiliza un generador, esto implica algunas diferencias sobre otros métodos de compresión, (Vicente, 2015), tales como:

- El fluido que circula además de los cambios que resultan de la Presión, Volumen y Temperatura en la condensación y evaporación, también existen los cambios de la adsorción y desorción, siendo esta una razón por la cual no se representan en diagramas P-V y T-S
- En el generador, el material adsorbente se encuentra fijo, de tal manera que su operación se torna a ser discontinua, esto implica que el ciclo completo de la producción de frío es discontinuo, como se muestra en la Figura 1.3
- La energía que se requiere para operar, es térmica, que se utiliza para calentar el generador.

Un ciclo teórico típico de refrigeración por adsorción, comprende cuatro pasos distintos:

1. Al generar un estrangulamiento para bajar la presión, se genera la condición ideal para que el refrigerante se evapore para que después sea adsorbido por el adsorbedor en el generador.
2. Al ser adsorbido el refrigerante, este enfría al generador para lo cual se presenta la etapa de calentamiento para una adsorción constante
3. Se eleva la temperatura al generador, para que el refrigerante al ebullicir se desprenda del adsorbedor, a esta etapa se le llama desorción, en la cual, al elevarse la temperatura aumenta la presión entre el generador y la válvula de estrangulamiento.
4. La otra etapa es la condensación que se da al enfriar el refrigerante a temperatura ambiente.

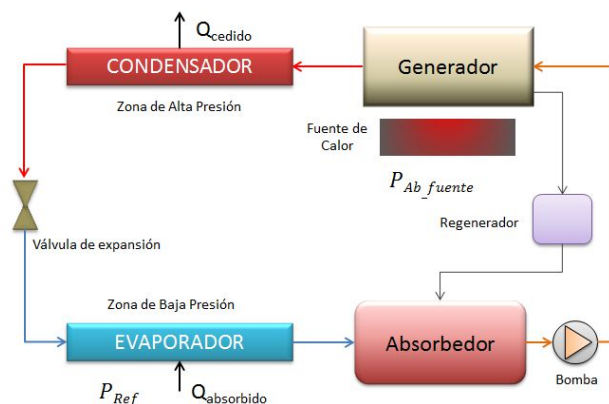


Figura 1.3. Etapas de un sistema de enfriamiento por adsorción.

## Ventajas:

- Es muy simple funcionamiento de éste método de producción de frío.
- No hay cristalización, por lo tanto, el rango de las temperaturas que se pueden disipar es amplio.
- La adsorción de da en forma natural, por este motivo utiliza poco consumo de energía complementaria.

## Desventajas:

- Es elevado el volumen y peso, en consecuencia, difícil de maniobrar.
- La producción de frío por este método de adsorción es pequeña, y su precio todavía no justifica su operación (Vicente, 2015).

**La refrigeración por absorción**, En el esquema mostrado en la Figura 1.4, se muestra un sistema de absorción de efecto simple, en el cuál se tiene como refrigerante el amoniaco diluido en agua ( $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ ), Esta solución se encuentra en el generador y es llevada al punto de ebullición con una fuente de calor, en consecuencia el amoniaco se evapora y se separa del agua, generando una alta presión, debido a la presión la solución fluye hacia el condensador; en este punto el amoniaco se condensa por medio del ambiente, ya con el amoniaco líquido se impulsa hacia la válvula de expansión donde se le reduce la presión al fluido refrigerante, para después entrar al evaporador; a causa de esta variación de presión el amoniaco se evapora, absorbiendo energía del medio a refrigerar; el vapor pasa luego al dispositivo de adsorción, siendo éste absorbido por el agua proveniente de la separación del amoniaco que se produjo en el generador.

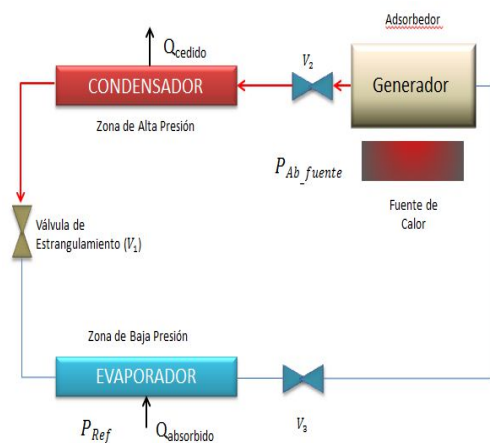


Figura 1.3 a Desorción-Condensación

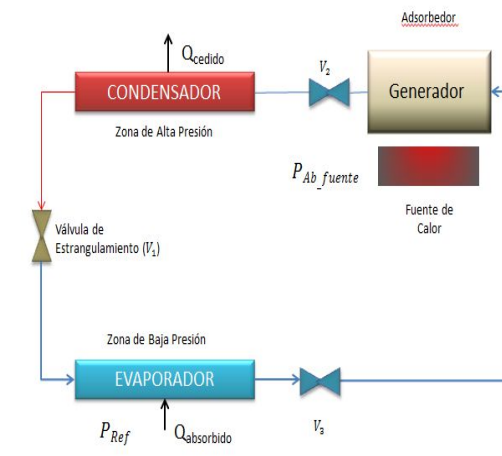


Figura 1.3 b Adsorción-Evaporación

Figura 1.4. Ciclo de un sistema de enfriamiento por absorción.

## Ventajas:

A pesar de que el rendimiento por el método de producción de frío por absorción es inferior al método por compresión mecánica, el método por absorción puede compensarse, dado que la energía puede provenir de una fuente calorífica económica, inclusive de un producto residual o bien de un producto dispuesto a desecharse.

Desventajas:

- Es muy Ruidosa
- Tiene mucho desgaste a la hora de realizar mantenimiento.
- Es elevado el volumen y peso, en consecuencia, difícil de maniobrar. (Escalona, 2015).

#### 1.1.4. Antecedentes.

Los paneles solares disminuyen su eficiencia debido a diferentes factores como el aumento de temperatura, reflexión, entre otras. Los investigadores que se están dedicando a esta tecnología han descubierto que estos factores se pueden reducir para aumentar la eficiencia de los paneles solares, y uno de los principales es la disminución de la temperatura.

Uno de los métodos utilizados en las investigaciones es por medio de agua, la cual es bombeada para pasar sobre el panel solar, otras investigaciones utilizan el Material en su Cambio de Fase PCM (por sus siglas en inglés Phase Change Material), el cual es un material capaz de almacenar energía en forma de calor latente, (López, 2018), el uso del aire también es utilizado ya sea por convección natural y el aire.

En la actualidad los investigadores han puesto atención al sistema de enfriamiento por medio de termoelectricos, los cuales tienen la facilidad de adaptarse a los paneles solares, estos no tienen partes móviles y no llevan fluidos que potencialmente dañen al panel solar.

Cuando se descubrió el efecto Peltier, fue en una etapa en la que no se le dio la importancia necesaria como para desarrollarla tecnológicamente a la par de otros fenómenos descubiertos en esa época, en la actualidad, la búsqueda de alternativas para producir energía, ha permitido en los últimos años, investigar el efecto termoelectrico, para desarrollar un avance continuo a esta tecnología. El efecto termoelectrico dependiendo de la forma en que se analice tiene distintas aprobaciones. El uso de estos efectos permite aumentar la eficiencia en sistemas que desperdician calor y el aprovechamiento del uso de semiconductores para el desarrollo de intercambiadores de calor económicos y de bajo mantenimiento.

El efecto termoelectrico se puede definir como una conversión de energía térmica a eléctrica o viceversa, esto se da cuando existe una diferencia de temperatura en el termoelectrico o bien una diferencia de potencial.

Cuando a un elemento termoelectrico se le aplica una diferencia de voltaje, este elemento manifiesta una diferencia de temperatura, a este efecto se le conoce como "efecto Peltier".

La propiedad termoelectrica conocida como "efecto Peltier", fue descubierta en 1834 por Jean Peltier. Este efecto hace referencia a la producción de una diferencia de temperatura debido a una diferencia de potencial eléctrica. Esto sucede cuando se hace pasar corriente eléctrica a través de dos metales o semiconductores que se encuentren conectados por dos acoplamientos Peltier, esta corriente eléctrica inicia una transferencia de calor de un acoplamiento a otro, de este modo uno absorbe calor y el otro lo disipa.



## 1.2. OBJETIVOS DEL PROYECTO.

### 1.2.1. Objetivo general.

Desarrollar un prototipo de un sistema termoeléctrico basado en el “efecto Peltier”, que permita retirar o aprovechar el calor de desecho de un sistema Fotovoltaico de concentración, con el fin incrementar la eficiencia de conversión de energía solar a potencia eléctrica.

### 1.2.2. Objetivos específicos.

1. Estudio del estado del arte del efecto de Peltier y Seebeck, así como su comportamiento termoeléctrico.
2. Evaluar el funcionamiento de las celdas Peltier.
3. Valorar el sistema para verificar la factibilidad del proyecto.
4. Diseñar el sistema de enfriamiento.
5. Modelar mediante un software de diseño asistido por computadora (CAD) el prototipo.
6. Realizar la adquisición de datos.
7. Construir un prototipo a escala de acuerdo al sistema fotovoltaico de concentración disponible.
8. Realizar la puesta a punto y pruebas del prototipo construido.
9. Evaluar los resultados.

## 1.3. JUSTIFICACIÓN.

Se decide por el sistema termoeléctrico con celdas Peltier, ya que ofrece ventajas sobre los otros sistemas productores de frío, en las que destacan principalmente:

- Simplicidad, ya que no necesita de ningún proceso de evaporización ni compresión.
- Su forma, aunque se pueden fabricar de cualquier forma, las celdas Peltier tienen comercialmente la forma cuadrada que se acopla fácilmente a cualquier sistema fotovoltaico.
- Comercialmente existen en el mercado a bajo costo, con diferentes capacidades.
- Poco o nulo mantenimiento.
- Ideal para el tamaño de la celda de alta concentración.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 INTRODUCCIÓN

Para aprovechar las zonas semidesérticas y desérticas, en estas regiones se tiene un gran potencial para aprovechar la energía solar, una fuente renovable, limpia e inagotable, por la gran cantidad de horas sol y la calidad de radiación incidente durante casi todo el año. Sin embargo, en el caso de los sistemas fotovoltaicos, las altas temperaturas ambientales se convierten en una limitante, el incremento de la temperatura de la celda solar ocasiona que la eficiencia de conversión disminuya drásticamente, a su vez el sobrecalentamiento puede crear degradación térmica, que como consecuencia acorta la vida útil de los paneles, (López, 2018).

El rendimiento de las celdas fotovoltaicas comerciales de Silicio cristalino rondan entre 15-21%, esto significa que sólo una parte de la energía contenida en la radiación solar, se aprovecha como energía eléctrica. Este se reduce mientras la temperatura sea más alta. Un aumento en la temperatura supone un aumento en la corriente, aunque esto es verdadero, la diferencia de potencial decrece, por lo tanto la potencia no se incrementa, es más disminuye con este efecto, (Valencia & Díaz, 2018).

### 2.2 SISTEMAS SOLARES DE CONCENTRACIÓN

Los sistemas solares de concentración, transforman la componente directa de la radiación en otra forma de energía para su utilización o almacenamiento, mediante la concentración de los rayos solares sobre una superficie de menor tamaño. Esto es posible con el uso de elementos ópticos tales como lentes o espejos, para que concentren y dirijan los rayos a un receptor solar que es el encargado de absorber y transformar la energía solar.

De acuerdo al principio de Carnot, Los sistemas solares de concentración permiten alcanzar mayores eficiencias de conversión de la energía solar en comparación con los sistemas tradicionales, debido a que la eficiencia ideal es mucho mayor conforme se incrementa la diferencia de temperatura entre el reservorio caliente y el medio ambiente. Los sistemas de concentración solar basan su funcionamiento en el uso de lentes o espejos con una superficie especular, donde el eje óptico es paralelo a la dirección de la radiación, y en teoría todos los rayos son transmitidos o reflejados respectivamente, se concentran en un punto focal.

La base teórica de los concentradores solares es que las temperaturas de suministro de energía pueden incrementarse disminuyendo el área donde las cuales se producen las pérdidas, (Duffie & Beckman, 2013).

En la Figura 2.1 se pueden observar las pérdidas de energía térmica y la ganancia que se obtiene con la energía absorbida que puede ser utilizada para un cambio de energía.

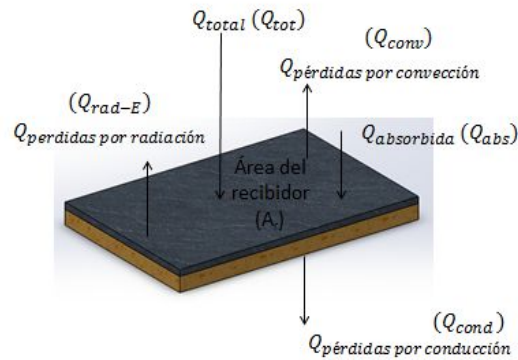


Figura 2.1 Análisis pérdidas de energía térmica

Por lo tanto la ecuación de la conservación de la energía térmica la define la Ec. 2.1:

$$Q_{rad-E} + Q_{conv} + Q_{cond} + Q_{abs} = Q_{tot} \quad \text{Ec. 2.1}$$

Dónde:

$Q_{rad-E}$  → Pérdidas por radiación emitidas

$Q_{conv}$  → Pérdidas por convección

$Q_{cond}$  → Pérdidas por conducción

$Q_{abs}$  → Energía absorbida útil

$Q_{tot}$  → Energía solar total sobre el área del panel

Por lo tanto las pérdidas totales se pueden definir con la Ec. 2.2:

$$Q_{perd tot} = Q_{rad-E} + Q_{conv} + Q_{cond} \quad \text{Ec. 2.2}$$

Donde las pérdidas totales se pueden calcular con la Ec. 2.3, (Duffie & Beckman, 2013):

$$Q_{perd tot} = A_r [\varepsilon \sigma (T_r^4 - T_{amb}^4) + h_w (T_r - T_{aire}) + U_{cond} (T_r - T_a)] \quad \text{Ec. 2.3}$$

Dónde:

$Q_{perd tot}$  → Pérdidas térmicas totales

$A_r$  → Área del receptor

$\varepsilon$  → Emisividad

- $\sigma$  → Constante de Estefan – Boltzmann ( $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ )
- $T_r$  → Temperatura del receptor
- $T_{amb}$  → Temperatura ambiente
- $T_{aire}$  → Temperatura del aire circundante en el receptor
- $T_a$  → Temperatura de la cara opuesta del receptor
- $h_w$  → Coeficiente de convección
- $U_L$  → Coeficiente de conducción
- $h_w$  → Coeficiente de convección

Esta afirmación puede ser considerada con el análisis de transferencia de calor expresada con las Ec. 2.3, ya que entre más grande sea el área del absorbedor, tiene como consecuencia mayores pérdidas por la radiación emitida, la reflexión debido al material, por la convección debido al ambiente local y por la conducción en las paredes donde no existe la absorción directa, de tal manera que una área pequeña teóricamente tendrá menos pérdidas aunque menor absorción; pero teniendo en cuenta que si en esa área pequeña se concentra energía de una área mayor, la absorción será mayor y las pérdidas en consecuencia menor. Con esto se puede tener un comparativo con un colector solar convencional en donde se tiene la misma área de absorción pero mayores pérdidas. En la Figura 2.2 se muestran las diferencias de áreas y las pérdidas entre un colector convencional y un concentrador.

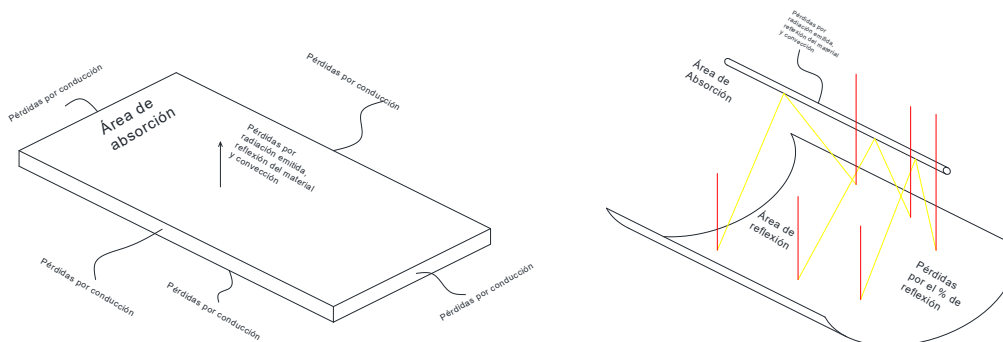


Figura 2.2 Relación de las pérdidas debido al área de absorción.

Un concentrador solar consiste de un sistema óptico y un receptor de radiación emitida, este receptor se convierte en un absorbedor y de acuerdo a la aplicación, puede cambiar la energía absorbida a otro tipo de energía, dando lugar a que exista un factor o razón de concentración, que es la relación de áreas que existe entre un sistema óptico y el receptor, y se define con la siguiente ecuación:

$$C = \frac{\text{Área de apertura}}{\text{Área de absorción}} \quad \text{Ec. 2.4}$$

En la Figura 2.3 se muestra las áreas de esta relación.

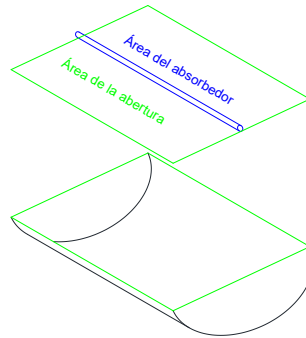


Figura 2.3 Relación de áreas entre el sistema óptico y el absorbedor

En la cual el área de apertura es el área por donde entra la radiación solar, (Duffie&Beckman, 2013).

A pesar de que se puede observar un claro aumento de la eficiencia térmica, existen otros factores que pueden afectar a la eficiencia total, uno de ellos es la forma geométrica del concentrador solar, de acuerdo a esto existen configuraciones de las cuales todavía están sometidas a investigación para su optimización, entre ellas se muestran en la Figura 2.4 las formas geométricas que se han estado utilizando.

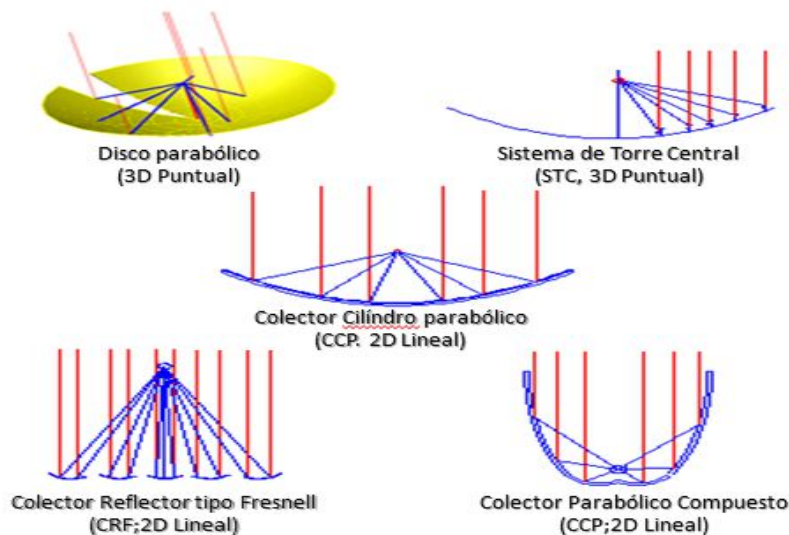


Figura 2.4. Formas geométricas de los sistemas ópticos para los concentradores solares.

Apolonio de Perge fue el primero en utilizar el término de parábola en su tratado Cónicas, que es considerada obra maestra sobre el tema de las matemáticas griegas, en ella se desarrolla un vasto estudio sobre las tangentes en las secciones cónicas.

Se define como un lugar geométrico a la parábola, ya que un punto hace un recorrido sobre un plano, de tal forma que la distancia de este punto a una recta fija llamada directriz es la misma que la que existe entre este mismo punto y un punto fijo llamado foco de la parábola (Vázquez & Castillo, 2003). En la Figura 2.5 se observa este análisis en lo que prueba la equidistancia.

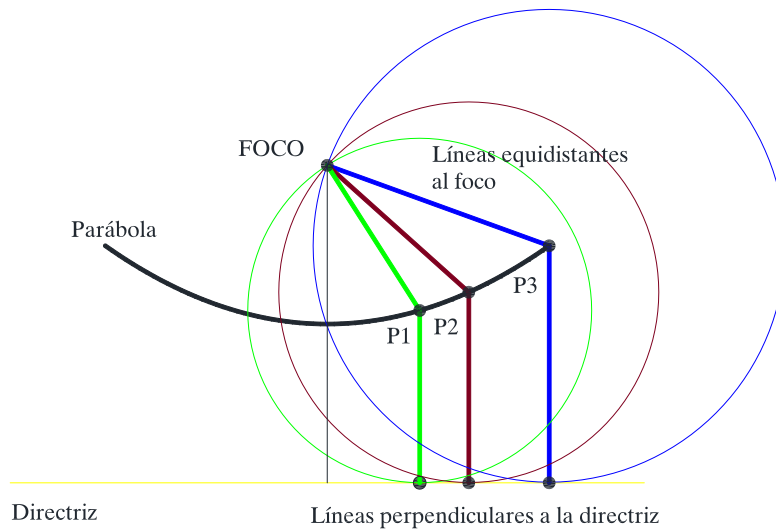


Figura 2.5. Lugares geométricos de la parábola con distancias equidistantes hacia el foco y hacia la directriz.

Fue Apolonio de Perge el que manifestó que un espejo con geometría parabólica refleja de manera paralela los rayos emitidos desde su foco, es decir, los rayos salen colimados, tal como se muestra en la Figura 2.6.

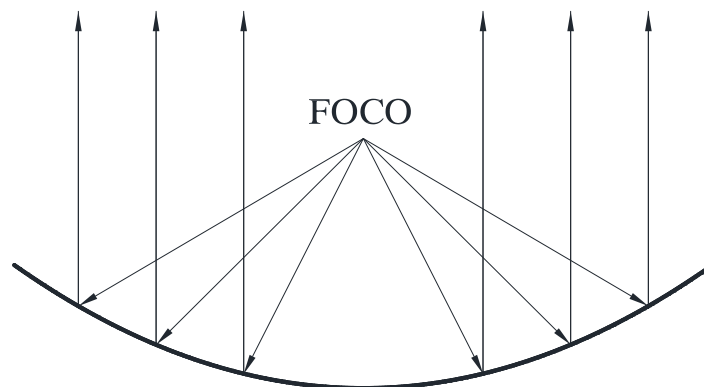


Figura 2.6. Salida de rayos colimados desde el foco de un espejo con perfil de parábola.

La base principal de los concentradores en general, es su diseño parabólico, dado que la forma parabólica tiene la propiedad de que los rayos que ingresan de forma normal a la superficie parabólica, convergen en el mismo punto focal como se ve en la Figura 2.7.

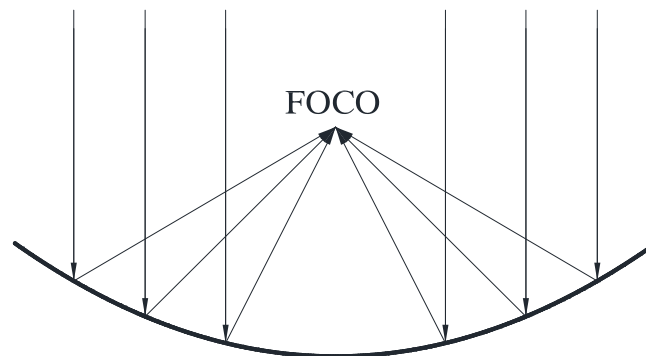


Figura 2.7. Rayos entrando de forma normal a la superficie parabólica.

Una de las características de los concentradores solares, es que no se aprovecha la radiación difusa debido a que sólo la radiación directa entra de forma normal a la superficie reflectora, condición necesaria para que los rayos se dirijan hacia el foco de la parábola, Esto se logra empleando sistemas de seguimiento solar; el hecho de que sea puntual o lineal, nos dice los grados de libertad del mecanismo del sistema y por ende los ejes que se deben de mover. Por lo tanto si es puntual quiere decir que el movimiento que se requerirá es de dos ejes y el lineal sólo un eje. Aunque en teoría todos deberían tener dos ejes, la complejidad del mecanismo puede dar pie a la abstención del segundo eje. La decisión de los ejes a mover se define de acuerdo al seguimiento diario, el cual se mueve el concentrador sobre un soporte móvil de manera que este sincronizado a la declinación solar y el otro al seguimiento del día, que proporciona la rotación del reflector de forma sincronizada con el movimiento del sol durante el día (Duffie&Beckman, 2013).

Los reflectores parabólicos con punto focal fijo, pueden concentrar el rayo de radiación paralelo a un punto para obtener alta temperatura, por lo que es uno de los principales métodos para producir calor de la energía solar. Como la luz del sol no estrictamente un rayo paralelo, el reflector parabólico centrado, enfoca la luz para formar una pequeña imagen en el receptor. El error óptico del reflector amplía la imagen y reduce el rendimiento óptico del sistema. Es necesario conocer la influencia del error óptico en la dirección del rayo reflejado para calcular el rendimiento óptico del sistema (Huang W., Huang F., Hu .P & Chen Z., 2012).

Otro método de concentrar la radiación solar es el uso de los lentes de Fresnel, Este tipo de lentes son de vidrio o plástico, los cuales son tallados de tal manera que los rayos de luz al atravesar el lente, se comporten como cuando atraviesan lentes plano-convexas. Estos rayos de luz que deben llegar paralelos al eje óptico para que se concentren a la distancia focal de la lente. De la misma forma que los espejos con geometría parabólica, los rayos emitidos desde su foco y atraviesan el eje óptico de la lente, salen paralelos como en un tubo, es decir, colimados, En la Figura 2.8 se ilustra un esquema de cómo los rayos de luz se comportan al atravesar una lente plano convexa (izquierda) y una Lente de Fresnel (derecha), (Jaramillo, 2014).

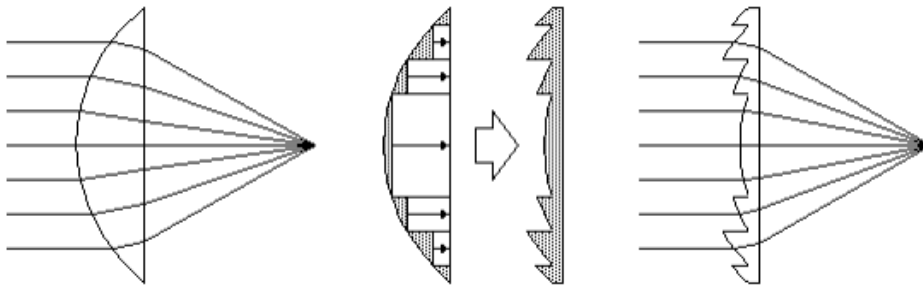


Figura 2.8. Comportamiento de los rayos en una lente de Fresnel.

Los espejos de Fresnel resultan más sencillos de fabricar que los de perfil parabólico, dentro de sus ventajas es que se encuentran ampliamente comercializados, y por ende, el costo del mismo se reduce; así mismo, la estructura del concentrador solar se vuelve ligera, teniendo como resultado la reducción de costos en la estructura y la reducción de potencia en los motorreductores que genera el seguidor solar.

En este sentido se han hecho bastantes prototipos para su investigación, dado que aún no están comercializados de modo masivo, por lo tanto no existe un comparativo como tal con otros concentradores.

Para obtener una eficiencia más óptima, se encuentran tres puntos importantes que son: el diseño óptico, el mecanismo del seguimiento solar y la eficiencia térmica del receptor.

Para esto el receptor, es la parte que genera el producto y determina la eficiencia total del sistema, por medio de la transferencia de calor se puede determinar la característica térmica de este.

### 2.3 TEORIA DE SEMICONDUCTORES COMO TRANSFORMADORES DE ENERGÍA

Ha sido interesante el estudio de las celdas solares ya que tienen la virtud de hacer una conversión de energía solar a energía eléctrica. No obstante, se tiene que el uso de este recurso presenta sus limitantes, implicando de carácter necesario, una investigación continua de los materiales que se requieren para la operación de este tipo de sistemas, todo esto para que su uso resulte con eficiencias cada vez mayores.

El primer reporte del efecto fotovoltaico fue en 1939 por Edmund Bequerel, este observó que la acción de los rayos de luz sobre un electrodo de platino recubierto de plata e inmerso en un electrolito, había producido una corriente eléctrica. Cuatro décadas después, se crearon los primeros dispositivos de estado sólido con el efecto fotovoltaico, esto fue ocasionado en el reciente descubrimiento de la fotoconductividad del Selenio y fueron construidos estos dispositivos durante la investigación de este descubrimiento. Para el año de 1894, Charles Fritts hizo un arreglo de lo que sería probablemente un de las primeras celdas solares con gran superficie, haciendo presión a una capa de Selenio con oro y otro metal, (Nelson, 2003). A esta tecnología creada por Charles Fritts, se conoce como celdas fotovoltaicas.



El objetivo de las celdas solares es la de convertir la energía solar a energía eléctrica de forma directa, con el propósito de suministrar esta energía a la red eléctrica. Existen tecnologías fotovoltaicas relativamente nuevas, estas han mostrado un aumento en la eficiencia en la conversión de energía de las celdas solares, Las cuales están basadas en celdas multi-unión, dispositivos de desplazamiento para seguir el movimiento del sol y sistemas ópticos que apoyan en la concentración de energía solar.

Una celda fotovoltaica está basada en la teoría de los semiconductores, estos elementos tienen una conductividad eléctrica menor que un conductor metálico, pero por arriba de un aislante dependiendo de la temperatura a la cual se encuentre. Un error es el ver un semiconductor como algo que conduce a medias, sin embargo, la realidad de los semiconductores es que se pueden utilizar como conductores o como aislantes, según sea la necesidad de quien lo esté utilizando (McKelvey, 1991).

### 2.3.1 Semiconductores

#### 2.3.1.1 Semiconductores intrínsecos

El semiconductor es una sustancia cristalina que tiene una estructura de bandas de energía, en la que una banda de estados electrónicos, completamente llena a la temperatura cero llamada banda de valencia, se separa de otra que está totalmente vacía al cero absoluto llamada banda de conducción, por medio de una región angosta de energías prohibidas, llamada región prohibida o bien banda de energía prohibida (aunque según el autor se le puede encontrar con otro nombre), a esta temperatura el semiconductor se comporta como un aislante dado que no existen electrones en la banda de conducción como se puede observar en la Figura 2.9, (McKelvey, 1991).

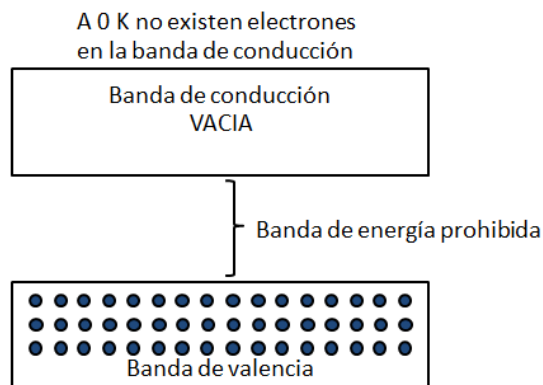


Figura 2.9. A cero absoluto el semiconductor actúa como un aislante.

Un electrón con suficiente energía térmica puede saltar de la banda de valencia a la banda de conducción. Al elevar la temperatura algunos enlaces covalentes se rompen, creando como consecuencia a la ruptura, electrones libres de desplazamiento bajo el influjo de un campo eléctrico externo. Al tiempo de la ruptura del enlace covalente se crea un espacio eléctricamente positivo en

la estructura de la valencia llamado hueco, (McKelvey, 1991). Un ejemplo se muestra en la Figura 2.10.

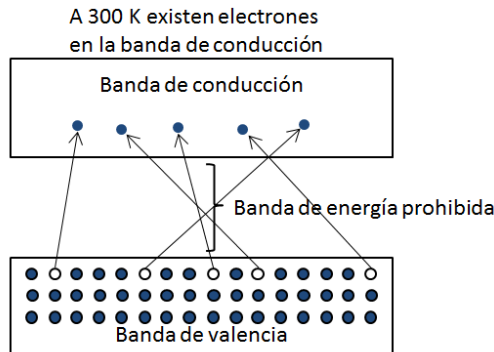


Figura 2.10. A 300 K el semiconductor tiene la capacidad de conducir bajo el influjo de un campo eléctrico externo.

De esta manera se crea un par de portador electrón-hueco. Este mecanismo se le llama generación de pares y siempre dependerá de la temperatura. Lo inverso, el regreso de un electrón a la banda de valencia, eliminando el par electrón-hueco, se le llama recombinación de pares, siendo éste un mecanismo de tipo estadístico, ya que siempre dependerá del número de electrones y de huecos. La recombinación y la generación son mecanismos antagónicos, así con la densidad de electrones  $n$  y la densidad de los huecos  $p$  en equilibrio, se establecerá cuando las tasas de generación y de recombinación sean iguales, y en este caso es cuando  $n = p$ , y a su vez será igual al número de pares ( $n_i$ ) que dependen de la temperatura ( $T$ ), entonces se puede decir:

$$n = p = n_i(T) \quad \text{ec. 2.5}$$

Pudiéndose observar en la Figura 2.11

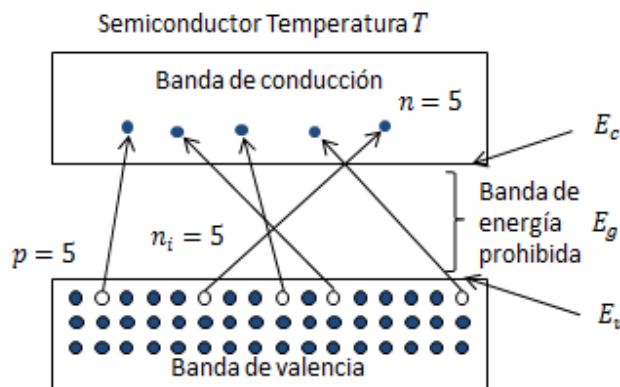


Figura 2.11. Ejemplo cualitativo de la igualdad entre electrones, huecos y pares portadores.

Donde se puede deducir la ec. 2.6

$$(n)(p) = n_i^2 \quad \text{ec. 2.6}$$

Donde la densidad de portadores intrínsecos  $n_i$ , se puede calcular con la ec. 2.7

$$n_i = 2 \left( \frac{2\pi kT}{h^2} \right)^{3/2} (m_n^* \cdot m_p^*)^{3/4} e^{\left( \frac{-E_g}{kT} \right)} \quad ec. 2.7$$

$k \rightarrow$  Constante de Boltzmann  $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

$T \rightarrow$  Temperatura absoluta [K]

$m_n^* \rightarrow$  masa efectiva de los electrones [ $m_e$ ]

$m_p^* \rightarrow$  masa efectiva de los huecos [ $m_e$ ]

$h \rightarrow$  Constante de Plank  $h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ J seg}$

(J. P. McKelvey, 1991, p. 292)

Esto sólo ocurre cuando el material es intrínseco, es llamado así al cristal del semiconductor en el que los huecos y los electrones se crean mediante una excitación térmica a través de la banda prohibida de energía. Conforme los electrones libres saltan a la banda de conducción, se crea la capacidad de conducir los electrones, a esto se le llama conductividad  $\sigma$ , pudiéndose calcular con la ec. 2.8

$$\sigma = qn_i(\mu_n + \mu_p) \quad ec. 2.8$$

Dónde

$\sigma \rightarrow$  Conductividad Eléctrica [ $1/cm \cdot \Omega$ ]

$q \rightarrow$  carga del electrón [C]

$\mu_n \rightarrow$  Movilidad de los electrones [ $cm^2/V \cdot s$ ]

$\mu_p \rightarrow$  Movilidad de los huecos [ $cm^2/V \cdot s$ ]

$n_i \rightarrow$  concentración intrínseca [ $port/cm^3$ ]

Los portadores intrínsecos son los electrones y los agujeros que participan en la conducción, y la concentración de estos portadores depende de la temperatura y del espacio de la banda prohibida del material, estos dos parámetros afectan la conductividad del material, en la Figura 2.12 se representa de manera gráfica el comportamiento de los aislantes, semiconductores y conductores. El nivel de Fermi es el nivel de energía con probabilidad  $\frac{1}{2}$ . Para semiconductores intrínsecos el nivel de Fermi está ubicado aproximadamente a la mitad de la banda prohibida. Para semiconductores extrínsecos cambia de posición según el tipo de impureza.

La probabilidad de que un estado determinado con energía  $E$ , esté ocupado por un electrón es igual a  $f(E)$ , siendo la fracción de estados con esa energía, conocida como factor de Fermi (distribución de Fermi-Dirac), entonces la probabilidad de que están ocupados los estados está dada por la ec. 2.9:

$$f(E) = \frac{1}{e^{(E-E_F)/kT} + 1} \quad ec. 2.9$$

Siendo:

$E \rightarrow$  Energía del sistema

$E_F \rightarrow$  Energía de Fermi  $E_F = E_i = \frac{E_v + E_c}{2} = E_v + \frac{E_g}{2}$

En caso de tomarse en cuenta la masa de los huecos y electrones se tiene con la ec. 2.10

$$E_F = E_i = E_v + \frac{E_g}{2} + \frac{3}{4} kT \ln \frac{m_p}{m_n} \quad ec. 2.10$$

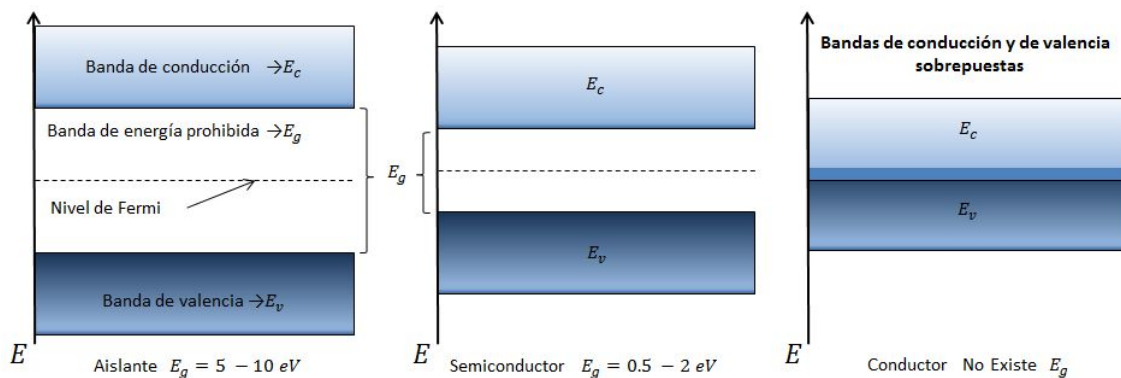


Figura 2.12. Ancho aproximado de la banda de energía prohibida para Aislante, Semiconductor y Conductor.

La energía de la banda prohibida ( $E_g$ ) es la cantidad de energía mínima para que un electrón pase de la banda de valencia a la banda de conducción, en un semiconductor y se precisa como la diferencia de la energía entre la banda de conducción ( $E_c$ ) y la energía de banda de valencia ( $E_v$ ), y está dada en electronvoltio [eV] y se especifica con la ec. 2.11

$$E_g = E_c - E_v \quad [eV] \quad ec. 2.11$$

El electronvoltio es una unidad de medida que representa la variación de energía cinética que experimenta un electrón al moverse desde un punto de potencial  $V_a$  hasta un punto de potencial  $V_b$  cuando la diferencia de potencial  $V_{ba} = 1V$ , que equivale a la carga del electrón ( $1.602176565 \times 10^{-19}C$ ) multiplicado por la diferencia de potencial  $V_{ba}$ , la cual da  $1.602176565 \times 10^{-19}J$ , por lo tanto  $1.602176565 \times 10^{-19}J = 1eV$ , (McKelvey, 1991).

En la Tabla 2.1 se muestran los valores de  $E_g$  de algunos semiconductores

Material	Energía Prohibida (eV)
Si	1.12
Ge	0.66
GaAs	1.42

Tabla 2.1. Energía Prohibida

Los semiconductores según la tabla periódica son siete, teniendo al final de su configuración electrónica el tipo “p”, estos son el Boro, Silicio, Germanio, Arsénico, Antimonio, Telurio y el Polonio, los más utilizados e investigados son el Silicio y el Germanio que tienen una característica muy particular al tener un número de valencia 4, con la cual pueden formar numerosos enlaces covalentes de la misma manera que el Carbono. Tienen una red cristalina donde sus enlaces covalentes tienen el orbital completo con ocho electrones en su último nivel, tal como se observa de manera cualitativa en la Figura 2.13.

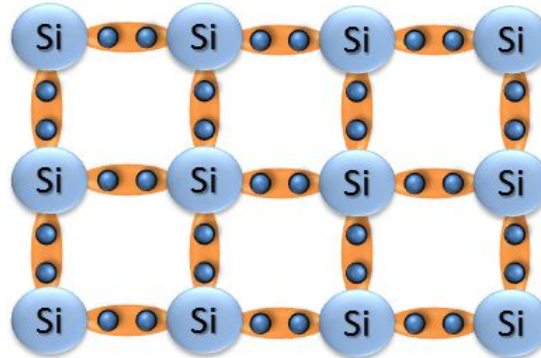


Figura 2.13. Enlace covalente en el Silicio sin impurezas

Así mismo, cuando se eleva la temperatura de la red cristalina, el enlace covalente se rompe, y varios electrones que pertenecen a la banda de valencia se liberan de la atracción que ejerce el núcleo del átomo, estos electrones libres saltan a la banda de conducción, en la cual se pueden desplazar libremente de un átomo a otro dentro de la estructura cristalina cuando exista un campo eléctrico. En la Figura 2.14 se observa de manera cualitativa la generación de hueco-electrón en una estructura cristalina de Silicio.

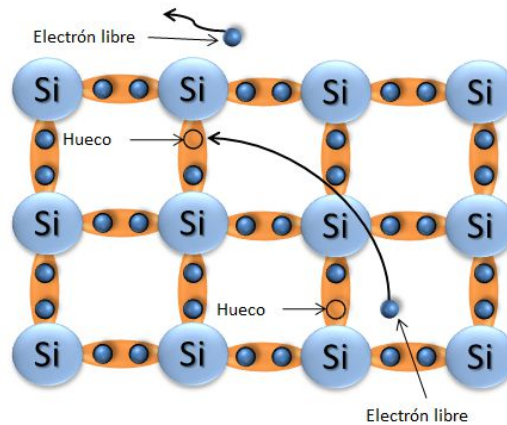


Figura 2.14. Enlace covalente en el Silicio con enlace roto.

El proceso que se describe de forma esquemática es una versión bidimensional de lo que en realidad es una red tridimensional de enlaces tetraédricos. La excitación de un electrón deja un hueco localizado en la estructura del enlace covalente del cristal, que se puede identificar como un estado de banda de valencia que podría ser ocupado por un electrón. Tanto el electrón libre como el hueco son migratorios; el electrón libre puede desplazarse dentro del cristal de forma aleatoria,

estimulado por la energía térmica que vaya adquiriendo la propia red. Del mismo modo, el hueco puede desplazarse porque un electrón de un enlace covalente adyacente al hueco puede moverse con suma facilidad hacia el hueco, pero transfiriendo la ubicación del hueco al sitio de dónde provino el electrón. Los electrones libres y huecos se moverán en respuesta a un campo eléctrico y puede dar origen a una corriente macroscópica que fluye por el cristal. Cuando la banda de conducción y la banda de valencia se someten a una fuerza  $E$ , los electrones libres se mueven hacia la izquierda produciendo un flujo convencional a la derecha, y el hueco se desplaza hacia la derecha al sitio donde provino éste electrón; este este proceso se puede repetir y el resultado neto es una transferencia neta de un electrón hacia la izquierda que va acompañada del movimiento del hueco hacia la derecha, es decir, en la dirección en que la partícula de carga positiva se movería bajo la influencia de un campo aplicado. La corriente neta de electrones hacia la izquierda da origen nuevamente a un flujo convencional de corriente hacia la derecha que puede representarse como una corriente de huecos positivos en tal dirección, así pues, el flujo de la corriente puede deberse tanto al movimiento de los electrones libres como a la migración de electrones de valencia dentro y fuera de estados de vacío de la banda de valencia, que se puede considerar mejor como la migración de huecos positivos (J. P McKelvey, 1991). En la Figura 2.15 se muestran los flujos cuando se aplica un campo eléctrico en la dirección que se indica.

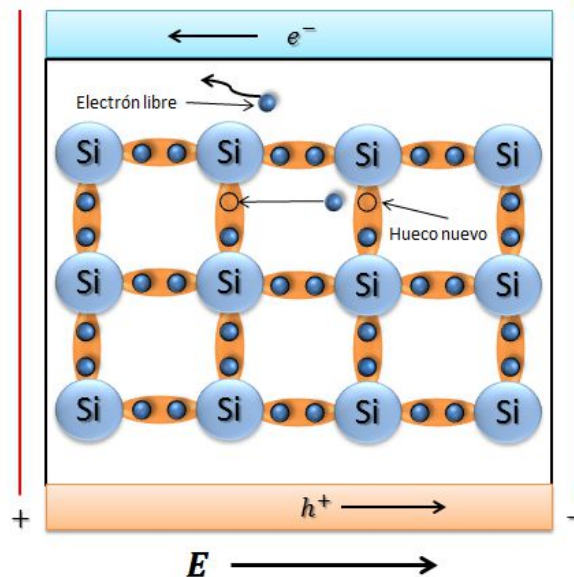


Figura 2.15. Flujo de electrones y huecos cuando se le aplica un campo eléctrico.

### 2.3.1.2 Semiconductores extrínsecos

Los semiconductores extrínsecos son semiconductores intrínsecos que contienen impurezas controladas, y se obtienen mediante un proceso que se conoce como dopaje, para esto se introducen pequeñas cantidades de sustancias que normalmente se pueden encontrar en los grupos *III* o *V* de la tabla periódica, En función de la sustancia (dopante) utilizado se pueden obtener semiconductores tipo *p* (positivos) o semiconductores tipo *n* (negativos).

Los átomos del grupo *V* tienen cinco electrones de valencia, cuatro de ellos se usan para formar enlaces covalentes con átomos circunvecinos del semiconductor y el quinto se enlaza al átomo de impureza sólo mediante fuerzas electrostáticas que tienden a ser muy débiles, pudiéndose ionizar con cierta facilidad mediante la agitación térmica de la red a temperaturas ordinarias para proporcionar una conducción electrónica adicional.

En la Figura 2.16 se muestra la red cristalina con un dopaje con Arsénico (As) del grupo *V* con el silicio, en la cual existen más electrones de carga negativa que huecos, por los tanto se tiene una ionización negativa, por tal motivo se denomina tipo *n* y se les conocen como donadores. La conductividad eléctrica que se genera con los átomos de impureza se le puede llamar conductividad de impureza.

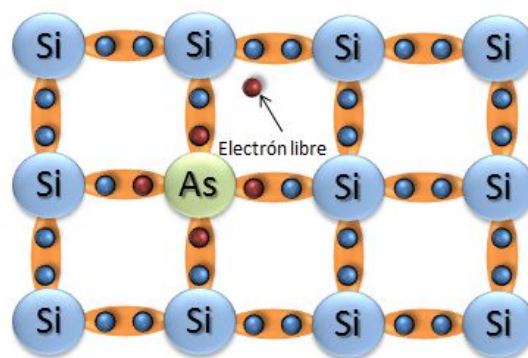


Figura 2.16. Átomo de Silicio dopado con Arsénico del grupo *V*.

Los átomos del grupo *III* tienen tres electrones de valencia, tres de ellos se usan para formar enlaces covalentes con átomos circunvecinos del semiconductor, pero el cuarto enlace siempre le hará falta un electrón y siempre existirá un hueco adicional, este hueco logra emigrar fácilmente debido a que un electrón del enlace covalente que se encuentre cerca emigra al sitio de la impureza. En cristales en los que dominan este tipo de impurezas se obtienen más huecos que electrones, y se pueden clasificar con receptores

En la Figura 2.17 se muestra la red cristalina con un dopaje con Indio (In) del grupo *III* con el silicio, en la cual existen más huecos de carga positiva que electrones, por los tanto se tiene una ionización positiva, por tal motivo se le denomina tipo *p*.

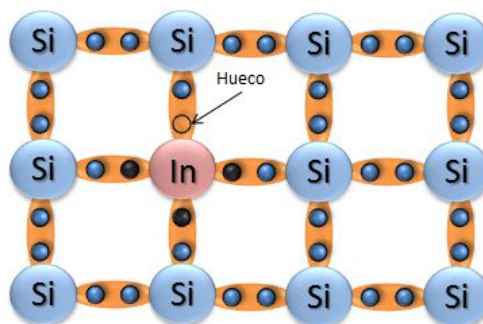


Figura 2.16. Átomo de Silicio dopado con Indio del grupo *III*.

La densidad de donadores  $N_D$  o de receptores  $N_R$ , vienen dada por la cantidad de átomos de impurezas que son adheridas al semiconductor, ya que son la cantidad de electrones o huecos que se generan al doparlos como se muestra en la Figura 2.17, además de los que se siguen generando por la energía térmica  $n_o$  y  $p_o$ .

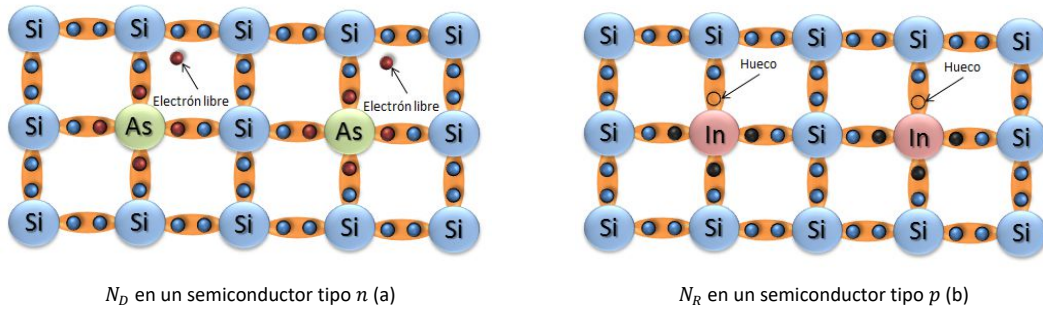


Figura 2.17. Densidades dadas por átomo de impureza.

En los semiconductores tipo  $n$ , los electrones son los portadores mayoritarios y por lo tanto  $N_D \gg N_R$  y  $N_D \gg n_i$ , por lo que se puede decir  $n_o \cong N_D$ . En los semiconductores tipo  $p$ , los huecos son los portadores mayoritarios y por lo tanto  $N_R \gg N_D$  y  $N_R \gg n_i$ , y a su vez  $p_o \cong N_R$ . La ley de acción de masas se cumple para semiconductores extrínsecos, el equilibrio térmico se sigue manteniendo, y se puede expresar con la ec. 2.12

$$n_o p_o = n_i^2 \quad \text{ec. 2.12}$$

La concentración de electrones libres  $n_o$  y huecos  $p_o$  en un semiconductor tipo  $n$  se obtiene con la ec. 2.13

$$n_o \cong N_D \quad \rightarrow \quad p_o \cong \frac{n_i^2}{N_D} \quad \text{ec. 2.13}$$

Y para un semiconductor tipo  $p$  se obtienen con la ec. 2.14

$$p_o \cong N_R \quad \rightarrow \quad n_o \cong \frac{n_i^2}{N_R} \quad \text{ec. 2.14}$$

El nivel de Fermi se desplaza debido a las impurezas, tal como se muestra en la Figura 2.18, esto permite que se utilice menos energía para el movimiento de los electrones o huecos, dado que las probabilidades de que existan electrones libres en la banda de conducción del tipo  $n$  es muy alta y en la del tipo  $p$  que existan huecos.

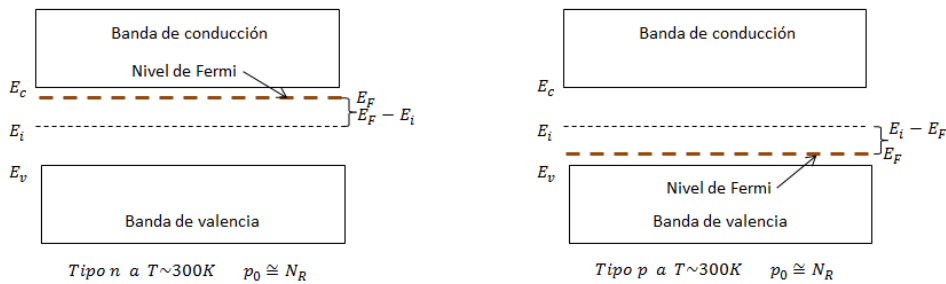


Figura 2.18. Desplazamiento del nivel de Fermi según el tipo de impureza.



Para efecto de calcular este desplazamiento se utiliza la ec. 2.15 para el tipo *n*

$$E_F - E_i = kT \ln \frac{n_0}{n_i} \cong kT \ln \frac{N_D}{n_i} \quad \text{ec. 2.15}$$

Y para el tipo *p* la ec. 2.16

$$E_i - E_F = kT \ln \frac{p_0}{n_i} \cong kT \ln \frac{N_R}{n_i} \quad \text{ec. 2.16}$$

A temperatura de 300K, los átomos se encuentran totalmente ionizados, como se puede observar en la Figura 2.19

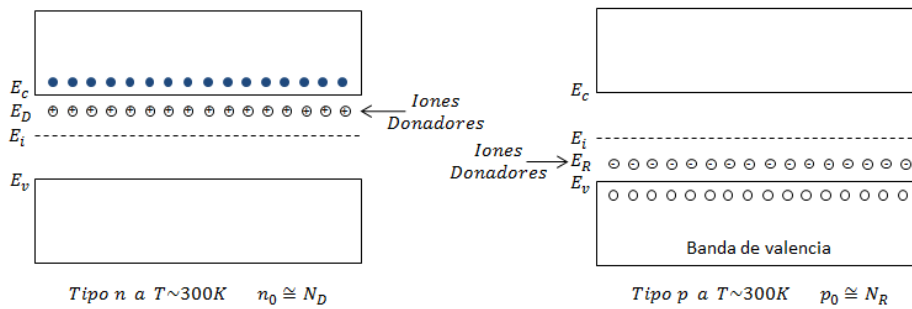


Figura 2.18. Átomos totalmente ionizados.

La ionización de los donadores y receptores termina a una temperatura de ionización  $T_{ion}$ , en el caso del tipo *n* cuando  $n_0 \cong N_D$ , volviendo a ser un comportamiento intrínseco a una temperatura crítica  $T_{cr}$ , esto es cuando  $n_i \cong N_D$ , entre estas dos temperaturas la conductividad permanece constante ya que varía proporcionalmente con respecto a *n* como se indica en la ec. 2.8, como se puede observar en la Figura 2.19, la temperatura tiene una gran influencia en el comportamiento de la conductividad, (J. P. McKelvey, 1991).

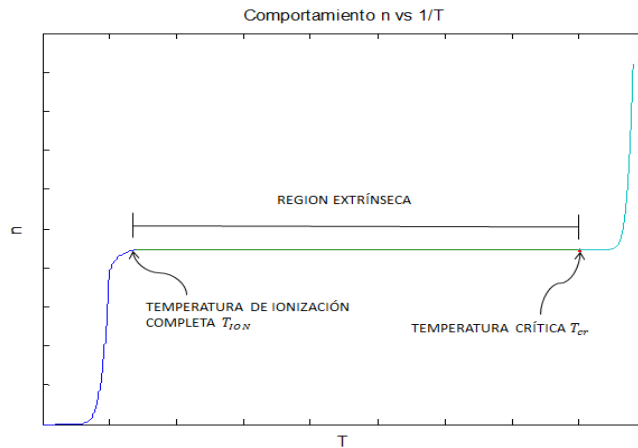


Figura 2.18. Átomos totalmente ionizados.

Esta gráfica se puede dividir en tres partes, la primera a bajas temperaturas, se parte de una situación de congelamiento electrónico, con bajo nivel de agitación térmica y los portadores generados son por el efecto de la ionización progresiva de las impurezas dopantes, en esta parte la

conductividad es proporcional a  $e^{-E_D/kT}$ , el mecanismo de mayor contribución a la conductividad es la parte extrínseca. Este comportamiento se termina cuando se llega a una temperatura donde se ionizan todas las impurezas ( $T_{ion}$ ), y se puede calcular por medio de la ec. 2.17

$$T_{ion} = \frac{E_D}{k \ln \frac{N_c}{N_D}} \quad ec \ 2.17$$

La segunda parte es un rango en el que las temperaturas no afectan a la conductividad, a este rango se le conoce como región extrínseca. Dado a que todas las impurezas han sido ionizadas, la concentración es básicamente las de las impurezas, cumpliendo que  $n \cong N_D$ , teniendo en cuenta que  $N_D$  no varía a menos que se le adhieran o se le quiten impurezas al semiconductor, es por esto que la conductividad para el tipo  $n$  se puede determinar mediante la ec. 2.18

$$\sigma = N_D q \mu_e \quad ec. 2.18$$

Para el tipo  $p$  con la ec. 2.19

$$\sigma = N_R q \mu_p \quad ec. 2.19$$

En la tercera parte se llega a una temperatura crítica  $T_{cr}$ , en la cual la conductividad se incrementa de forma notable, esto es por agitación térmica y a la concentración de portadores de carga que aumenta por la generación térmica de pares electrón-hueco. En esta parte la conductividad es proporcional a  $e^{-E_g/kT}$  el mecanismo de mayor contribución a la conductividad es la parte intrínseca. Este comportamiento empieza cuando  $n_i \cong N_D$ , la temperatura crítica se puede calcular por medio de la ec. 2.20

$$T_{cr} = \frac{E_g}{k \ln \frac{N_v N_c}{N_D^2}} \quad ec \ 2.20$$

La región extrínseca es la ideal para un comportamiento controlado de un semiconductor extrínseco, ya que representa una ventaja tecnológica para el control de la conductividad con respecto a la temperatura.

### 2.3.1.3 Unión $pn$

Cuando a un material semiconductor se le introducen impurezas de tipo  $p$  por un lado e impurezas de tipo  $n$  por el otro lado, se forma una unión  $pn$  la unión generada hace que los electrones libres de la región  $N$  más próximos a la región  $P$  se difunden a ésta, produciéndose la recombinación con los huecos más próximos de dicha región. En la región  $N$  se crean iones positivos y en la región  $P$  se crean iones negativos a esta difusión se le llama  $J_e$ , al establecerse estas corrientes aparecen cargas fijas en una zona a ambos lados de la unión llamada comúnmente zona de carga, En la Figura 2.19 se observa este fenómeno de manera esquemática.

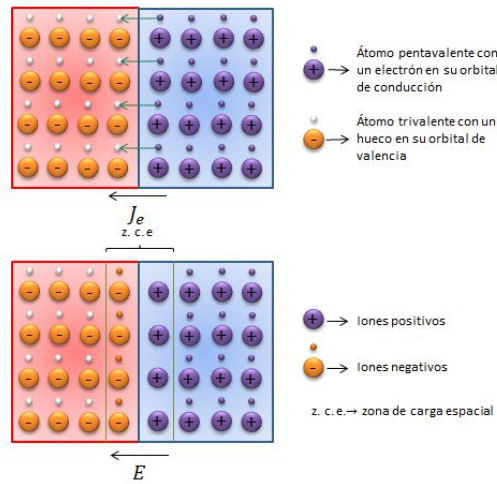


Figura 2.19. Difusión de los electrones libres creando z. c. e.

A medida que progresa el proceso de difusión, la zona de carga espacial va incrementando su anchura, profundizando en los cristales a ambos lados de la unión. Sin embargo, la acumulación de los iones positivos en la región N y de iones negativos en la región P, crea un campo eléctrico  $E$ , que actuará sobre los electrones que repele los huecos de la región P y los electrones de la región N alejándolos de la mencionada unión. Una unión *pn* no conectada a un circuito exterior queda bloqueada y en equilibrio electrónico a temperatura constante, (J. P McKelvey, 1991).

Este campo eléctrico es equivalente a decir que aparece una diferencia de tensión entre las zonas p y n. Esta diferencia de potencial ( $V_0$ ) es de 0,7 V en el caso del silicio y 0,3 V si los cristales son de germanio. ([https://es.wikipedia.org/wiki/Uni%C3%B3n\\_PN](https://es.wikipedia.org/wiki/Uni%C3%B3n_PN)).

*Polarización directa*

Si se polariza la unión *pn* con un campo eléctrico en sentido directo, es decir, el polo positivo de la fuente al cristal P polo negativo al cristal N, si la tensión de la fuente contrarresta la zona de carga espacial, la desbloquea y aparece una circulación de electrones, como se muestra en la Figura 2.20.

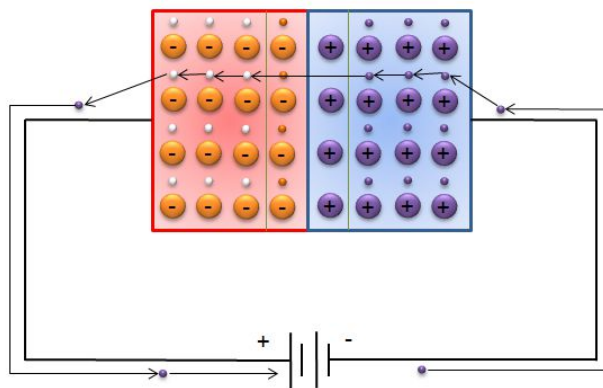


Figura 2.20. Polarización directa

En estas condiciones se observa que:

- El polo negativo de la batería repele los electrones libres del cristal  $N$ , con lo que estos electrones se dirigen hacia la unión  $pn$ .
- El polo positivo de la batería atrae a los electrones de valencia del cristal  $P$ , esto es equivalente a decir que empuja los huecos hacia la unión  $pn$ .
- Cuando la diferencia de potencial entre los bornes de la batería es mayor que la diferencia de potencial en la zona de carga espacial, los electrones libres de la región  $N$ , adquieren la energía suficiente para saltar a los huecos de la región  $P$ , los cuales previamente se han desplazado hacia la unión  $pn$ .
- Una vez que un electrón libre de la región  $N$  salta a la región  $P$  atravesando la zona de carga espacial, cae en uno de los múltiples huecos de la región  $P$  convirtiéndose en electrón de valencia. Una vez ocurrido esto el electrón es atraído por el polo positivo de la fuente y se desplaza de átomo en átomo hasta llegar al final del cristal  $P$ , desde el cual se introduce en el conductor y para llegar a la fuente.
- El flujo de electrones se mantiene gracias a la fuente que los traslada por el circuito exterior circulando con el sentido eléctrico real, que es contrario al convencional establecido para la corriente eléctrica.

### *Polarización inversa*

Si se polariza la unión  $pn$  en el sentido inverso, es decir, el polo positivo al cristal  $N$  y el polo negativo al cristal  $P$ , la tensión de la fuente ensancha la zona de carga espacial, produciendo un aumento de iones negativos en la región  $P$  y también el aumento de iones positivos en la región  $N$ , impidiendo la circulación de electrones y huecos a través de la unión, este comportamiento se puede observar en la Figura 2.21.

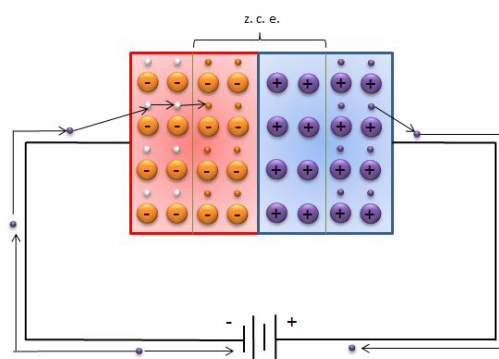


Figura 2.21. Polarización inversa.

- El polo positivo de la fuente atrae a los electrones libres de la región  $N$ , los cuales salen del cristal  $N$  y se introducen en el conductor dentro del cual se desplazan hasta llegar a la batería. A medida que los electrones libres abandonan la región  $N$ , los átomos pentavalentes que antes eran neutros, al verse desprendidos de su electrón en el orbital

de conducción, adquieren estabilidad, y una carga eléctrica neta de +1, con lo que se convierten en iones positivos.

- El polo negativo de la fuente cede electrones libres a los átomos trivalentes de la zona p, con lo que una vez que han formado los enlaces covalentes con los átomos de silicio, tienen solamente 7 electrones de valencia, siendo el electrón que falta el denominado hueco. El caso es que cuando los electrones libres cedidos por la fuente entran en la región P, caen dentro de estos huecos con lo que los átomos trivalentes adquieren estabilidad y una carga eléctrica neta de -1, convirtiéndose así en iones negativos.
- Este proceso se repite una y otra vez hasta que la zona de carga espacial adquiere el mismo potencial eléctrico que la fuente.
- En esta situación, la unión pn no debería conducir la corriente; sin embargo, debido al efecto de la temperatura se formarán pares electrón-hueco a ambos lados de la unión produciendo una pequeña corriente denominada corriente inversa de saturación  $I_0$ , un valor típico para  $I_0$  en Silicio es de  $10^{-12}$  A y para el Germanio  $10^{-6}$  A (Khan Academy, 2016).

La unión pn se comporta de una forma asimétrica respecto de la conducción eléctrica, ya que depende del sentido de la conexión el comportamiento, ya sea como un buen conductor o como un aislante.

### 2.3.2 Efecto fotovoltaico

La explicación correcta para el fenómeno fotoeléctrico fue descubierta por Einstein en el año 1905, y postulaba que un rayo de luz consiste en pequeños cuantos de energía hoy llamados “fotones”, y que el electrón sobre una superficie metálica absorbe la energía del fotón incidente, la cual es suficiente para que el electrón escape del metal en un proceso de todo o nada; la energía viene en cuantos, que vendría a corresponder a la más pequeña cantidad de energía que puede ser transferida en fenómenos físicos, por lo que el electrón absorbe toda la energía del fotón, ni más ni menos. La energía de un fotón es proporcional a su frecuencia  $\nu$ , tal como se aprecia en la ec. 2.21

$$E_{\text{fotón}} = h\nu \quad \text{ec. 2.21}$$

Donde  $h$  es la constante de Planck, cuyo valor es de  $6,626 \times 10^{-34}$  [Js] y  $\nu$  es la frecuencia,

$$\nu = c\lambda \quad \text{ec. 2.22}$$

que a su vez depende de  $c$ , la velocidad de la luz, cuyo valor es  $3 \times 10^8$  [m/s] y  $\lambda$  corresponde a la longitud de onda. (Maggi, 2013)

Un material o dispositivo tiene características fotovoltaicas cuando al exponerse a la luz, la que se absorbe por el material, es capaz de transformar la energía de los fotones en energía eléctrica, con la cual se obtiene una corriente y un voltaje, (Huerta & Mata, 2016). Para conseguir la extracción de corriente es necesario fabricar una unión pn que consiste en fabricar un semiconductor en el que

una zona sea de semiconductor tipo  $n$  y la otra zona de tipo  $p$ . Cuando la radiación luminosa en forma de fotones es absorbida por los semiconductores se generan, en exceso de su concentración en equilibrio, pares de portadores de carga eléctrica, electrones y huecos, los cuales deben de ser separados para poder usar la energía que cada uno representa. Estos portadores, generados por la energía de los fotones, viajan bajo un gradiente de concentración hacia la unión en donde son separados por efecto del campo eléctrico. (Chona & Robles, 2014)

La aparición del campo eléctrico en la celda (con la dirección del lado  $n$  al lado  $p$ ), separa los pares electrón-hueco y en estas condiciones se observa que:

- Los huecos, con cargas positivas, se dirigen hacia el contacto del cristal  $p$ , lo que provoca la extracción de un electrón desde el metal que constituye el contacto.
- Los electrones, con cargas negativas, se dirigen hacia el contacto del cristal  $n$  inyectándolos en el metal.

Esto hace posible el mantenimiento de una corriente eléctrica por el circuito exterior y en definitiva el funcionamiento de la celda como generador fotovoltaico y se observa su comportamiento en la Figura 2.22.

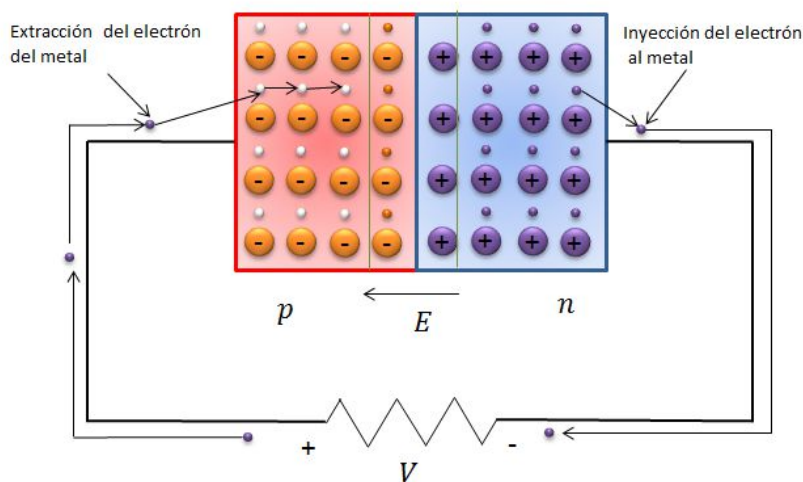


Figura 2.22. Efecto fotovoltaico.

### 2.3.3 Celda fotovoltaica

Una celda solar típica está compuesta de capas. Primero hay una capa de contacto posterior que se logra evaporando o pintando con metal la plancha y que suele cubrirla totalmente, luego van las dos capas de silicio (que crean la unión p-n). En la parte superior se encuentran los contactos de metal frontales con una capa de antirreflexión, que da a la celda solar su típico color azul o negro, estos forman solamente un patrón en forma de rejilla o de líneas finas de metal, ya que de otra

manera el metal impediría que la radiación solar llegara al silicio y no habría ninguna respuesta a los fotones de la luz incidente.

Ambos lados de una celda solar están eléctricamente conectados por un cable. Una corriente fluirá en el momento en que el fotón es absorbido. La celda solar genera, entonces, electricidad, que puede ser utilizada inmediatamente o almacenada en una batería. (Chona & Robles, 2014).

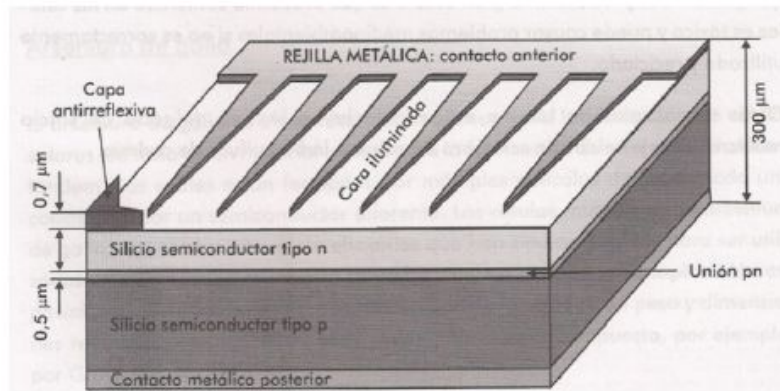


Figura 2.22. Efecto fotovoltaico. Fuente Energía Solar Fotovoltaica, México, Limusa 2010

Existen varios tipos de tecnologías para la fabricación de las celdas solares entre ellas están las más comerciales, tales como la monocristalinas, policristalinas.

#### Celdas monocristalinas

Esta es la tecnología que inició la revolución fotovoltaica. Originado en los años 50, los paneles solares monocristalinos son el sistema más viejo y más desarrollado hasta la fecha. Como su nombre indica, están hechas de un solo cristal de silicio puro. Los fabricantes utilizan el método de Czochralski para tirar lentamente de una sola semilla de cristal de silicio de silicio monocristalino fundido y formar un lingote. Una semilla de cristal es una pequeña pieza de silicona que se utiliza como base para las moléculas fundidas. Al proporcionar la infraestructura adecuada, las moléculas fundidas pueden conectarse para formar un lingote. Mientras se está preparando la semilla, la temperatura se baja gradualmente para ayudar a formar una forma cilíndrica (Escalona, 2017).

#### Celdas policristalinas

Las celdas solares policristalinas están formadas por múltiples cristales. En lugar de pasar por un proceso lento y muy costoso de crear un solo cristal, los fabricantes simplemente ponen una semilla de cristal en un molde de silicio fundido y permiten que se enfríe. Debido a este método de colada, el cristal que rodea la semilla no es uniforme y crece en múltiples cristales pequeños (Escalona, 2017).

En la tabla 2.2 se observan los tipos de tecnologías fotovoltaicas disponibles al 2009

Tabla 2.2 Algunos tipos de tecnología fotovoltaica (López, 2012)

TIPO DE TECNOLOGIA	DISPONIBILIDAD HASTA EL 2009
<p><b>Diseño en Homounión</b> <i>Silicio Cristalino</i></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Silicio monocristalino (gruesa)</li> <li>2. Silicio policristalino (gruesa)</li> <li>3. Silicio policristalino (delgada)</li> </ol>	<p><b>Disponibilidad actual</b></p> <p>Disponible comercialmente Disponible comercialmente Disponible comercialmente</p>
<p><b>Diseño en Heterounión</b> <i>Películas delgadas policristalinas</i></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. .Cobre-Indio-Galio-Diselenio</li> <li>2. Telurio de Cadmio.</li> <li>3. GaInP/GaAs</li> </ol> <p><i>Películas delgadas amorfas</i></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Silicio amorfo (a-Si)</li> <li>2. Heterounión con capa delgada Intrínseca (HIT) de a-Si</li> <li>3. Heterounión con capa delgada Intrínseca (HIT) de a-Si tipo bifacial</li> </ol>	<p><b>Disponibilidad actual</b></p> <p>Disponible comercialmente Disponible comercialmente Disponible comercialmente Aplicaciones espaciales. I &amp; D</p> <p>Disponible comercialmente</p> <p>Disponible comercialmente</p> <p>Disponible comercialmente</p>
<p><b>Diseño de unión múltiple</b> <i>Películas delgadas policristalinas y amorfas</i></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. a-SiC/a-Si</li> <li>2. a-Si/a-Si</li> <li>3. a-Si/a-SiGe</li> <li>4. a-Si:C/a-Si/a-SiGe</li> <li>5. a-Si/polí-Si</li> <li>6. GaAs/CuInSe<sub>2</sub></li> <li>7. GaAs/GaSb</li> <li>8. GaInP/GaAs/Ge</li> </ol>	<p><b>Disponibilidad actual</b></p> <p>Disponible comercialmente Bajo desarrollo Bajo desarrollo Disponible comercialmente Bajo desarrollo Bajo desarrollo Aplicaciones espaciales. I&amp;D Aplicaciones espaciales. I&amp;D</p>
<p><b>Celdas de concentración</b> <i>Unión simple</i></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. GaAs; m-Si</li> </ol> <p><i>CIGS Unión múltiple</i></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. GaInP/GaAs/Ge</li> <li>2. GaInP/GaInAs/Ge</li> </ol>	<p><b>Disponibilidad actual</b></p> <p>Celdas de laboratorio y de bajo desarrollo comercial</p> <p>Disponibilidad desde 10 W hasta sistemas arriba de los 100.0kW</p>
<p><b>Celdas Fotoquímicas</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Celdas con tinte rutenio/TiO<sub>2</sub>.</li> </ol> <p><b>Celdas orgánicas</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Polímero orgánico</li> </ol>	<p><b>Disponibilidad actual</b></p> <p>No disponible comercialmente; I&amp;D</p> <p>No disponible comercialmente; I&amp;D</p>



### 2.3.4 Modelado eléctrico de una celda fotovoltaica

El funcionamiento básico de una celda solar como se muestra en la Figura 2.23, donde se observa la excitación de la luz, la separación de las cargas, la migración y colección de las mismas. La curva de  $V$  vs  $I$  de una celda solar es de suma importancia para su caracterización, ya que representa las características eléctricas de salida que son el resultado de la conversión de luz.

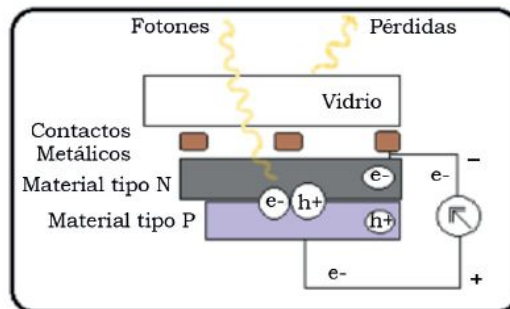


Figura 2.23. Funcionamiento básico de una celda solar. Fuente, (Huerta & Mata, 2016).

Dicha curva se puede obtener del modelo eléctrico ideal que tiene como elementos una fuente de corriente que representa la celda irradiada y un diodo que simboliza el comportamiento en la oscuridad, en la Figura 2.24 se observa un circuito de una celda fotovoltaica ideal.

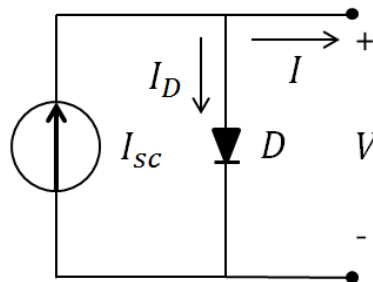


Figura 2.24. Modelo eléctrico ideal.

Por la ley de corrientes de Kirchoff, se puede deducir la ec. 2.23

$$I_{sc} = I + I_D \quad \text{ec. 2.23}$$

Donde

$I \rightarrow$  Corriente a la salida

$I_{sc} \rightarrow$  Corriente de corto circuito

$I_D \rightarrow$  Corriente del diodo

La corriente del diodo está dada por la ec. 2.24

$$I_D = I_0 \left[ e^{\left(\frac{qV}{\gamma kT}\right)} - 1 \right] \quad \text{ec. 2.24}$$

Donde

$I_0 \rightarrow$  Corriente de saturación de polarización inversa

$q \rightarrow$  Carga del electrón

$\gamma \rightarrow$  Factor de calidad del diodo,  $ideal = 1$

$k \rightarrow$  Constante de Boltzman

$V \rightarrow$  Voltaje de salida

$T \rightarrow$  Temperatura de la celda

Para la corriente de salida queda como se definió con la ec. 2.25

$$I(V) = I_{sc} - I_0 \left[ e^{\left( \frac{qV}{\gamma kT} \right)} - 1 \right] \quad ec. 2.25$$

A medida que se incrementa la irradiancia incidente, el resultado es una superposición entre los comportamientos de la celda bajo condiciones de oscuridad y luz; el circuito que se forma entre celdas experimenta pérdidas por conducción, las cuales son representadas por una resistencia en serie  $R_s$ , así también existen pérdidas provocadas por la condición de las celdas por agentes externos o de construcción, estas se representan por una resistencia en paralelo  $R_p$ . En la Figura 2.25 se muestra un circuito equivalente real de una celda solar.

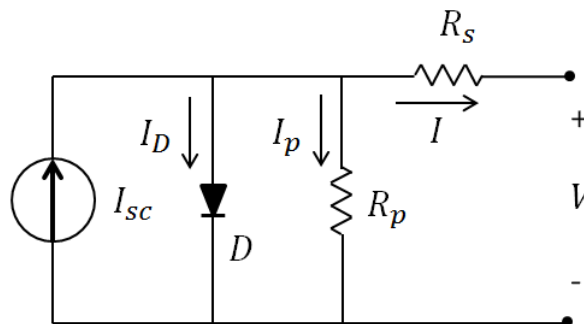


Figura 2.25. Modelo eléctrico real.

Por las leyes de Kirchhoff, se puede deducir la ec. 2.26

$$I = I_{sc} - I_D - I_p \quad ec. 2.26$$

Donde

$I \rightarrow$  Corriente a la salida

$I_{sc} \rightarrow$  Corriente de corto circuito

$I_D \rightarrow$  Corriente del diodo

$I_p \rightarrow$  Corriente de  $R_p$

Donde  $I_D$  ahora se calcula por medio de la ec. 2.27

$$I_D = I_0 \left[ e^{\left( \frac{q(V+IR_s)}{\gamma kT} \right)} - 1 \right] \quad \text{ec. 2.27}$$

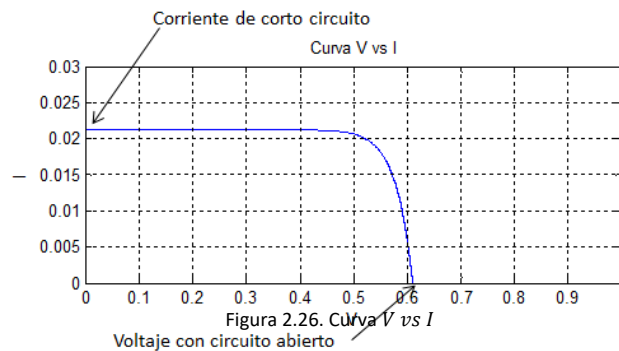
Donde  $V + IR_s$  es el voltaje en paralelo. Por medio de la ley de Ohm se obtiene la corriente que pasa por  $R_p$ , entonces  $I_p$  se obtiene por medio de la ec. 2.28

$$I_p = \frac{V + IR_s}{R_p} \quad \text{ec. 2.28}$$

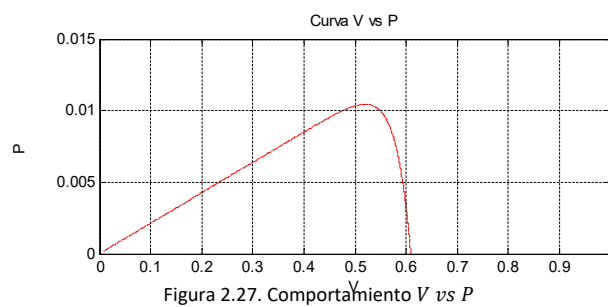
Entonces la ecuación para una celda fotovoltaica se puede calcular por medio de la ec. 2.29

$$I = I_{sc} - I_0 \left[ e^{\left( \frac{q(V+IR_s)}{\gamma kT} \right)} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad \text{ec. 2.29}$$

Y su grafica queda como se observa en la Figura 2.26



En esta curva los parámetros más importantes son la corriente de corto circuito  $I_{SC}$  y el voltaje en circuito abierto  $V_{oc}$ , además en base a este modelo eléctrico, existe la relación de la potencia eléctrica ( $P = VI$ ), el comportamiento de la Potencia con respecto al voltaje se observa la curva  $V$  vs  $P$  en la gráfica de la Figura 2.27,



La variación del voltaje respecto a la temperatura de la celda mediante la corriente de salida del panel, se puede observar en la Figura 2.28 que el voltaje a circuito abierto  $V_{oc}$  disminuye a medida que aumenta la temperatura y esto cuantifica numéricamente que a medida que la temperatura de la celda sea mayor, la potencia eléctrica de salida será menor.

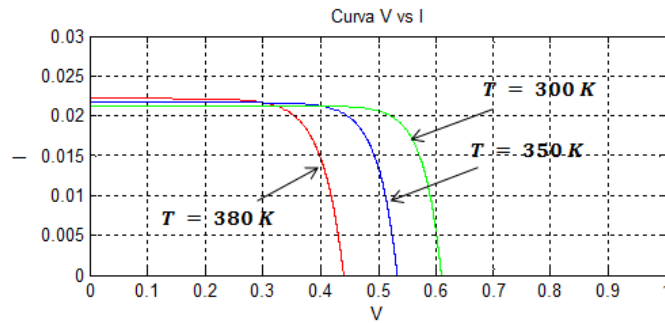


Figura 2.28. Comportamiento  $V$  vs  $I$  con respecto a la temperatura.

Esto también se puede observar en la curva  $V$  vs  $P$  en la gráfica de la Figura 2.29, donde se puede ver el cambio de la potencia máxima  $P_{MPP}$ , esta va disminuyendo a medida que la temperatura aumenta.

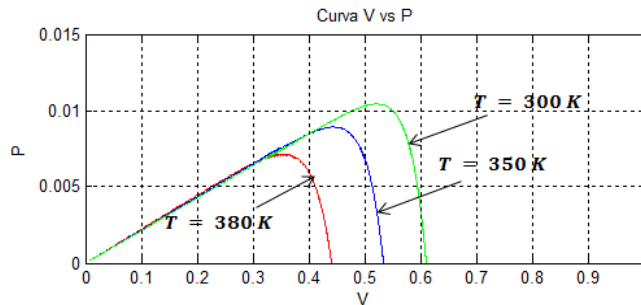


Figura 2.29. Comportamiento  $V$  vs  $I$  con respecto a la temperatura.

Las características típicas de una celda solar es común que se representen por medio de gráficas:  $V$  vs  $I$  y  $V$  vs  $P$ . En la Figura 2.30, se observan los puntos que caracterizan a una celda solar, tales como: la corriente de corto circuito ( $I_{SC}$ ), el voltaje de circuito abierto ( $V_{OC}$ ), el punto de máxima potencia (MPP), la corriente en el punto de máxima potencia ( $I_{MPP}$ ), el voltaje en el punto de máxima potencia ( $V_{MPP}$ ) y la potencia en el punto de máxima potencia ( $P_{MPP}$ ).

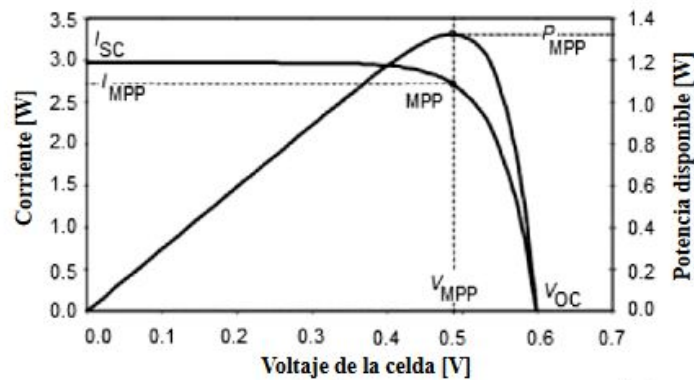


Figura 2.30. Características de una celda solar con curvas  $I - V$  y  $V - P$  Fuente: Granda-Gutiérrez, 2014

Estas características las proporciona el fabricante en su hoja de datos, así como su eficiencia  $\eta$ , factor de forma  $FF$ , coeficiente de temperatura de la corriente en corto circuito  $I_{SC} + \%mA/K$ ,

coeficiente de temperatura del voltaje en circuito abierto  $V_{oc} - \%mV/K$ , coeficiente de temperatura de la Potencia máxima  $P_{MM} - \%mW/K$ , (Granda-Gutiérrez, 2014).

### 2.3.5 Efecto Termoeléctrico

El primer fenómeno termoeléctrico fue descubierto en el año de 1821, y fue llamado efecto Seebeck en honor a su descubridor físico alemán Thomas Johann Seebeck, este efecto consiste en la aparición de una corriente eléctrica entre dos metales cuando existe una diferencia de temperatura y es utilizado para la generación de potencia termoeléctrica Figura 2.31a. Posteriormente, en el año de 1834, un relojero llamado Jean Peltier se dio cuenta de un segundo efecto, la creación de una diferencia de temperatura debida a un voltaje Figura 2.31b. Esto sucede cuando una corriente se hace pasar por dos metales o semiconductores conectados por dos juntas. La corriente propicia una transferencia de calor de una junta a la otra: una se enfría en tanto que otra se calienta. Finalmente en el año de 1854, William Thomson (después llamado Lord Kelvin), al estudiar los estos dos efectos, descubrió una relación entre ellos y además observó un tercer efecto, el transporte de calor cuando se establece una corriente eléctrica y un gradiente de temperatura en un material conductor Figura 2.31c. Cuando se sueldan dos materiales metálicos o semiconductores diferentes y mantenidos a distintas temperaturas en sus uniones, están también presentes el efecto Joule y el efecto Fourier.

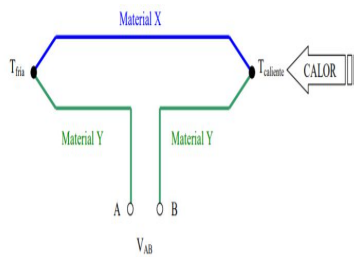


Figura 2.31a Efecto Seebeck

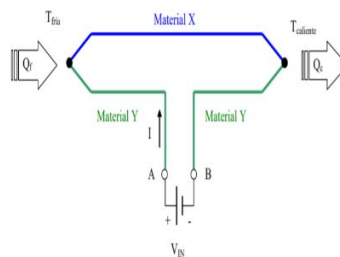


Figura 2.31b Efecto Peltier

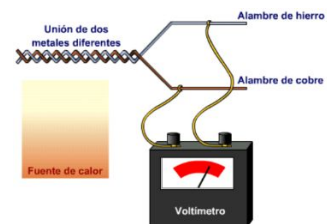


Figura 2.31c Efecto Thomson

FUENTE (Ayala, 2009), (Catalán, 2014)

El enfriamiento termoeléctrico empezó a ser factible a partir de los estudios de Telkes en los años 30 y de Lofee en 1956. Los nuevos materiales semiconductores irrumpían en la escena produciendo rendimientos mucho más altos. Telkes utilizó pares o soldaduras de PbS y ZnSb y Loffee descubrió el uso de PbTe y PbSe. Actualmente, se emplea fundamentalmente el bismuto-teluro como material semiconductor, fuertemente dopado para crear un exceso de electrones (tipo  $n$ ) o una deficiencia (tipo  $p$ ), (Platero, s.f.).

La tecnología de la refrigeración termoeléctrica está caracterizada por la flexibilidad de opciones que se ofrece en el diseño y fabricación de módulos termoeléctricos. Esta se presenta cuando se hace pasar una corriente eléctrica a través de uno o más pares de semiconductores de tipo  $n$  y  $p$ . Un refrigerador termoeléctrico es básicamente una bomba de calor que transfiere calor de un lado del dispositivo al otro en contra del gradiente térmico (de baja a alta temperatura) a costa de consumir energía eléctrica (Lindero, 2010). La corriente (con la polarización que se indica), pasa del

material semiconductor  $n$  al  $p$  como se muestra en la Figura 2.32; En esta figura se muestra que la dirección de los huecos y electrones es la misma, desde el punto de vista de las soldaduras superior e inferior, donde los electrones y huecos transportan el calor a la soldadura inferior (que en consecuencia se calienta), por lo tanto es el calor que se tiene que disipar; mientras que a la soldadura superior le absorben el calor, y al tratar de mantenerse en equilibrio térmico, lo tiene que extraer del ambiente.

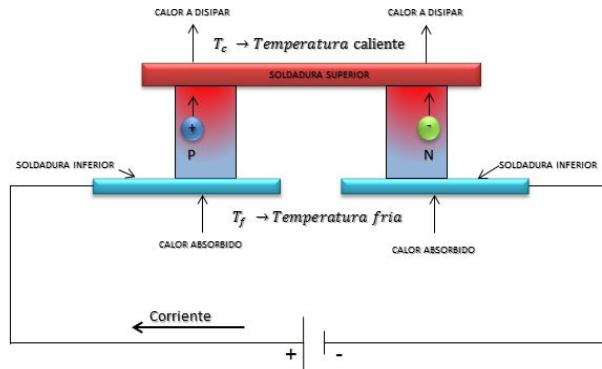


Figura 2.32. Huecos y electrones transportando calor, de una soldadura a otra con la polarización indicada.

Con la polarización contraria, se puede predecir que habrá cambio de dirección de transferencia de calor, ya que los huecos y electrones también cambiarían su dirección, cabe mencionar que este tipo de juntas no son una unión  $pn$  y no aplica el comportamiento como diodo, por lo tanto en los termoelectrónicos no existe la llamada polarización inversa, esto es porque los semiconductores operan como conductores, ya sea de electrones o de huecos. El comportamiento con la polarización contraria se muestra en la Figura 2.33.

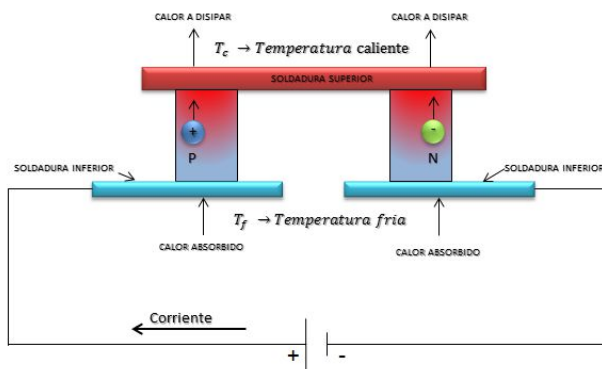


Figura 2.33. Huecos y electrones transportando calor de una soldadura a otra con la polarización indicada.

Cuando dos semiconductores distintos se ponen en contacto (soldadura) aparece una diferencia de potencial ( $V$ ), debida a que los electrones libres de uno de los semiconductores tienen más energía que los del otro. Cuando se hace pasar una corriente eléctrica por la soldadura, y la dirección de la corriente es contraria a la diferencia de potencial, los electrones tienen que ganar energía y lo extraen de los metales enfriando la soldadura. Mientras que si es a favor los electrones pierden energía cediéndola a la soldadura que se calienta (Lindero, 2010).

*Fenómenos y efectos que relacionan a la Celda Peltier para su desempeño termoeléctrico.*

Se tiene que tener en cuenta los fenómenos físicos, efectos y las leyes que rigen en el interior y exterior de la celda Peltier, para obtener un estudio de su comportamiento, el primero de ellos el llamado efecto Seebeck, el cual se encontró, el voltaje producido por una diferencia de temperatura, es proporcional a la diferencia de temperatura entre los dos materiales y esta constante de proporción fue nombrada el coeficiente Seebeck y se relaciona con la ec. 2.29, (Duque, 2013).

$$V = \alpha_{AB}(T_c - T_f) \quad \text{ec. 2.29}$$

$V \rightarrow$  Voltaje

$\alpha_{AB} \rightarrow$  Coeficiente Seebeck relacionando los dos materiales  $\rightarrow \alpha_B - \alpha_A$

$T_c \rightarrow$  Mayor temperatura

$T_f \rightarrow$  Menor temperatura

Después Peltier con su descubrimiento, obtuvo que el flujo de calor era proporcional a la corriente que circulaba, multiplicada por una constante llamada constante de Peltier ( $\pi$ ), como se muestra en la ec. 2.30

$$Q = I\pi_{AB} \quad \text{ec. 2.30}$$

$Q \rightarrow$  Flujo de calor

$I \rightarrow$  Corriente

$\pi_{AB} \rightarrow$  Coeficiente Peltier relacionando los dos materiales  $\rightarrow \pi_B - \pi_A$

Aunque diversas fuentes de informaciones afirman que tanto la constante de Seebeck como la constante de Peltier, no pudieron ser medibles hasta que Thomson halló la relación entre ellos, la cual la se definiría mediante la ec. 2.31

$$\pi = \alpha T \quad \text{ec. 2.31}$$

$\pi \rightarrow$  Coeficiente Peltier

$\alpha \rightarrow$  Coeficiente Seebeck

$T \rightarrow$  Temperatura

Con este término encontró que el flujo de calor que se crea a través de la celda Peltier, era relacionando el voltaje aplicado con la corriente producida, y esto llevó a la relación que muestra la ec. 2.32

$$Q = I\pi_{AB} = I\alpha_{AB}(T_c - T_f) = IV \quad \text{ec. 2.32}$$

Hay una serie de fenómenos físicos a tener en cuenta durante el estudio de las celdas Peltier, incluyendo los efectos Seebeck-Peltier y Thomson, pero también algunos más elementales como el efecto Joule y la ley de Ohm, (Duque, 2013).



### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 DISEÑO MECÁNICO

En este trabajo se tuvo la necesidad de elaborar un diseño mecánico de un concentrador con un lente de Fresnel, con el objetivo de crear un banco de prueba fidedigno de un módulo, que representa una unidad de nueve de un concentrador solar que utiliza lentes de Fresnel, esto para obtener las mediciones de temperatura necesarias para visualizar el comportamiento de este tipo de sistemas.

Este diseño debe exhibir una configuración que represente una construcción que sea sencilla y flexible, la operación intuitiva y mantenimiento fácil de realizar. Para tal efecto se dispuso de ciertos criterios para la elaboración del diseño, por lo tanto el diseño debía:

- Contener un lente tipo Fresnel solar application silicon cpv modelo CP220-280 con una concentración de 500 soles, con una medida comercial de 280mmX280mm (características en Anexo A, Fichas de datos).
- Fabricarse con materiales y tecnologías de manufactura comerciales, para que el diseño se pueda duplicar en caso de ser necesario.
- Ser flexible para asegurar una concentración óptima.
- Ser modular para futuras adaptaciones que pudieran optimizar el sistema de concentración solar.
- Presentar características funcionales para las condiciones requeridas a la intemperie.

##### *3.1.1. Configuración del diseño mecánico*

Al analizarse diferentes configuraciones para este diseño, se pudo concretar la configuración mecánica final del banco de prueba, tomando en cuenta los criterios establecidos, con una configuración que puede ser optimizada (en caso de tener la necesidad de reproducirla en serie para concentrador solar y no como banco de prueba), dimensiones que cubren la necesidad de concentración solar, confiabilidad estructural, todo esto con materiales que se pueden conseguir fácilmente en el mercado.

Este sistema tiene como componentes principales:

- Un sistema de enfriamiento por medio de una celda Peltier modelo TEC1-12706 (características ver anexo A, Fichas de datos) que puede ser acoplada a una celda fotovoltaica de concentración por ejemplo "*Concentrator Triple Junction Solar Cell tipo 3C44-10X10mm*" (características ver Anexo A, Fichas de datos) y la estructura que funciona como disipador.
- Un esqueleto que conforma el soporte del sistema de concentración, que contiene al lente de Fresnel y la adaptación del sistema de enfriamiento.
- El soporte del mecanismo que se utiliza para seguimiento del ángulo que tiene el sol a lo largo del día (ángulo Azimuth).
- El soporte del mecanismo que se utiliza para seguimiento de la altura, representada en ángulo, que tiene el sol a lo largo del día (ángulo Zenith).
- La base del banco de prueba.

Esto se muestra en el ensamble de la Figura 3.1. (Completo en el Anexo B, Planos)

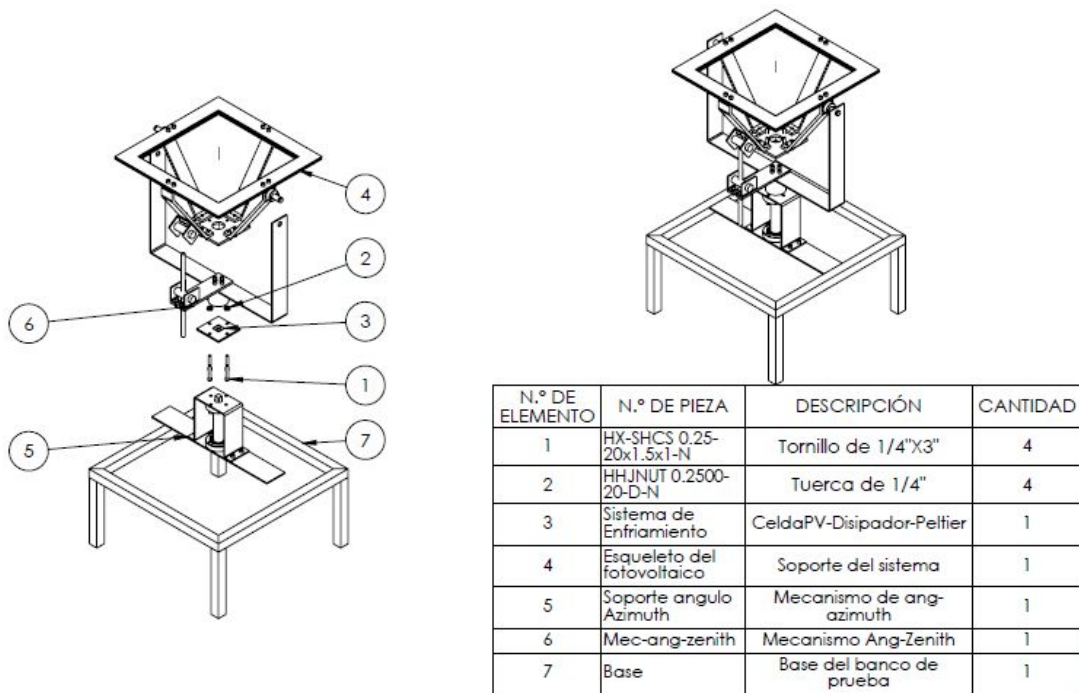


Figura 2.2 Ensamble y despiece general del banco de prueba.

El sistema de enfriamiento puede ser modificado de tal manera que puede ser acoplado bajo otro criterio de producción de frío, cabe mencionar que para esta tesis se presenta la opción del efecto termoeléctrico, como se puede observar en la Figura 3.2



Figura 3.2 Celda Peltier en el banco de prueba.

Teniendo en cuenta que la celda fotovoltaica (HCPV) se encontraría en la parte superior, en este caso se colocó un conductor de calor de aluminio para simular la transferencia de calor en la HCPV. Como se muestra en la Figura 3.3

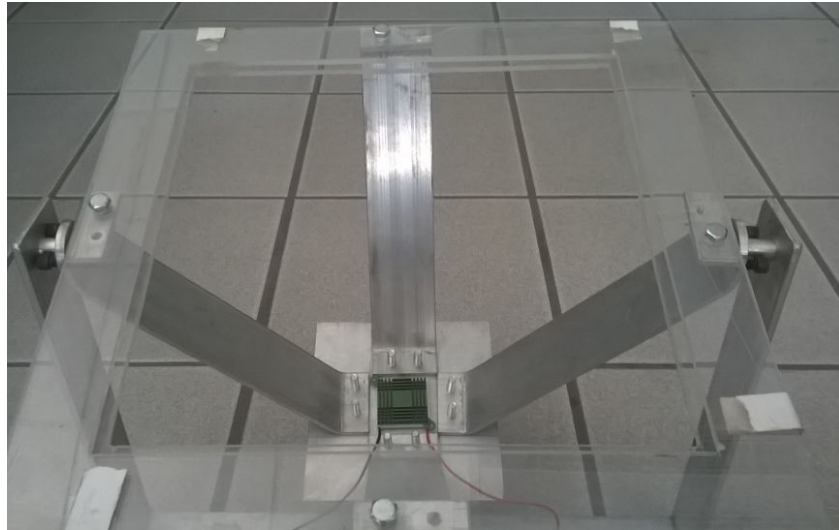
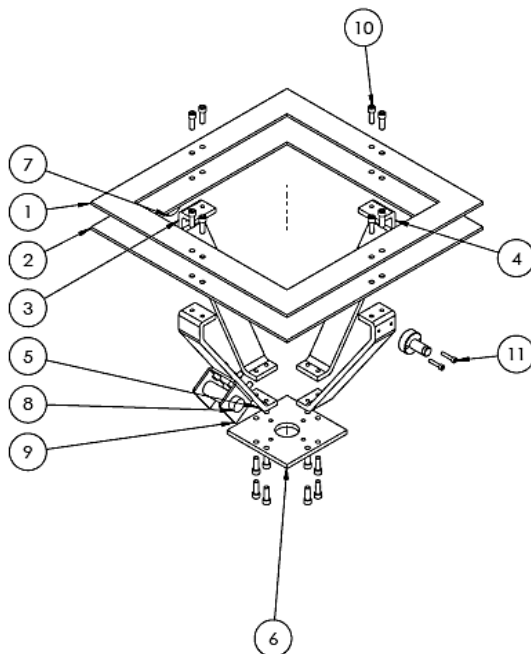


Figura 3.3 Celda Peltier con conductor de calor de aluminio en el banco de prueba.

El soporte que conforma el sistema de concentración, está compuesto de un lente de Fresnel, sobre dos marcos de acrílico cortados de tal manera que se encuentran escalonados, con soleras y placa de aluminio 6061, tal como lo muestra el despiece de la Figura 3.4.



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Acrílico	Bastidor Acrílico 1	1
2	Acrílico 2	Bastidor Acrílico 2	1
3	Soporte1	Soporte para giro	2
4	Soporte2	Soporte simple	1
5	SoporteZ	Soporte para mov. zenith	1
6	Base de soporte	Base del Soporte	1
7	Ejes	Eje	2
8	Ejezenith a tope	Eje para libre giro	1
9	Base sin ranura	Base sin ranura para mov. zenith	1
10	HX-SHCS 0.25-20x0.75x0.75-N	Tornillo de 1/4"X3/4"	20
11	B18.3.1M - 4 x 0.7 x 20 Hex SHCS - 20NHX	Tornillo milimétrico M4X20	4

Figura 3.4 Soporte para la concentración solar en el banco de prueba.

El mecanismo para el movimiento del ángulo azimuth, se conforma de barras, soleras y rodamientos para obtener ligereza en giro del eje, este eje puede ser acoplado con un motor que controle este movimiento, el mecanismo se muestra en la Figura 3.5.

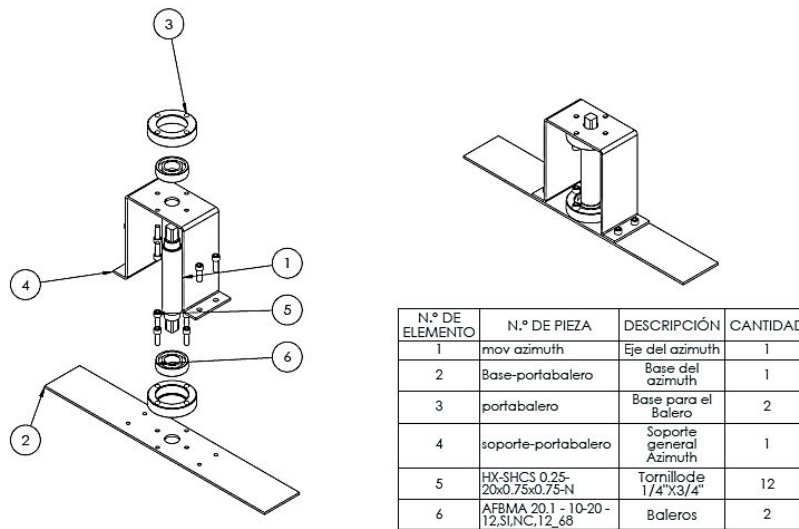


Figura 3.4 Mecanismo para el movimiento del ángulo azimuth en el banco de prueba.

El mecanismo para el movimiento del ángulo zenith, se conforma de sistema de giro por medio de un tornillo, este puede ser acoplado con un motor que controle este movimiento, el mecanismo se muestra en la Figura 3.5.

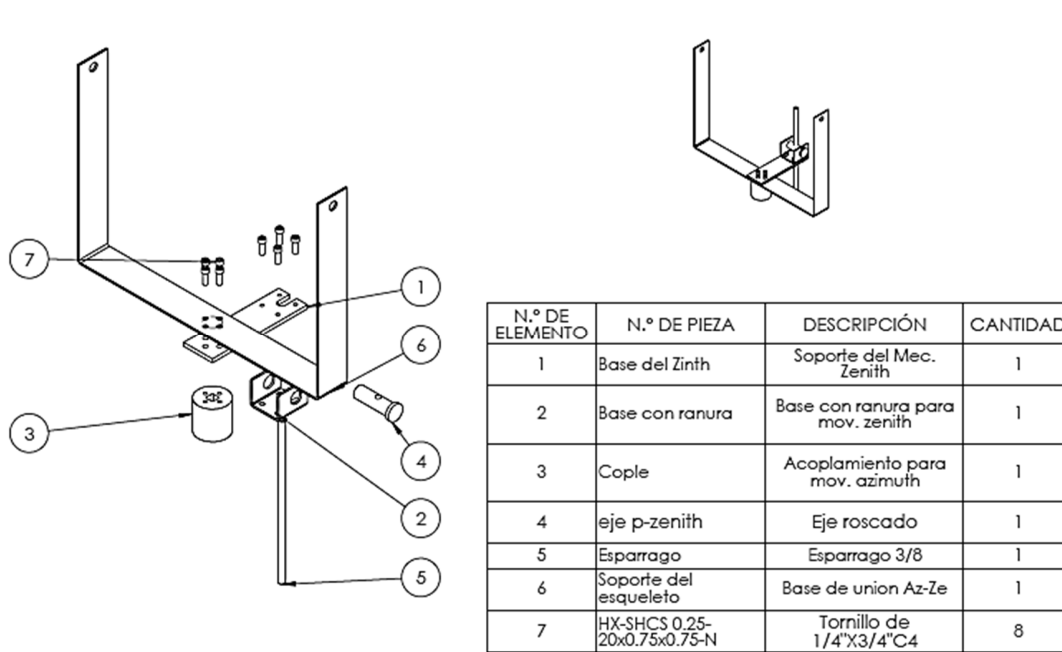
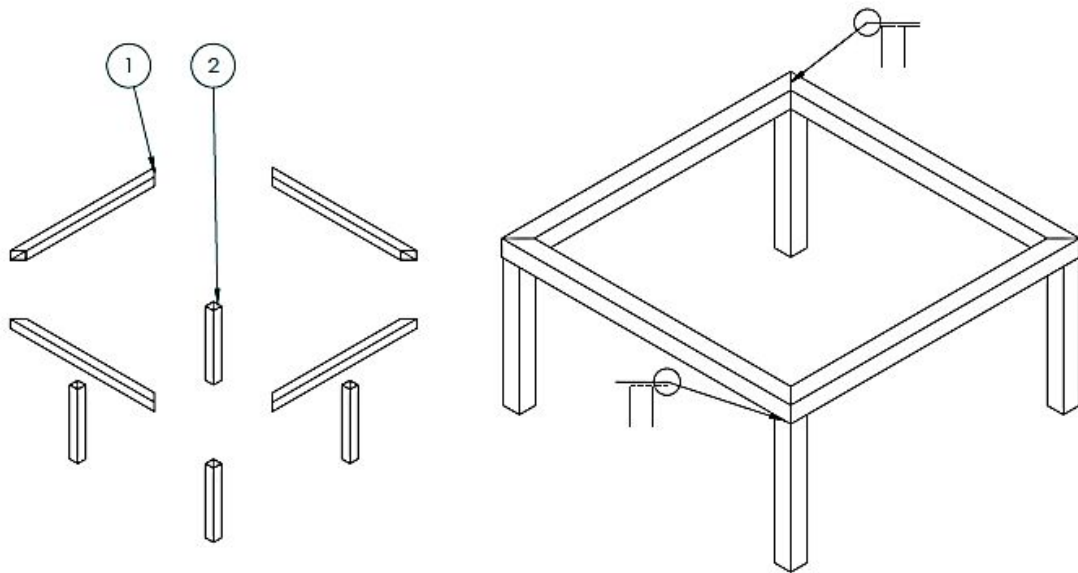


Figura 3.5 Mecanismo para el movimiento del ángulo zenith en el banco de prueba.

Y por último se tiene la base que mantendrá en equilibrio a todo el sistema, está hecho a base de perfil de acero rectangular de 2"X1" calibre 18, unido con soldadura 6013, esta se base se observa en la Figura 3.6.



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Bastidor	Perfil cuadrado 1" para Bast	4
2	Patás Base	Perfil cuadrado 1" para patás	4

Figura 3.6 Base del banco de prueba.

### 3.2. DISEÑO ELECTRONICO

Además del diseño mecánico, se realizó el diseño de un circuito electrónico que tuviera la capacidad de medir las temperaturas, voltajes y corrientes en el banco de pruebas, para así realizar las mediciones de manera práctica y real.

Este diseño electrónico debe de contener un sistema de medición que tenga la facilidad de acoplarlo al diseño mecánico, de tal manera que resulte práctica y sencilla la visualización de los parámetros a medir. Para esto se realizó un análisis de las consideraciones que se utilizaran para la realización del diseño electrónico, por lo tanto el diseño de contener:

- Termopar para la realización de mediciones de alta temperatura.
- Sensores de temperatura LM35 para la medición de temperaturas menores a 150°C.
- LCD para lectura de las mediciones en tiempo real.
- Microcontrolador PIC18F44550 para la programación de entradas y salidas de señales.
- Interfaz para adquisición de datos.

### 3.2.1. Configuración del diseño electrónico.

Uno de los componentes más importantes en este diseño electrónico es el termopar, que una de los sensores más utilizados en la industria, existen varios tipos de termopares, cada tipo tiene que ver con tipo de metales con que están fabricados, en la Tabla 3.1 se muestra los diferentes tipos de termopares que son los más comunes en el mercado.

Tabla 3.1 Tipos de Termopares. Fuente: ARIAN Control & Instrumentación

Tipo	Cable(+) Aleación	Cable(-) Aleación	Rango (min,max) [°C]	Volts max [mV]
J	HIERRO	COBRE/NIQUEL	(-180,750)	42.2
K	NIQUEL/CROMO	NIQUEL/ALUMINIO	(-180,1372)	54.8
T	COBRE	COBRE/NIQUEL	(-250,400)	20.8
R	87%PLATINO/13%RHODIO	100%PLATINO	(0,1767)	21.09
S	90%PLATINO/10%RHODIO	100%PLATINO	(0,1767)	18.68
B	70%PLATINO/30%RHODIO	94%PLATINO/6%RHODIO	(0,1820)	13.814

Cabe mencionar que los termopares tipo J y K representan la mayoría de uso en la industria. En este diseño se utilizó el termopar tipo K, la cual es la encargada de hacer la medición de la temperatura en el punto de concentración solar, en este punto la temperatura es considerada alta ya que rebasa los 250°C y no es posible utilizar un sensor convencional como el LM35 que tiene un límite hasta 150°C, según la hoja de datos, mientras que una termopar puede llegar a medir sin problema alguno hasta los 1300°C. En la Figura 3.7 se muestra el termopar utilizado.

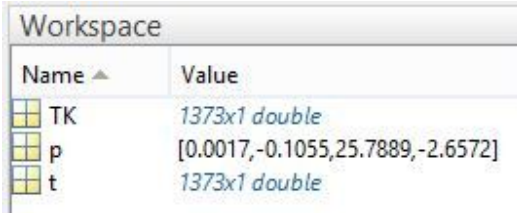


Figura 3.7 Termopar tipo K sin vaina.

La dependencia entre el voltaje entregado por el termopar y la temperatura no es lineal, por lo tanto se debe encontrar el polinomio que represente el comportamiento, esto se puede realizar mediante las tablas que rigen al tipo de termopar, la tabla del tipo K se muestra en el Anexo C, y se obtuvo el polinomio por medio del programa de MATLAB para hacer lineal el comportamiento del voltaje con respecto a la temperatura. Este código es el siguiente.

```
clear all; clc; close all;  
load('TK.txt');  
t=0:1:size(TK,1)-1;  
t = t';  
p = polyfit(TK,t,3);
```

El resultado de los coeficientes del polinomio de tercer grado que arrojó el MATLAB nos lo muestra la Figura 3.8



Name	Value
TK	1373x1 double
p	[0.0017,-0.1055,25.7889,-2.6572]
t	1373x1 double

Figura 3.8 Termopar tipo K sin vaina.

La ecuación de temperatura quedó de la siguiente manera:

$$\text{temp} = 0.0017 \cdot x^3 - 0.1055 \cdot x^2 + 25.7889 \cdot x - 2.6572;$$

y su gráfica

```
axis tight;  
grid on;  
plot(t,TK);  
xlabel('Temperatura °C');  
ylabel('mv');
```

Al conseguir el polinomio, sólo se tomó hasta un polinomio de tercer grado, el cuál en base a resultados logrados en segundo y cuarto grado, el polinomio de tercer grado resultó el más confiable al obtener resultados con poco margen de error. El comportamiento lineal se muestra en la Figura 3.9.

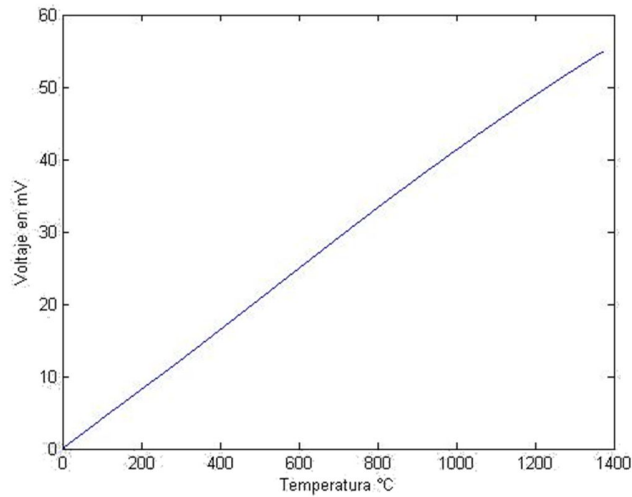


Figura 3.9 Dependencia en un termopar tipo K Voltaje vs Temperatura.

El voltaje a la salida resulta ser muy pequeña, siendo el máximo de 54 mV, para resolver este problema se utilizó un par de amplificadores para elevar la señal 100 veces, teniendo en cuenta que la configuración de un amplificador se representa de la siguiente como se muestra en la Figura 3.10.

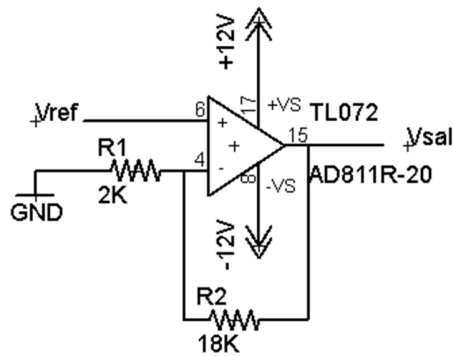


Figura 3.10 Amplificador no inversor.

Donde la ganancia se representa en la Ec. 3.1:

$$V_{sal} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_{ref} \quad \text{Ec. 3.1}$$

Donde:

$V_{sal} \rightarrow$  Es el Voltaje amplificado



$V_{ref}$  → Es el voltaje de referencia dado por la termocupla.

$\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$  → Es la relación de amplificación

Entonces para hacer una amplificación de 100 veces se utilizó la configuración con doble amplificador y este se muestra en la Figura 3.11.

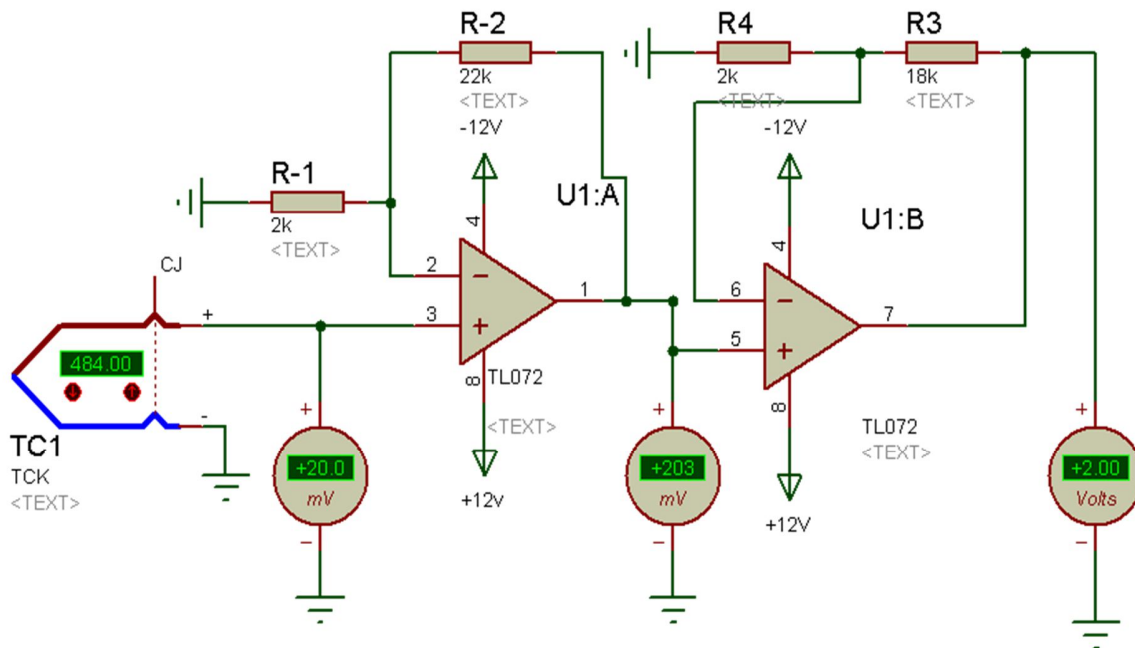


Figura 3.11 Configuración de termopar con señal amplificada de 1:100.

Para la programación en el pic18f4550 el código quedó de la siguiente manera:

```
float Termopar_K(float x){
// x en voltios, ejemplo si en tabla hay 12.5mv entonces X=12.5
float temp,x1,x2,x3;
x1= x;
x2= x1*x;
x3= x2*x;
temp = 0.0017*x3 -0.1055*x2 + 25.7889*x -2.6572;
return temp;
}
```

Una de las desventajas de los termopares es la necesidad hacer una compensación de cero, ya que al conectar un conductor se crea un termopar adicional, para compensar esta situación se le suma la temperatura de un sensor adicional a temperatura ambiente para obtener así la temperatura real y su código queda de la siguiente manera:

```
#int_TIMER0
void TIMER0_isr(void) {
    output_toggle(LED);

    // LM35 compensación ch2 a 10 bits
    // conversión LM35 adc a Grados centigrados a 10 Bits
    //(5/1023)/10mv=0.48876.
    set_adc_channel(2);
    delay_us(20);
    value = read_adc();
    tcomp = value * 0.48876;
    //----- termopar K ch0 TCO
    set_adc_channel( 0 );
    delay_us(20);
    value = read_adc();
    // conversión adc to voltaje
    //(0.00488)*1000/Ganancia(100)
    voltaje = value* 0.04880;
    //    ct2 ch1  0.04839
    TCO= Termopar_K(voltaje);
    // compensación
    TCO= TCO + tcomp;
```

Los sensores LM35 que se utilizó como compensador, son sensores que tienen un rango de temperaturas de -55 a 150°C, son ideales para temperatura ambiente, además de tener una dependencia lineal de 1°C por cada 10mV, su conexión para la medición de temperatura, se muestra en la Figura 3.12.

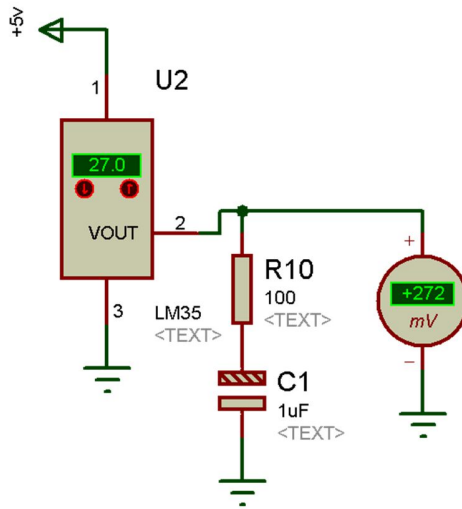


Figura 3.12 Conexión LM35 con su dependencia lineal en Eagle 6.2.

Además se utilizaron los LM35 para diferentes mediciones, tales como la parte superior de la celda Peltier, como la de la parte inferior de la celda Peltier.

Para la medición de voltaje se utilizó un divisor de voltaje, como protección del PIC18f4550, ya que sólo admite 5 V en las entradas, este divisor de voltaje es un circuito en serie que tiene la relación que se muestra en la Ec. 3.2:

$$V_{sal} = V_{ent} \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \quad Ec. 3.2$$

Teniendo en cuenta que el circuito que se muestra en la Figura 3.13, representa el divisor de voltaje simulado para la obtención del voltaje de la celda Peltier en circuito abierto.

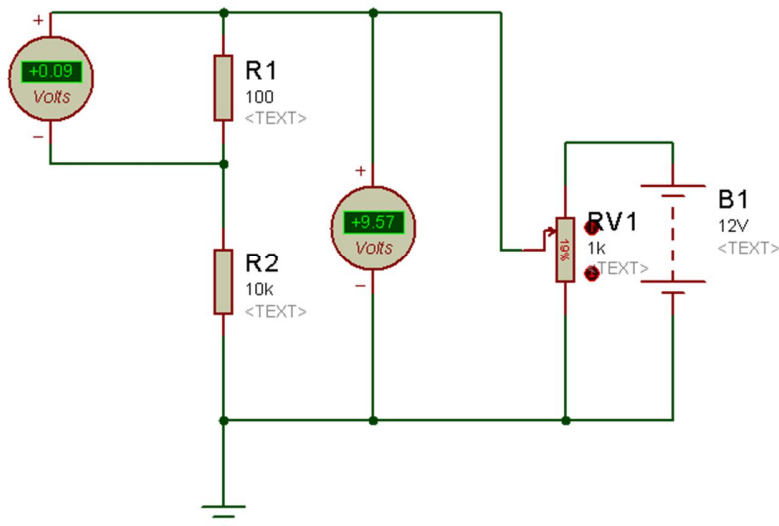


Figura 3.13 Divisor de Voltaje simulado en Eagle 6.2.

El código utilizado para la medición del voltaje de circuito abierto es el siguiente:

```
set_adc_channel(5);
delay_us(20);
value = read_adc();
// Voltaje de circuito abierto
TFE = value * 1.173; //(5/1023)*100
```

Para saber la corriente en corto circuito se utilizó una resistencia de  $1\Omega$ , teniendo en cuenta un circuito en paralelo, y basado en la ley de ohm la expresión utilizada se muestra en la Ec. 3.3.

$$I_{cc} = \frac{V_{ent}}{R} \quad \text{Ec. 3.3}$$

Al utilizar una resistencia de  $1\Omega$ , la corriente de corto circuito queda exclusivamente en función del voltaje utilizado. De manera gráfica se muestra en la Figura 3.14.

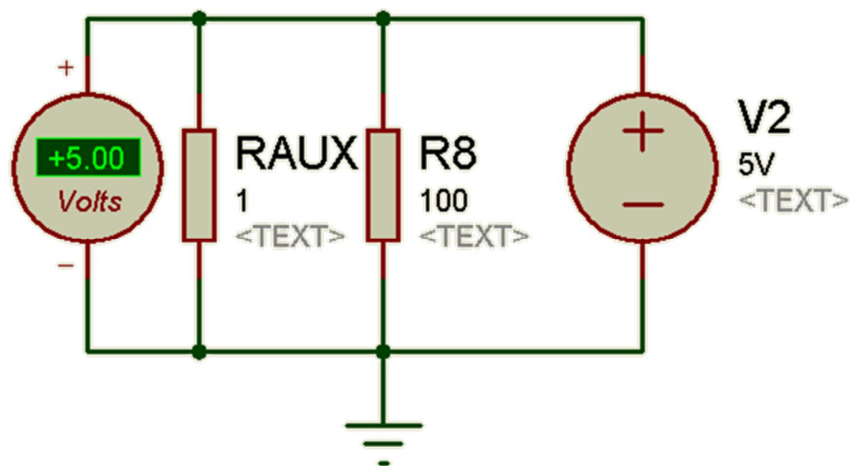


Figura 3.13 Medición de corriente  $I_{cc} = V_{ent}/\Omega$  simulado en Eagle 6.2.

El código utilizado para la medición de la corriente en cortocircuito es el siguiente:

```
set_adc_channel(6);
delay_us(10);
value = read_adc();
// Corriente de cortocircuito
TFS = value * 0.01173; //(5/1023)
```

Teniendo en cuenta la flexibilidad de tener relevadores para manipulación de motores y recepción y transmisión de datos para graficar el comportamiento. El esquema completo se muestra en la Figura 3.14

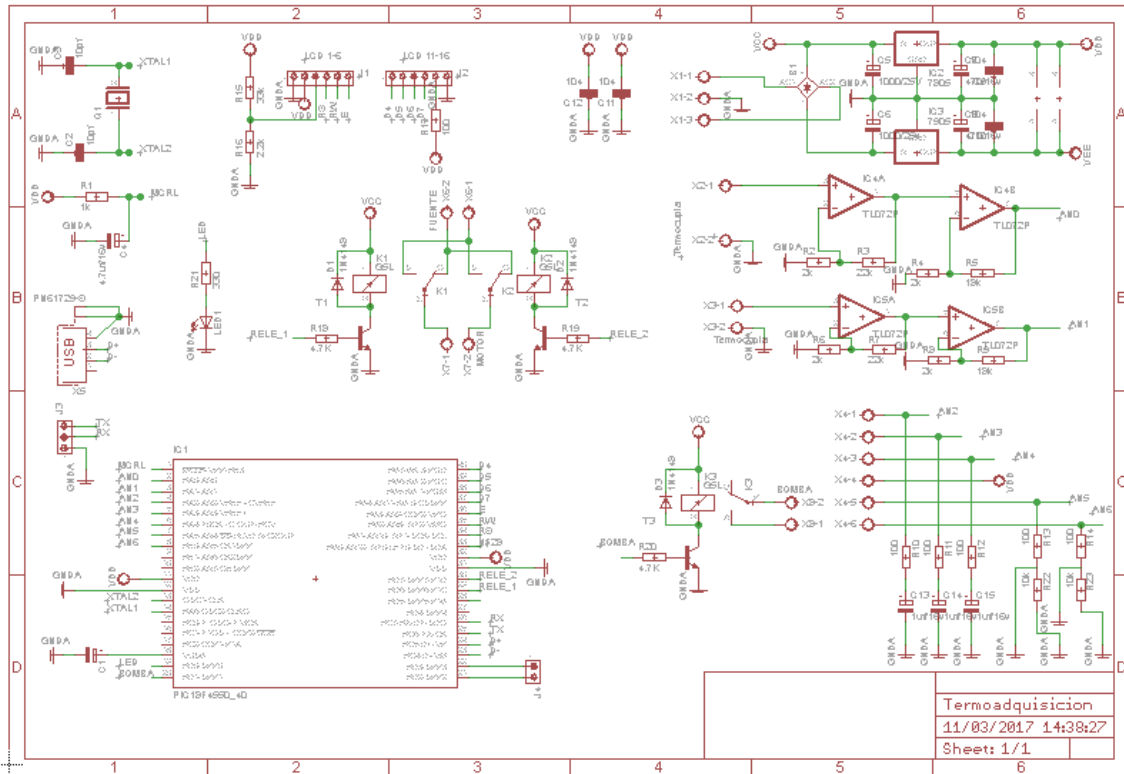


Figura 3.14 Esquema para la adquisición de datos.

Y para la impresión del PCB se muestra en la Figura 3.15

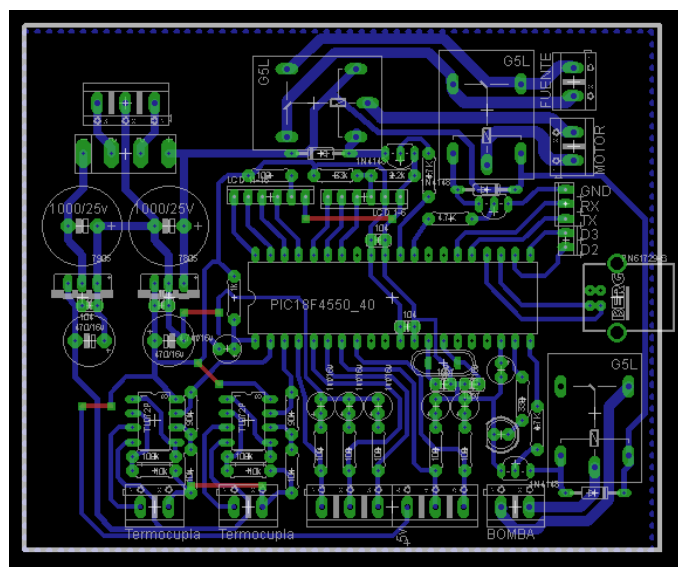


Figura 3.15 Diagrama para la PCB.

Simulación en Proteus se muestra en la figura 3.16

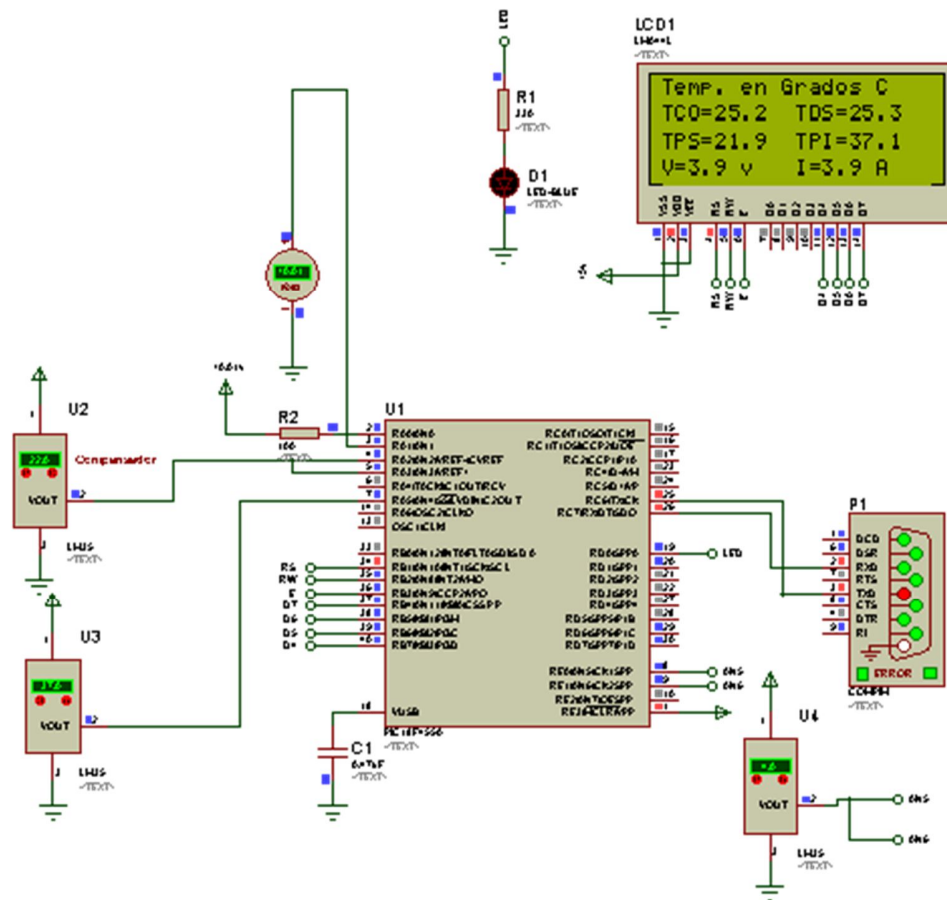


Figura 3.11 Simulación en Proteus.

La PCB terminada se observa en la figura 3.17

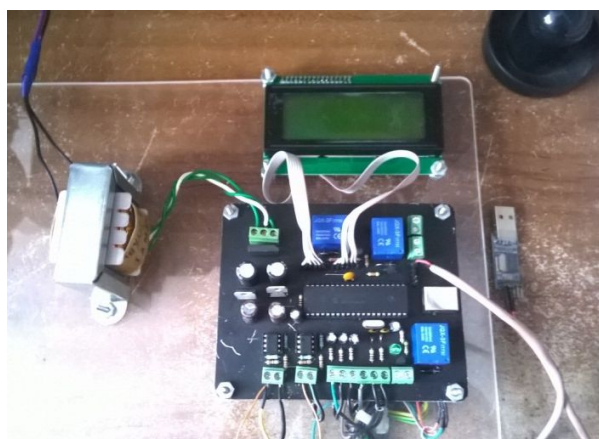


Figura 3.17 Diseño electrónico terminado.

La interfaz fue creada en LabView, esta interfaz muestra las temperaturas en tiempo real, además de adquirir los datos en un archivo .txt para su procesamiento, la interfaz simulada se muestra en la Figura 3.18

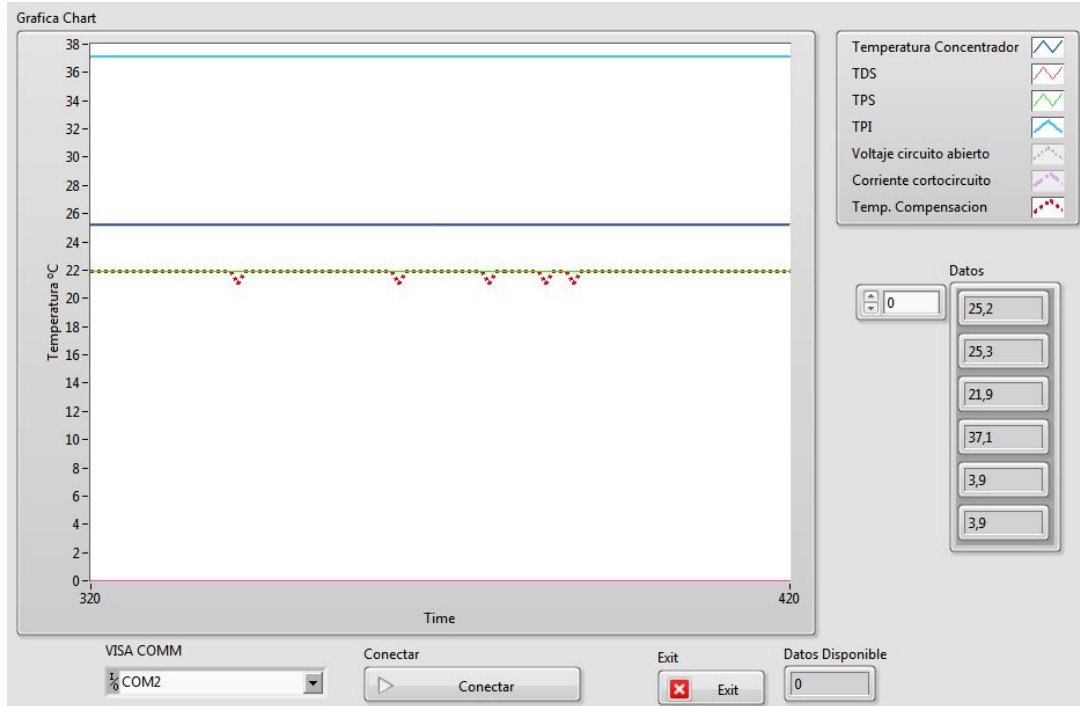


Figura 3.18 Interfaz en LabView.

La fotocelda que sirvió como parámetro fue una celda fotovoltaica con aplicación para módulos de alta concentración, fabricada por AzurSpace, la celda es tipo 3C44 –  $10 \times 10 \text{ mm}^2$ , donde tiene una Corriente de corto circuito ( $I_{sc}$ ) de 7.61 A, y un Voltaje en circuito abierto  $V_{oc}$  de 3.11 V. en la Figura 3.19 se muestra la gráfica aproximada (no se tienen características internas) que representa dicha celda fotovoltaica tipo MC/GLASS X500.

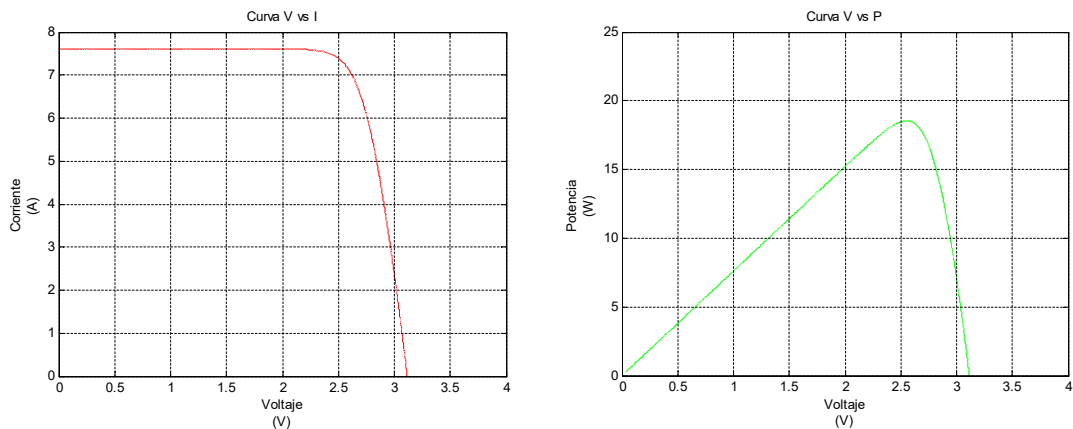


Figura 3.19 Gráficas aproximadas de una celda fotovoltaicas V vs I y V vs P

## 4. RESULTADOS

### 4.1 DISEÑO DEL PROTOTIPO DE PRUEBAS.

El máximo flujo de radiación concentrada se logra al colocar la celda Peltier en la distancia focal del lente de Fresnel, y esta se da principalmente cuando el sol se encuentra en el máximo ángulo zenital del día. Por ello se debe tener la posibilidad de ajustar a la distancia focal de la lente, por este motivo, tanto el soporte del lente como la base son ajustables por medio de tornillos. La automatización del seguimiento solar puede ser omitida ya que el interés térmico es el zenith máximo que se encuentra en el rango de las 12:00 a 14:00 horas del día, a este horario que aunque no es el máximo en la temperatura ambiente, si es el de la máxima radiación solar. Los resultados reportados a continuación se realizaron en este horario. En la Figura 4.1 se muestran algunas fotografías del prototipo y del spot de radiación concentrada sobre la celda Peltier.



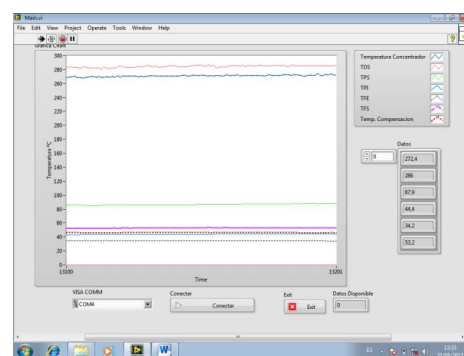
a) Imagen del prototipo



b) Imagen de la estructura



c) Imagen del sistema de electrónico de adquisición de datos.



d) Imagen de la interfaz en LabView para la adquisición de datos

Figura 4.1

En la Figura 4.2 se muestra el diseño del prototipo realizado en SolidWorks y se observa el despiece de la estructura donde se encuentra el sistema de enfriamiento del concentrador, además, se pueden visualizar los componentes que contienen los elementos destinados a disipar el calor y



bajar la temperatura del sistema de conversión de energía solar a energía eléctrica, tales como son, el concentrador, la celda Peltier y el disipador que es la base de la estructura en primera instancia.

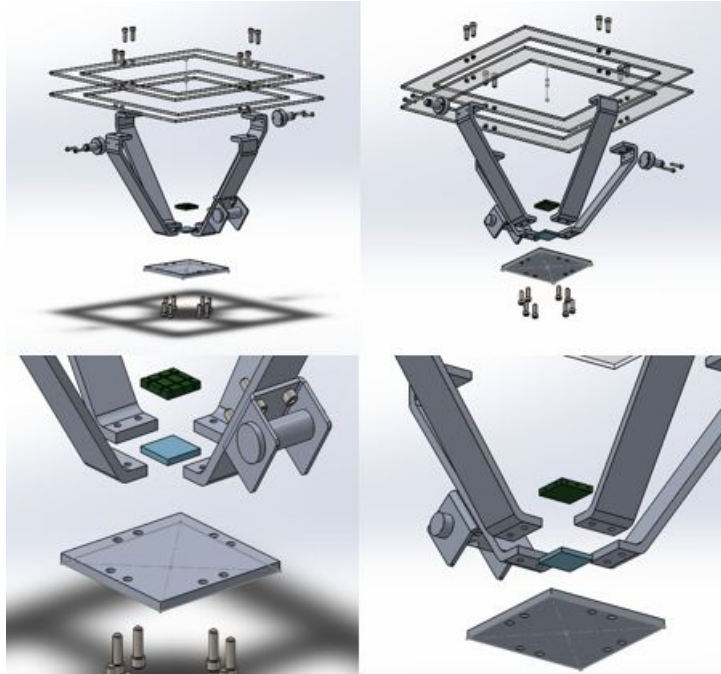


Figura 4.2

Las características del prototipo permitieron obtener el comportamiento térmico de un disipador de aluminio, con el propósito de ocupar el HCPV, en este elemento es donde se dirigirá el spot de radiación. En la Figura 4.3 se muestra la concentración de la radiación solar sobre el disipador con alta concentración solar (DACS).

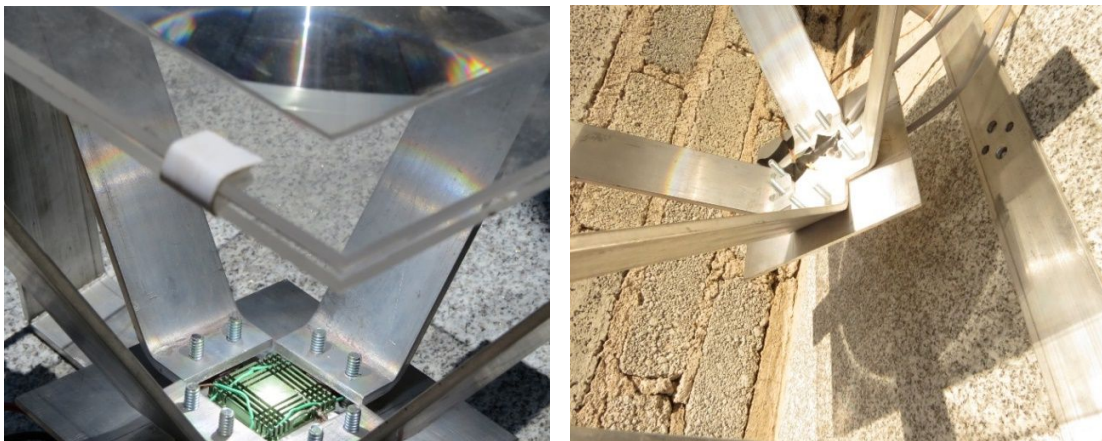


Figura 4.3 Fotografías del spot de radiación concentrada en la zona focal.

Con el prototipo también se obtuvo el comportamiento de la celda Peltier y de la estructura, además de obtener las características eléctricas de la celda Peltier.

En la Figura 4.4 se muestran los elementos la nomenclatura que se utiliza para describir los comportamientos de la temperatura en los arreglos correspondientes a cada situación determinada.

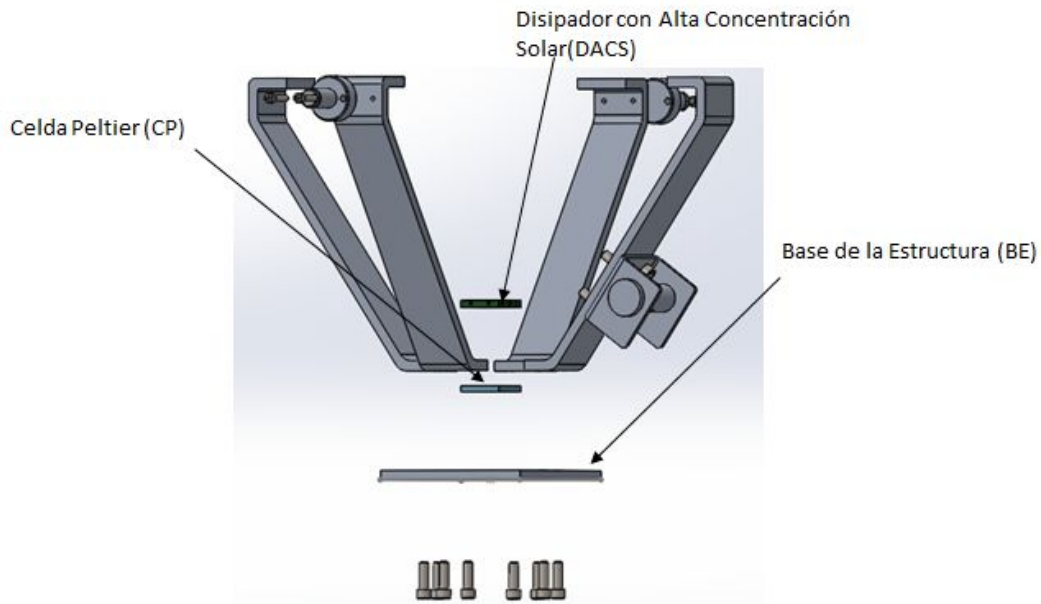


Figura 4.4

#### 4.2 RESULTADOS DE LA MEDICIÓN DE TEMPERATURAS

El primer caso se colocó el termopar en el foco del lente de Fresnel (sin ningún tipo de disipador de calor) para observar la variación de la temperatura en ese punto. El sistema alcanzó una temperatura máxima de 541 °C, el comportamiento completo de la variación de la temperatura durante el intervalo de 1.5 min se pueden observar en la figura 4.5.

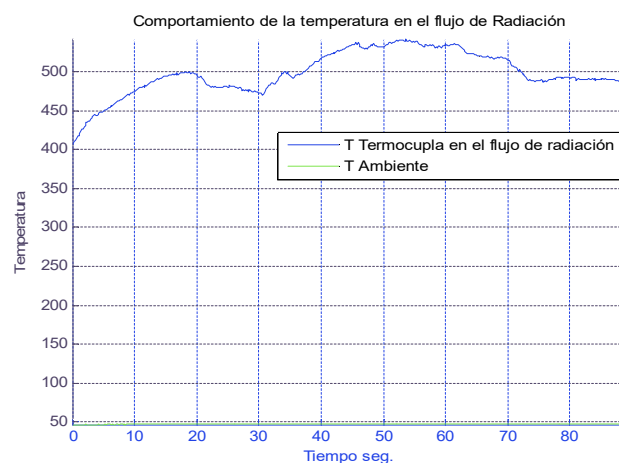


Figura 4.5 Temperatura en el foco del lente tipo Fresnel.

El comportamiento de la temperatura en el spot de radiación solar (TSR) en el DACS sin disipador de calor adicional, a pesar de se obtienen variaciones prominentes (ya que no se dispone de un seguidor solar), aun así, se puede deducir un promedio de 300 °C. Por otra parte, la temperatura en la parte inferior del DACS (TIDACS) tiende a ser más estable debido a que el mecanismo de

transferencia de calor predominante es a transferencia de calor por conducción y convección, por tal motivo la TIDACS no depende de la exactitud de la concentración en el termopar, esta tiene un promedio de 80 °C, como se puede observar en la Figura 4.6.

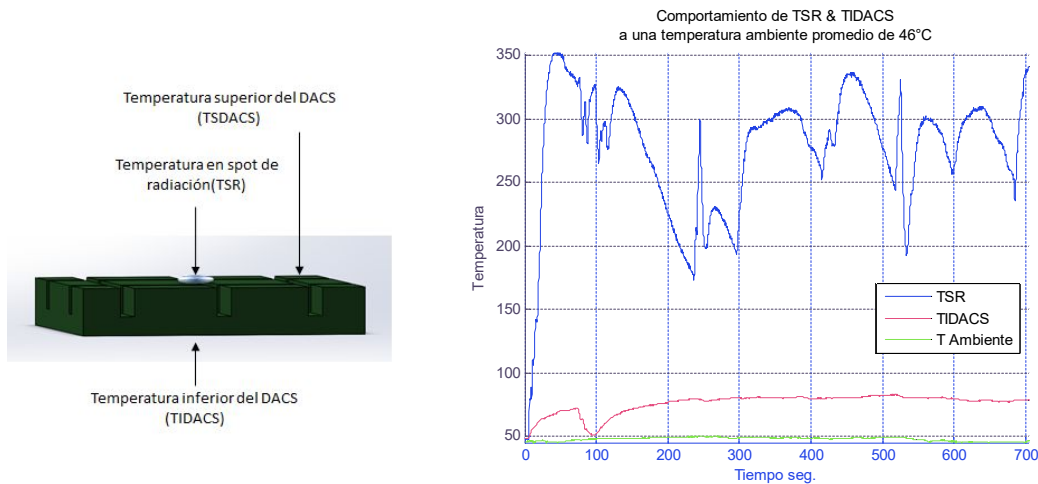


Figura 4.6

Cuando el DACS se adhiere a una base de una estructura de aluminio 6061, teniendo como base una placa de 15cmX15cmX1/4" (BE), la TSR baja y la TIDACS se mantiene estable durante un tiempo, sin embargo cuando la parte superior de la base se satura, en ese momento la TIDACS se eleva ya que se tiende a ir a un equilibrio térmico, a pesar de que la TSR es de un promedio de 280 °C, la TIDACS se mueve de los 50 °C promedio a los 80 °C promedio; las variaciones prominentes en la TIDACS es debido a las ranuras del DACS, esto se muestra en la Figura 4.7, de aquí la necesidad de utilizar un sistema de refrigeración que ayude a tener una temperatura baja al DACS.

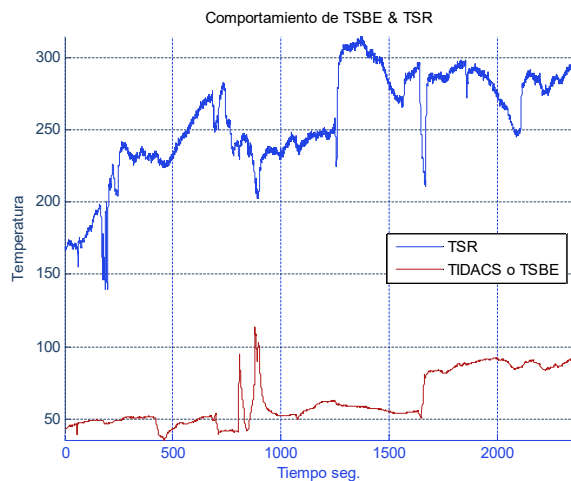


Figura 4.7

La TSR es un flujo continuo de energía térmica y punto de transformación de energía, La temperatura que se ha de mantener estable es la parte superior del DACS (TSDACS), ya que ésta

debe mantenerse baja dada la eficiencia y la vida útil que puede generar el HCPV a estas condiciones. La temperatura que se tiene en promedio en la parte superior del DACS, a una temperatura ambiente bajo el sol directo de 44 °C, es de 150 °C, como se puede observar en la Figura 4.8, que como se puede observar es aún alta.

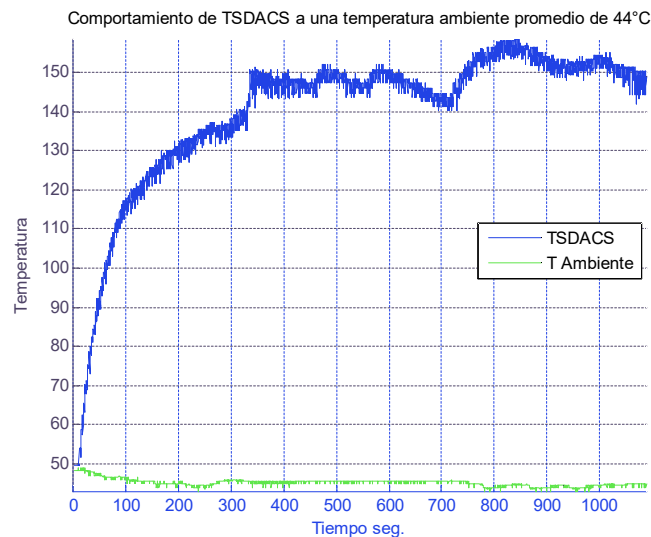


Figura 4.8

En estas condiciones la eficiencia de la celda fotovoltaica, tal como lo indica la Figura 2.29, suele disminuir, por tal motivo surge la necesidad de disminuir la temperatura a la celda fotovoltaica, el sistema que produce el frío es una celda Peltier, con esta celda se aprovecha el efecto termoeléctrico permitiendo bajar la temperatura de las celdas fotovoltaicas, esto con el objetivo de que no disminuya la capacidad de generar energía eléctrica.

El comportamiento de una celda Peltier en un ambiente controlado, sin diferencia de temperatura aparente en el ambiente sobre las dos caras de la celda Peltier, al aplicarle una diferencia de potencial bajo en sus bornes las caras de la celda muestran una diferencia de temperatura casi de forma inmediata demostrando así el efecto Peltier con el uso de semiconductores de Teluro de Bismuto, de esta manera se identifica el lado frío y lado caliente con sólo tocarlo, con el uso de los sensores de temperatura se puede observar que tanto la temperatura en la cara fría y en la cara caliente varían su temperatura, en un inicio la cara fría se manifiesta con un comportamiento más rápido que el lado caliente; conforme pasa el tiempo y se estabiliza el sistema, el lado frío en vez de seguir bajando, se eleva un poco la temperatura y se estabiliza también más rápido que el lado caliente creando así un flujo constante de energía térmica, creando así un equilibrio entre lo que absorbe la cara fría y lo que entrega al ambiente la cara caliente, tal como se muestra en la Figura 4.9

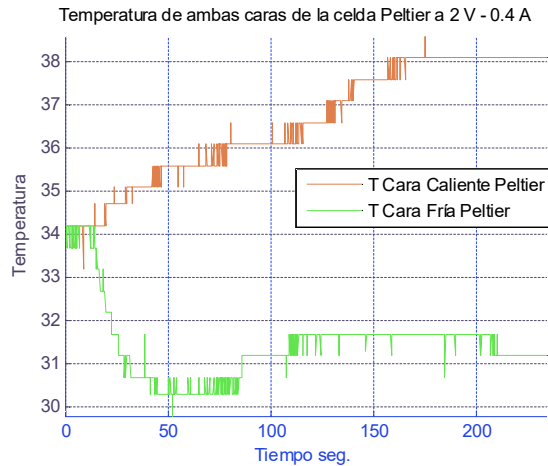


Figura 4.9

Al tener una fuente de calor como lo es el concentrador, el sistema se desestabiliza, ya que el sistema del efecto termoeléctrico de la celda Peltier se satura, ya que el lado frío absorbe más energía térmica que la que entrega al ambiente, al generar una diferencia de potencial mayor a la celda Peltier, produce también una diferencia de temperatura en las caras de esta, teniendo así un mayor flujo de energía térmica, sólo que la capacidad autónoma de la celda se ve superada, esto tiene como consecuencia el uso de un disipador de calor, este debe ser capaz de disipar la energía térmica que es absorbida por la cara fría, y así exista un flujo térmico constante, este comportamiento se puede observar en la Figura 4.10, donde se tiene un flujo térmico constante en primera estancia, cuando el tiempo sigue su curso la temperatura en ambas caras se eleva empezando así la saturación del disipador, al forzar la transferencia de calor en el disipador con agua se observa que se estabiliza el sistema. También se puede observar en la Figura 4.10 que con la disipación de calor forzada, el sistema térmico se vuelve constante.

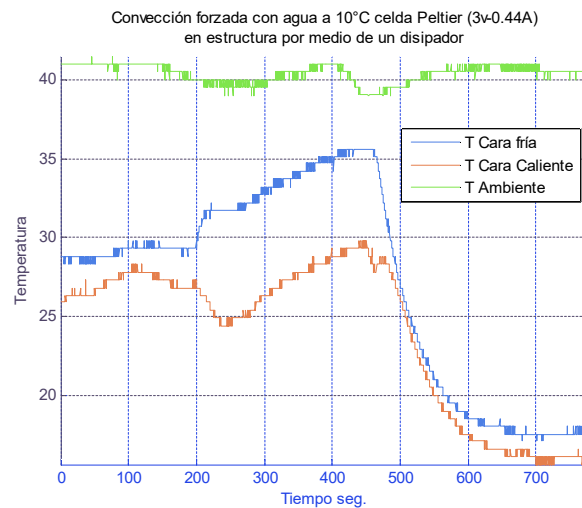


Figura 4.10

Al colocar la Celda Peltier en un disipador en la cara caliente y en la cara fría el concentrador, se tiene que la cara fría absorbe el calor, que como consecuencia adquiere más temperatura que la del

lado caliente que por medio del disipador desplaza el calor, este comportamiento se mantiene hasta que el disipador se satura, ya que al no ser capaz de transferir todo el calor al medio ambiente, se tiene que utilizar un recurso que permita transferir ese calor, en este caso se colocó agua a 10 °C, para forzar al disipador transferir el calor con mayor rapidez, el cual es necesario para transferir

Claramente se observa la necesidad de es disipación de calor de forma forzada, que por lo regular se hace esta transferencia se por medio de convección forzada. Se debe tener en cuenta que la transferencia de calor con el uso de la convección forzada sólo se puede realizar con fluidos, siendo los más comunes el agua y el aire, aunque se pueden usar otras mezclas con el fin de mejorar u optimizar la transferencia de calor, o bien, haciendo un uso práctico de este fluido se puede definir el fluido que ha de ser utilizado.

Además del uso de la convección forzada también se puede acelerar la transferencia de calor incrementando la diferencia de potencial en los bornes de la celda Peltier, la cual tiende a aumentar la diferencia de temperatura entre las dos caras. Esta diferencia de temperatura depende de la diferencia de potencial como se observa en la ecuación 2.29 que nos dice que el voltaje aplicado es directamente proporcional a la diferencia de temperatura. Lo anterior nos dice que la celda Peltier puede comportarse bajo la dependencia del voltaje aplicado y la capacidad disipación que permite desplazar el calor a otro medio. En la Figura 4.11 se muestra el comportamiento de una celda Peltier TEC1-12706 a diferentes condiciones y se puede observar la importancia del uso del disipador.

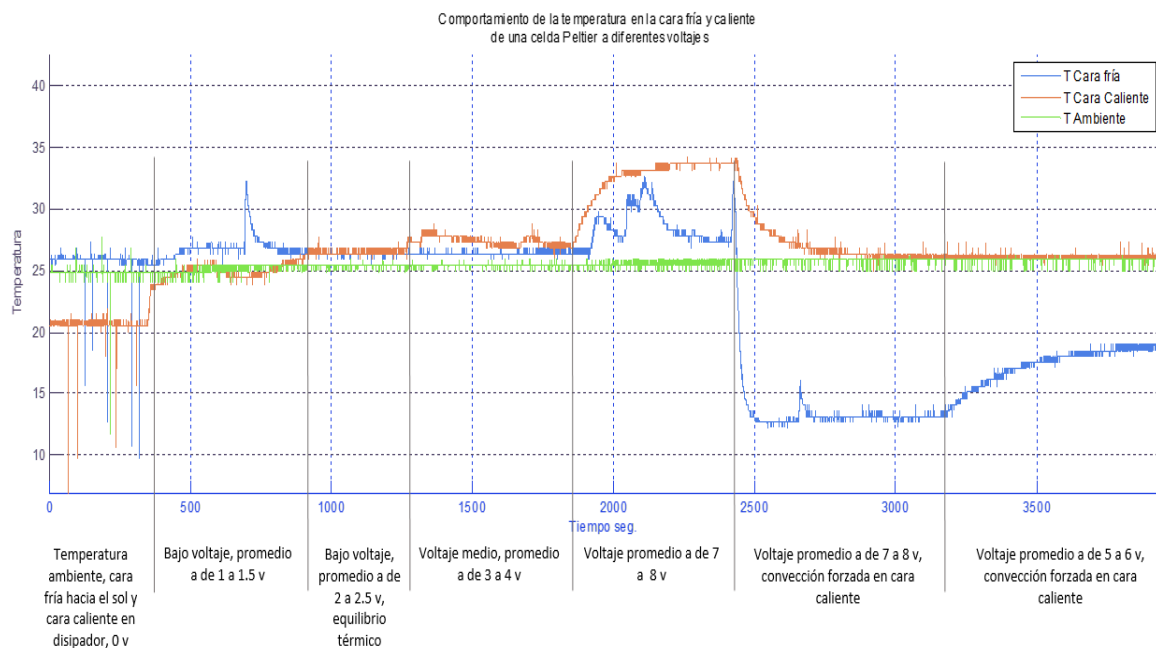


Figura 4.11

Al instalar el sistema de refrigeración con la celda Peltier entre el DACS y la BE, manteniendo la temperatura a 40 °C de la TICIP con un balde de agua, se obtuvo el comportamiento de la TSDACS, la TICIP que es la misma temperatura que la TSBE, y por último la temperatura de la cara caliente de la celda Peltier que es igual a la TIDACS.

En este caso la TSDACS va de una temperatura aproximada de 165 °C a una temperatura aproximada de 95°C, así mismo la TIDACS sube de 75°C a 95°C aproximadamente, esto tiene como consecuencia un DACS que se convierte una fuente constante de calor para la celda Peltier. Lo anterior demuestra que la celda Peltier, tiene la capacidad de bajar la temperatura del DACS y por ende a una celda fotovoltaica de alta concentración. Tal como se muestra en la Figura 4.12.

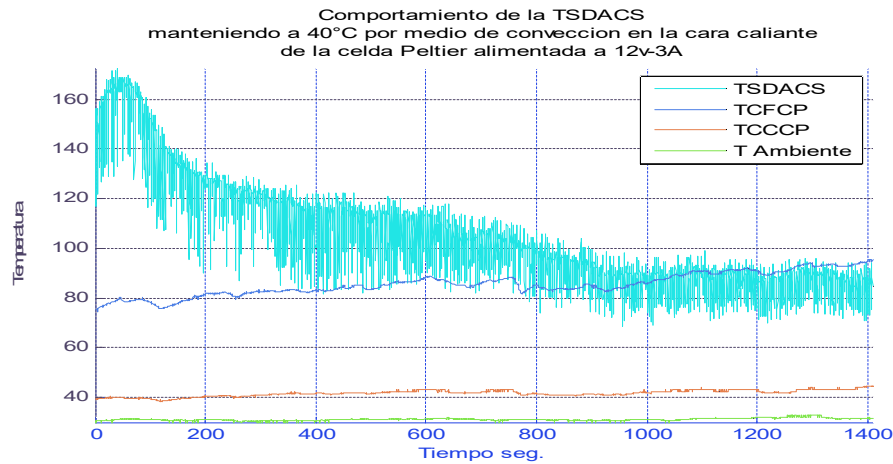


Figura 4.12

El nivel de temperatura que se elija bajar tiene que ver con la temperatura a la cual se mantenga la cara caliente de la celda Peltier, ya que esta, es la que determina la velocidad de la transferencia de calor, si esta no se disipa el equilibrio térmico no se mantendrá y se saturará el sistema para comenzar a elevarse la temperatura de todo el sistema, esto se observa en la Figura 4.13

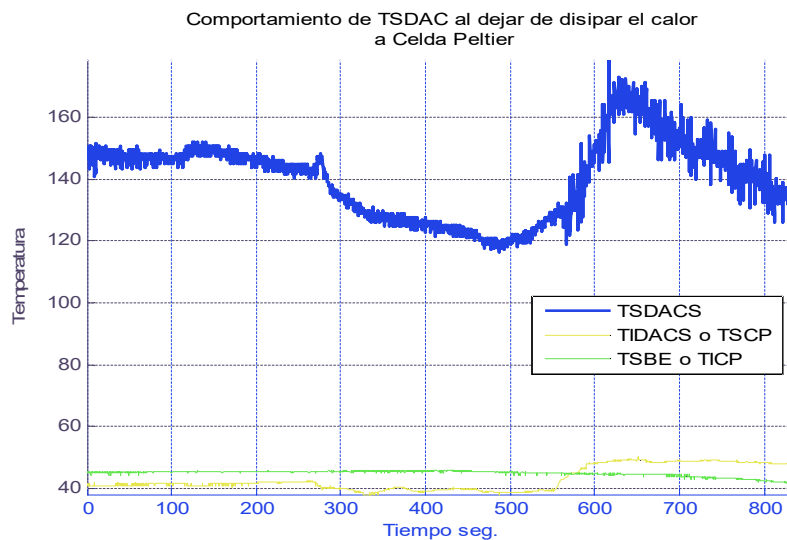


Figura 4.13

## 5. CONCLUSIONES

El primer objetivo planteado para este trabajo fue la integración de un sistema de enfriamiento por medio de una celda Peltier a un sistema fotovoltaico de alta concentración, en este caso el concentrador solar disponible fue un sistema con concentración solar por medio de una lente tipo Fresnel, aunque la fotocelda de alta concentración (HCPV) no estuvo disponible, el objetivo principal fue la de bajar la temperatura de un elemento que supliera a la HCPV.

Si bien el análisis se pudo hacer meramente teórico, este trabajo se basó con un prototipo que contenía las principales mediciones de interés, las cuales se basaba en la medición de alta temperatura con termopares tipo k, de temperatura media por medio del sensor LM35, y medición de voltaje de salida y corriente consumida, esto último con el fin de medir el voltaje en circuito abierto y la corriente de corto circuito.

Para el cumplimiento de los objetivos se construyó un prototipo de un concentrador solar con una lente Fresnel, la concentración fue de 500 a 1 o 500 soles, que es una parte de un panel, a su vez para efectuar las mediciones se creó un circuito electrónico con termopar y sensores de temperatura.

Por medio de Labview se adquirieron los datos arrojados en las pruebas y MATLAB para generar las gráficas de los resultados.

La temperatura en el foco de la lente fue de 540 °C, esta temperatura indicada representa la temperatura a la cual llega en la distancia focal del lente, sin transferencia de calor por conducción significativa dado a las características de los materiales del termopar, además, la reflexión en el termopar puede ser despreciada dada la dimensión de contacto que se tiene en el foco del lente.

Al colocar el concentrador en la base de la estructura, existe una transferencia de calor significativa ya que de 540 °C baja la temperatura en el termopar hasta un promedio de 300 °C. También se pudo observar que el sistema es estable hasta que sus elementos se saturan al no poder transferir el calor suficiente hacia el ambiente y este genera un aumento de temperatura en todo el sistema.

Un HCPV se encuentra en el foco de la lente, y dado que es de alta concentración, la energía recibida por HCPV se transforma en energías que se aprovechan como la transformación de energía solar a eléctrica, estas energías se pueden aprovechar o desechar como la energía térmica, y energías que resultan ser pérdidas que no se pueden aprovechar tales como la reflexión, que es la energía que sale de la misma forma que entra y la radiación que es la energía que emana el cuerpo.

La energía que se fructifica es la que tiende a cubrir las necesidades para los que fueron hechos los elementos, el elemento principal del sistema en este caso es la HCPV que transforma la energía solar a energía eléctrica y es la que tiene como objetivo mantenerla a la máxima eficiencia.

La temperatura de operación en la zona del foco del lente es de arriba de 300 °C y en la circundante está en un rango de 160 a 180 °C, en la Figura 4.6 se puede observar el punto de saturación cuando se eleva la temperatura de 50 °C a 90 °C.



Por medio del efecto termoeléctrico de la celda Peltier se logró una disminución de bajar la temperatura en el concentrador pero a un costo alto, ya que tiene un consumo eléctrico de 12 voltios con 3 Amper, lo que da una potencia de 36 watts, por lo que representa un alto consumo eléctrico.

Lo anterior representa un factor determinante para el uso de la celda Peltier en los sistemas fotovoltaicos de alta concentración, y en este caso uno de los objetivos es mantener la eficiencia de la HCPV, pero existe otro más importante que es la de producir la mayor cantidad de energía eléctrica para efectos de consumo tangible, eso quiere decir que cualquier cosa que consuma energía eléctrica y que no se haya contemplado para aprovechar la energía en un trabajo productivo se considera pérdida.

Esto sin contar que se tienen que disipar el calor por medio de una convección forzada que representa un consumo eléctrico adicional, entonces se puede decir que el desplazamiento de la energía térmica por medios convencionales no se anula.

Por lo tanto el alto consumo eléctrico de la celda Peltier no representa un aumento de eficiencia a la HCPV, ya que la energía que se puede aprovechar es menor debido al consumo eléctrico que se utiliza para bajar la temperatura del sistema generador de electricidad.

La única forma que sea factible el uso de termoeléctricos, es investigando los tipos de semiconductores que puedan mejorar la transferencia de calor con un menor consumo eléctrico.

Existe otra forma de aprovechar las celdas Peltier, esta forma es la de aprovechar el efecto Seebeck utilizando las mismas celdas, ya que este efecto nos dice que “es la conversión directa de la diferencia de temperatura a diferencia de potencial eléctrico. Un dispositivo termoeléctrico crea un voltaje cuando hay una diferencia de temperatura a cada lado”. Esto se pudo probar con las celdas Peltier utilizadas para producir frío, en la cual se produjo una diferencia de temperatura en la parte inferior del concentrador y la parte superior de la base, los resultados arrojados se muestran en la Figura 5.1a, indicado la diferencia de temperatura entre las dos caras, en la Figura 5.1b, muestra el voltaje en circuito abierto generado a las condiciones mostradas en la Figura 5.1a, quedando demostrando el efecto Seebeck, así mismo se puede observar que esa energía puede ser aprovechable ya que se tiene 1.8 v con una sola celda Peltier.

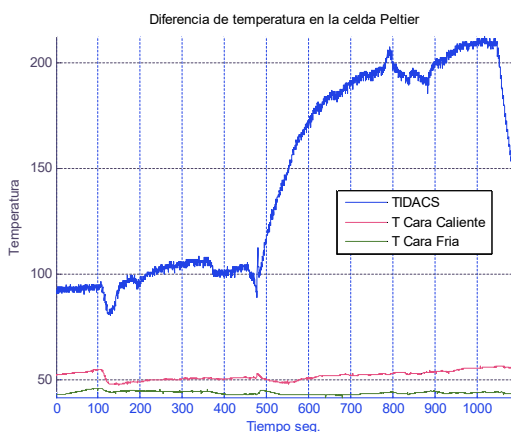


Figura 5.1a

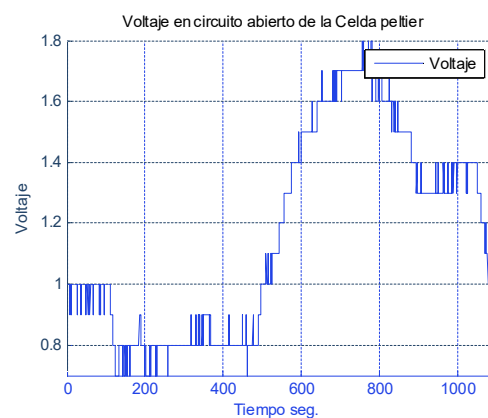


Figura 5.1b

La potencia generada en cortocircuito, con una resistencia de  $1 \Omega$ , se muestra en la Figura 5.2b, bajo las condiciones de la Figura 5.2a.

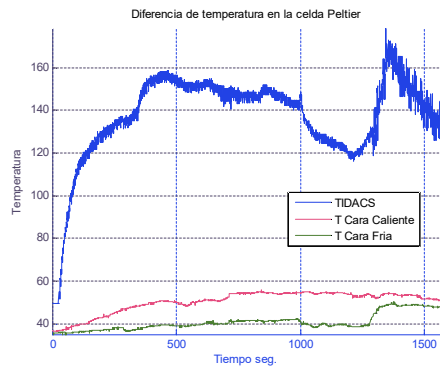


Figura 5.2a

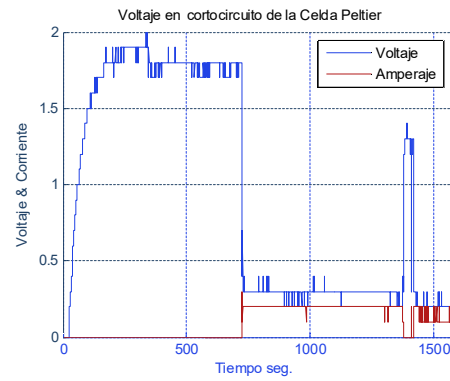


Figura 5.2b

Lo anterior nos indica que es posible generar electricidad con este efecto llamado seebeck, y puede llegar a ser factible a que ésta se utilice para la recirculación de algún fluido destinado a reducir temperatura por medio de convección forzada, o bien, para generar energía eléctrica a partir de la diferencia de temperatura, aprovechando así, la energía térmica que provee la energía solar.

A fin de tener nuevas tecnologías se deben realizar amplias investigaciones para que el aprovechamiento de energías alternativas pueda generar un impacto importante en el medio ambiente.

Los sistemas integrales que nos promueve la cogeneración de energía, puede ayudar a obtener mayor energía aprovechando las cualidades de todos los elementos integrados al sistema, si bien es tener una mayor inversión inicial, el beneficio a largo plazo lo agradecerán las próximas generaciones.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

The Physics of Solar Cells, Jenny Nelson, Imperial College Press, 1ra Edición, 2003

Energy Magement Handbook, Wayne C. Turner, Steve Doty, 2012

Geometría Análítica, Vazquez & Castillo, Editorial Prentice Hall, 2007

Física del estado sólido y semiconductores, J. P. McKELVEY, Editorial LIMUSA, 4ª Edición, 1991

Solar Engineering of Thermal Processes, John A. Duffie, William A. Beckman, publicada por Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 4ª Edición, 2013.

Páginas de internet consultadas:

<http://www.monografias.com/trabajos-pdf2/disenio-electronico-analogo/disenio-electronico-analogo2.shtml#ixzz4mXrC7SKe>, Dr. C. Reig 05/06

<http://deltavolt.pe/energia-renovable/energia-solar/paneles-solares>

[https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm08/pfcm8\\_4\\_6.html](https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm08/pfcm8_4_6.html)

<http://www.ing.uc.edu.ve/ocontrer/semiconductores.htm>

[https://es.wikipedia.org/wiki/Uni%C3%B3n\\_PN](https://es.wikipedia.org/wiki/Uni%C3%B3n_PN)

Modelado de una celda Peltier, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID. (s. f.) Recuperado de [www.ieef.upm.es/webantigua/spain/Asignaturas/Servos/.../prac6%20mol%20peltier.pdf](http://www.ieef.upm.es/webantigua/spain/Asignaturas/Servos/.../prac6%20mol%20peltier.pdf)

“Estudio y parametrización de un generador termoeléctrico, (Albert Rof Ballús) [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/79156/01\\_TFG.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/79156/01_TFG.pdf)

<https://www.tamesol.com/blog/monocrystalline-vs-polycrystalline/?lang=es>

<https://es.wikipedia.org/wiki/Electronvoltio>

Wikipedia, «Efecto Termoeléctrico» [https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto\\_termoeléctrico](https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_termoeléctrico).

[https://www.researchgate.net/publication/265767005\\_MODELADO\\_Y\\_SIMULACION\\_DE\\_CELDAS\\_Y\\_PANELES\\_SOLARES](https://www.researchgate.net/publication/265767005_MODELADO_Y_SIMULACION_DE_CELDAS_Y_PANELES_SOLARES)

<https://www.caloryfrío.com/calefaccion/bomba-de-calor/definiciones-cop-y-eer.html>

Páginas de internet recuperadas:

Análisis de Sistemas de Refrigeración Solar por Absorción y Adsorción, Vicente Soltero José Antonio, Universidad de Sevilla, España, 2015. Recuperado de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5601/fichero/PFC+JOSE+A+VICENTE+FINAL.pdf>

Cálculo del rendimiento EER COP en split con la placa de características técnicas, Rodríguez Manuel, revistadigital, España, 2017. Recuperada de <https://revistadigital.inesem.es/gestion-integrada/calculo-rendimiento-eer-cop-split-placa-caracteristicas-tecnicas>

Análisis de Dispositivos Termoeléctricos en el Marcotermodinámico de Procesos Irreversibles, Lindero Hernández Miguel, Instituto Politécnico Nacional, México, 2010. Recuperado de <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/9365/193.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Refrigeración por compresión de vapor, método de absorción de amoniaco, Escalona Cristian, Universidad Fermín Toro, Venezuela, 2015 Recuperado de <https://es.slideshare.net/cristianbqto/refrigeracin-por-compresin-de-vapor-mtodo-por-absorcin-de-amoniaco>

Potencial de Refrigeración de un Panel Fotovoltaico. Aplicación a PCM, López Antón, Universidad de Sevilla, 2018. Recuperado de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/91667/fichero/TFG-1667-LOPEZ.pdf>

Evaluación de un Sistema Híbrido para mejorar la Eficiencia de Conversión de Energía en Paneles Fotovoltaicos, Valencia Camilo, Díaz Mauricio, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia, 2018. Recuperado de <http://vitela.javerianacali.edu.co/handle/11522/10027>

Performance simulation of a parabolic trough solar collector, Huang W., Huang F., Hu .P & Chen Z., 2012. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X11004294>

Diseño de un Concentrador Solar con Lente de Fresnel para propósitos académicos y de experimentación, Jaramillo Mora, 2014. Recuperado de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/6707/Tesis.pdf?sequence=1>

Diseño Experimental de un Sistema Tradicional de Panel Solar de Pequeña Escala Ubicado en la Ciudad de Barranquilla, Chona Suarez Raul Alexander, Robles Cervantes Jhonnys Miguel, Universidad del Caribe, Barranquilla Atlántico, 2013. Recuperado de

Modelado y simulación de celdas y paneles solares, E. E. Granda-Gutiérrez, O. A. Orta, J.C. Díaz-Guillén, M. A. Jimenez, M. Osorio, M. A. González, Instituto Tecnológico de Saltillo, México, 2013. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/265767005>

Estudio de las características de una celda fotovoltaica para el uso eficiente de la energía solar, Huerta Mascotte, Eduardo; Mata Chávez, Ruth Ivonne; Estudillo-Ayala, Julián Moisés; Sierra Hernández, Juan Manuel; Guryev, Igor; Lizárraga Morales, Rocío Alfonsina, ISSN: 0188-6266, Universidad de Guanajuato, México, 2016. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/416/41648312007.pdf>

Materiales termoeléctricos. Aplicaciones para la refrigeración y la generación de electricidad, Catalán Solsona Juan Antonio, Universidad Zaragoza, España, 2014. Recuperado de <https://zagan.unizar.es/record/16679/files/TAZ-TFG-2014-1937.pdf>

Diseño de una caja de refrigeración por termocélulas, Ayala del Rey Antonio, Universidad Politécnica de Catalunya, España, 2009. Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6799/Resum.pdf>

Diseño de paneles generadores de electricidad por efecto seebeck, Mateo Duque Solís, Escuela de Ingeniería de Antioquia, Colombia, 2013. Recuperado de [https://repository.eia.edu.co/bitstream/11190/728/8/DuqueMateo\\_2013\\_Dise%C3%B1oPanelesGeneradores](https://repository.eia.edu.co/bitstream/11190/728/8/DuqueMateo_2013_Dise%C3%B1oPanelesGeneradores)

7. ANEXOS

ANEXO A HOJA DE DATOS DE FOTOCELDA DE ALTA CONCENTRACIÓN



**Concentrator Triple Junction Solar Cell**  
 Cell Type: 3C44 – 10 x 10mm<sup>2</sup>  
 Application: Concentrating Photovoltaic (CPV) Modules

**Typical Average Electrical Data**

Sun Concentration	I <sub>sc</sub> [A]	V <sub>oc</sub> [V]	I <sub>mp</sub> [A]	V <sub>mp</sub> [V]	P <sub>mp</sub> [W <sub>cell</sub> ]	FF [%]	D [%]
<b>Version MCGAir</b> Grid optimized for medium concentration + Antireflective Coating adapted to air							
X 250	3,85	3,06	3,77	2,80	10,59	89,0%	42,1
X 500	7,66	3,11	7,54	2,81	21,20	88,9%	42,0
X 1000	15,35	3,15	15,07	2,89	40,56	83,8%	40,3
<b>Version MCGGlass</b> Grid optimized for medium concentration + Antireflective Coating adapted to glass							
X 250	3,82	3,07	3,76	2,80	10,55	89,0%	41,9
X 500	7,61	3,11	7,50	2,81	21,04	88,8%	41,8
X 1000	15,36	3,15	14,95	2,70	40,46	83,8%	40,2

Sun Concentration	I <sub>sc</sub> [A]	V <sub>oc</sub> [V]	I <sub>mp</sub> [A]	V <sub>mp</sub> [V]	P <sub>mp</sub> [W <sub>cell</sub> ]	FF [%]	D [%]
<b>Version HCGAir</b> Grid optimized for high concentration + Antireflective Coating adapted to air							
X 250	3,76	3,06	3,68	2,83	10,44	90,7%	41,5
X 500	7,49	3,11	7,38	2,83	20,88	89,6%	41,4
X 1000	15,17	3,14	14,82	2,77	41,08	86,4%	40,8
<b>Version HCGGlass</b> Grid optimized for high concentration + Antireflective Coating adapted to glass							
X 250	3,75	3,06	3,68	2,82	10,39	90,5%	41,3
X 500	7,47	3,10	7,35	2,82	20,73	89,5%	41,2
X 1000	14,97	3,14	14,71	2,77	40,77	86,9%	40,5

**Efficiency versus Sun Concentration**



Measurement conditions: 1.5 AM2 – 1000 W/m<sup>2</sup> (ASTM G 173-03), T = 25 °C, delugated measurement area = 100,01 mm<sup>2</sup>

Copyright © 2015 AZUR SPACE Solar Power GmbH

DB 0004355-00-01  
 Issue: 2016-12-21  
 Page 1 of 4  
 AZUR DOCUMENT released for publication (Level 1 of 5)

**AZUR SPACE Solar Power GmbH**  
 Theresienstr. 2  
 74072 Heilbronn  
 phone: +49 7131 67 2603  
 telefax: +49 7131 67 2727  
 e-mail: info@azurspace.com  
 website: www.azurspace.de

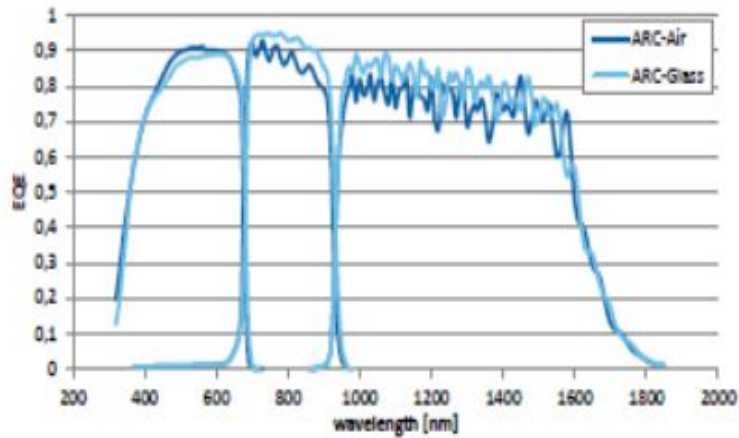
**Certified Company**  
 ISO 9001  
 ISO 14001  
 OHSAS 18001

3C44

CPV



Spectral Response



Typical Temperature Coefficients

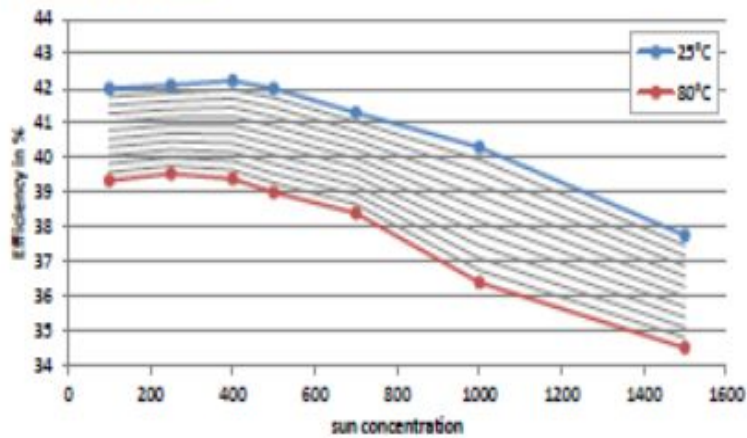
Temperature range (25 – 80 °C)

Parameter	$(\Delta I_{sc} / I_{sc}(25°C)) / \Delta T$	$(\Delta V_{oc} / V_{oc}(25°C)) / \Delta T$	$(\Delta P_{mp} / P_{mp}(25°C)) / \Delta T$	$(\Delta \eta / \eta(25°C)) / \Delta T$
Value	0,080%/K	-0,135%/K	-0,106%/K	-0,106%/K
Parameter	$\Delta I_{sc} / \Delta T$	$\Delta V_{oc} / \Delta T$	$\Delta P_{mp} / \Delta T$	$\Delta \eta / \Delta T$
Value	5,1 mA/K	-4,2 mV/K	-22,5 mW/K	-0,045%/K

Exemplary values measured with version MGAir, at 500 suns

Typical Performance over Temperature

Exemplary for version MGAir



3C44



Version Comparison

Opto Electrical Behaviour		Influence of Cell Dimension	
Antireflective Coating	Efficiency change on glass covered cells	Active Area	Typical efficiency (Version MC/Air at 250 suns)
Version Air	-3,2 % <sub>ref</sub>	3 x 3 mm	44,0 %
Version Glass	-0,4 % <sub>ref</sub>	5,5 x 5,5 mm	42,9 %
		10 x 10 mm	42,1 %

Efficiency comparison at 500 suns

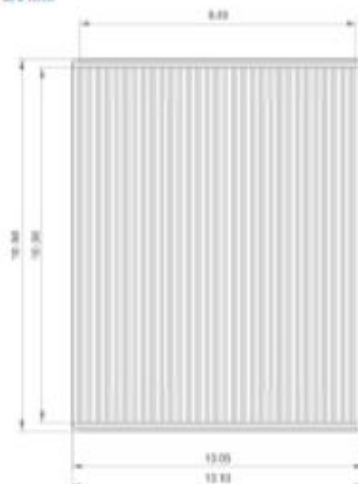


Design and Mechanical Data

Base Material	GaInP/GaInAs/Ge on Ge substrate
AR coating	TiO <sub>2</sub> /AlO <sub>2</sub>
Chip size	10,1 mm x 10,5 mm = 106,05 mm <sup>2</sup>
Active Cell Area	10,0 mm x 10,0 mm = 100 mm <sup>2</sup>
Cell thickness	190 μm ± 20 μm
Polarity	N on P
Thickness of front contact	≥ 2,8 μm (finish is an Ag/Au alloy)
Thickness of back contact	≥ 2,5 μm (finish is an Ag/Au alloy)
Assembly methods	suitable for welding, soldering and bonding

Layout details

Drawing dimension are mm



Sample drawing shows version with VC-grid design; More details in drawing HNR 000762 and HNR 000763, available on request.

3C44











**Storage and Operation Conditions Requirements**

- Humidity protection is strongly recommended
- Storage in dry air or nitrogen atmosphere is requested
- As front side interconnector material we recommend gold or silver
- We recommend to use Sn96.5/Ag3.5-solder or another solder with saturated silver for rear side assembly
- A void free rear side assembly (heat sink) is requested to avoid hot spots
- The cell junction shall not exceed a maximum operation temperature of 110° C
- Secondary glass glue on the front side has to be flexible (prefer silicone glue or similar)

**Additional information**

- Current values at specific operating voltage can be offered on customer request
- Explanation of ARC versions:
  - o AIR: The antireflective coating on top of the solar cell is optimized for the interface to air. In this kind of application the light enters the solar cell directly from air. The indoor test measurement (flash test) will be done at air atmosphere.
  - o GLASS: The antireflective coating on top of the solar cell is optimized for the interface to glass or similar (n=1.43). At this kind of application the light enters the solar cell through a glass component or similar (e.g. secondary element, homogenizer element, cover glass). However, the indoor test measurement (flash test) will be done at air atmosphere without glass interface. Therefore the flash test results will underestimate the potential cell performance. The performance of a system with glass interfaces is expected to be higher using cells with ARC Glass than with ARC Air.
- Acceptance test rules for delivery lots:
  - o Minimum average efficiency = typical average value minus 2% (rel.)
  - o Minimum individual cell efficiency = typical average value minus 5% (rel.)

**Order information**

Product Version	 wafer (not doped)	 doped wafer, mounted on a tape
 MC/Air	81244	81245
 MC/Glass	81246	81247
 HC/Air	81248	81249
 HC/Glass	81250	81251

3C44

Copyright © 2015 AZUR SPACE Solar Power GmbH

AZUR SPACE Solar Power GmbH  
 Theresenstr. 2  
 74072 Heilbronn  
 phone: +49 7131 67 2603  
 telefax: +49 7131 67 2727  
 e-mail: info@azurspace.com  
 website: www.azurspace.de

Certified Company

ISO 9001  
 ISO 14001  
 OHSAS 18001

DB 0004355-00-01  
 Issue: 2016-12-21  
 Page 4 of 4

AZUR DOCUMENT released for publication (Level 1 of 5)

CPV

ANEXO B HOJA DE DATOS DE LA CELDA PELTIER



Thermoelectric  
Cooler

**TEC1-12706**

**Performance Specifications**

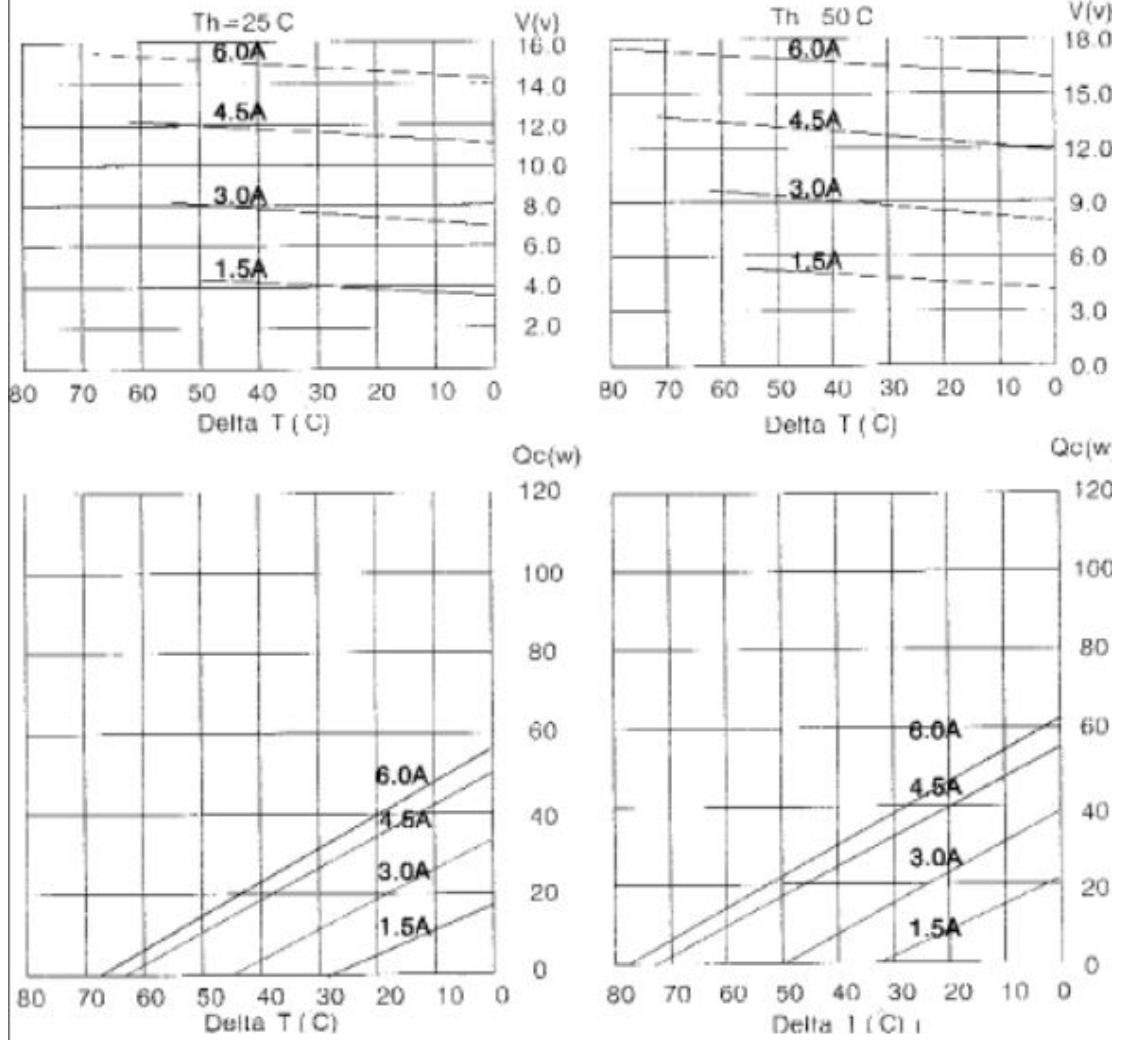
Hot Side Temperature (°C)	25°C	60°C
Qmax (Watts)	50	57
Delta Tmax (°C)	88	76
I <sub>max</sub> (Amps)	6.4	6.4
V <sub>max</sub> (Volts)	14.4	18.4
Module Resistance (Ohms)	1.88	2.30



Performance curves on page 2



TEC1-12706

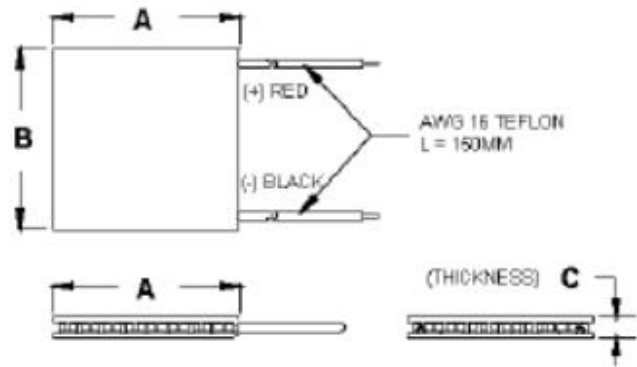


Copyright HB Corporation. HB reserves the right to change these specifications without notice.

Rev 2.03



TEC1-12706



Ceramic Material: Alumina ( $Al_2O_3$ )  
 Solder Construction: 138°C, Bismuth Tin (BiSn)

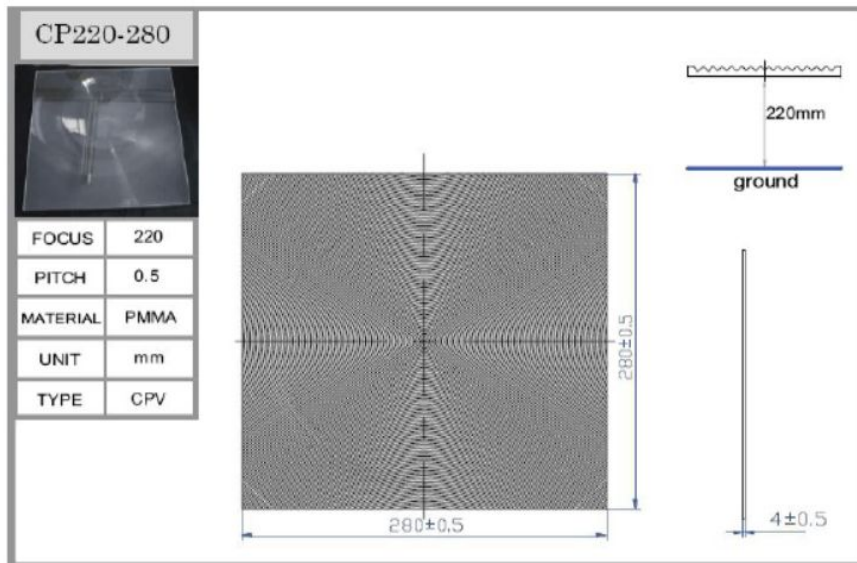
Size table:

A	B	C			
40	40	3.8			

Operating Tips

- Max. Operating Temperature: 138°C
- Do not exceed  $I_{max}$  or  $V_{max}$  when operating module.
- Life expectancy: 200,000 hours
- Please consult HB for moisture protection options (sealing).
- Failure rate based on long time testings: 0.2%.

ANEXO C HOJA DE DATOS DEL LENTE DE FRESNEL



**Technical information**

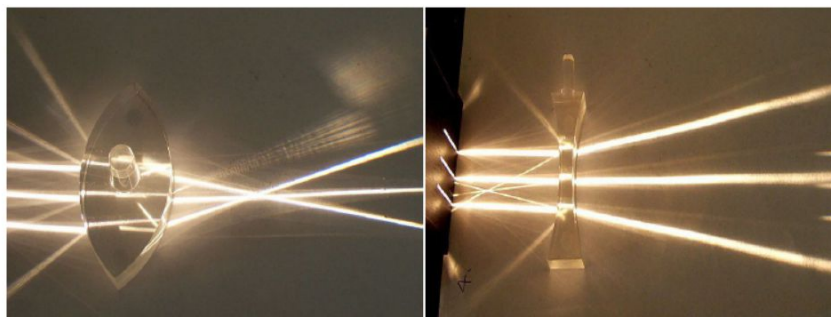
Focal Length (mm) = 220  
 Size (mm) : 280x280  
 Groove Pitch (mm) : 0.5  
 Thickness (mm) : 4  
 Material : PMMA  
 Type : CPV

Groove pitch of CPV is upside down to prevent contamination from outdoor usages.

CPV Fresnel lenses are 50~ 100% thicker than other Fresnel lenses.

Also Groove pitch is wider for high efficiency.

Also we design to use more 3mm Optical PMMA for loner life time and to have 0.5 ~ 1.0mm groove pitch for higher solar concentration.  
 (If groove pitch is density, then quality of image that is maginified is clearer.If groove pitch is width, then efficeinc of concentration of light is higher.)



◆ Refraction of light with Conve and Concave lens

## ANEXO D COMPORTAMIENTO DE EL TERMOPAR TIPO K

TERMOCUPLA °C	K milivolts									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-270	-6.458									
-260	-6.441	-6.444	-6.446	-6.448	-6.450	-6.452	-6.453	-6.455	-6.456	-6.457
-250	-6.404	-6.408	-6.413	-6.417	-6.421	-6.425	-6.429	-6.432	-6.435	-6.438
-240	-6.344	-6.351	-6.358	-6.364	-6.371	-6.377	-6.382	-6.388	-6.394	-6.399
-230	-6.262	-6.271	-6.280	-6.289	-6.297	-6.306	-6.314	-6.322	-6.329	-6.337
-220	-6.158	-6.170	-6.181	-6.192	-6.202	-6.213	-6.223	-6.233	-6.243	-6.253
-210	-6.035	-6.048	-6.061	-6.074	-6.087	-6.099	-6.111	-6.123	-6.135	-6.147
-200	-5.891	-5.907	-5.922	-5.936	-5.951	-5.965	-5.980	-5.994	-6.007	-6.021
-190	-5.730	-5.747	-5.763	-5.780	-5.796	-5.813	-5.829	-5.845	-5.860	-5.876
-180	-5.550	-5.569	-5.587	-5.606	-5.624	-5.642	-5.660	-5.678	-5.695	-5.712
-170	-5.354	-5.374	-5.394	-5.414	-5.434	-5.454	-5.474	-5.493	-5.512	-5.531
-160	-5.141	-5.163	-5.185	-5.207	-5.228	-5.249	-5.271	-5.292	-5.313	-5.333
-150	-4.912	-4.936	-4.959	-4.983	-5.006	-5.029	-5.051	-5.074	-5.097	-5.119
-140	-4.669	-4.694	-4.719	-4.743	-4.768	-4.792	-4.817	-4.841	-4.865	-4.889
-130	-4.410	-4.437	-4.463	-4.489	-4.515	-4.541	-4.567	-4.593	-4.618	-4.644
-120	-4.138	-4.166	-4.193	-4.221	-4.248	-4.276	-4.303	-4.330	-4.357	-4.384
-110	-3.852	-3.881	-3.910	-3.939	-3.968	-3.997	-4.025	-4.053	-4.082	-4.110
-100	-3.553	-3.584	-3.614	-3.644	-3.674	-3.704	-3.734	-3.764	-3.793	-3.823
-90	-3.242	-3.274	-3.305	-3.337	-3.368	-3.399	-3.430	-3.461	-3.492	-3.523
-80	-2.920	-2.953	-2.985	-3.018	-3.050	-3.082	-3.115	-3.147	-3.179	-3.211
-70	-2.586	-2.620	-2.654	-2.687	-2.721	-2.754	-2.788	-2.821	-2.854	-2.887
-60	-2.243	-2.277	-2.312	-2.347	-2.381	-2.416	-2.450	-2.484	-2.518	-2.552
-50	-1.889	-1.925	-1.961	-1.996	-2.032	-2.067	-2.102	-2.137	-2.173	-2.208
-40	-1.527	-1.563	-1.600	-1.636	-1.673	-1.709	-1.745	-1.781	-1.817	-1.853
-30	-1.156	-1.193	-1.231	-1.268	-1.305	-1.342	-1.379	-1.416	-1.453	-1.490
-20	-0.777	-0.816	-0.854	-0.892	-0.930	-0.968	-1.005	-1.043	-1.081	-1.118
-10	-0.392	-0.431	-0.469	-0.508	-0.547	-0.585	-0.624	-0.662	-0.701	-0.739
0	-0.000	-0.039	-0.079	-0.118	-0.157	-0.197	-0.236	-0.275	-0.314	-0.353
0	-0.000	0.039	0.079	0.119	0.158	0.198	0.238	0.277	0.317	0.357
10	0.397	0.437	0.477	0.517	0.557	0.597	0.637	0.677	0.718	0.758
20	0.798	0.838	0.879	0.919	0.960	1.000	1.041	1.081	1.122	1.162
30	1.203	1.244	1.285	1.325	1.366	1.407	1.448	1.489	1.529	1.570
40	1.611	1.652	1.693	1.734	1.776	1.817	1.858	1.899	1.940	1.981
50	2.022	2.064	2.105	2.146	2.188	2.229	2.270	2.312	2.353	2.394
60	2.436	2.477	2.519	2.560	2.601	2.643	2.684	2.726	2.767	2.809
70	2.850	2.892	2.933	2.975	3.016	3.058	3.100	3.141	3.183	3.224
80	3.266	3.307	3.349	3.390	3.432	3.473	3.515	3.556	3.598	3.639
90	3.681	3.722	3.764	3.805	3.847	3.888	3.930	3.971	4.012	4.054
100	4.095	4.137	4.178	4.219	4.261	4.302	4.343	4.384	4.426	4.467
110	4.508	4.549	4.590	4.632	4.673	4.714	4.755	4.796	4.837	4.878
120	4.919	4.960	5.001	5.042	5.083	5.124	5.164	5.205	5.246	5.287
130	5.327	5.368	5.409	5.450	5.490	5.531	5.571	5.612	5.652	5.693
140	5.733	5.774	5.814	5.855	5.895	5.936	5.976	6.016	6.057	6.097
150	6.137	6.177	6.218	6.258	6.298	6.338	6.378	6.419	6.459	6.499
160	6.539	6.579	6.619	6.659	6.699	6.739	6.779	6.819	6.859	6.899
170	6.939	6.979	7.019	7.059	7.099	7.139	7.179	7.219	7.259	7.299
180	7.338	7.378	7.418	7.458	7.498	7.538	7.578	7.618	7.658	7.697
190	7.737	7.777	7.817	7.857	7.897	7.937	7.977	8.017	8.057	8.097
200	8.137	8.177	8.216	8.256	8.296	8.336	8.376	8.416	8.456	8.497
210	8.537	8.577	8.617	8.657	8.697	8.737	8.777	8.817	8.857	8.898
220	8.938	8.978	9.018	9.058	9.099	9.139	9.179	9.220	9.260	9.300
230	9.341	9.381	9.421	9.462	9.502	9.543	9.583	9.624	9.664	9.705
240	9.745	9.786	9.826	9.867	9.907	9.948	9.989	10.029	10.070	10.111
250	10.151	10.192	10.233	10.274	10.315	10.355	10.396	10.437	10.478	10.519
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Nota Técnica 2, rev. b, <http://www.arlan.cl>

8

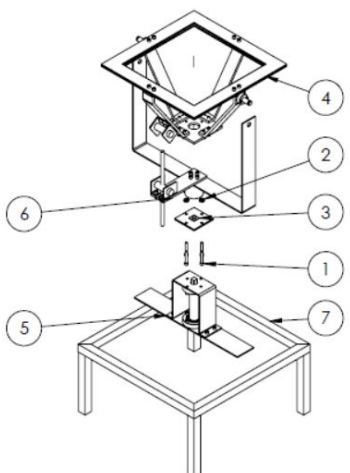
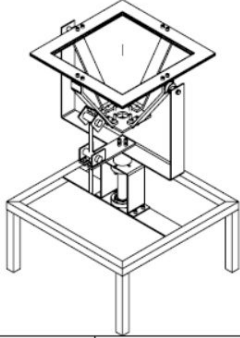
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
260	10.560	10.600	10.641	10.682	10.723	10.764	10.805	10.846	10.887	10.928
270	10.969	11.010	11.051	11.093	11.134	11.175	11.216	11.257	11.298	11.339
280	11.381	11.422	11.463	11.504	11.546	11.587	11.628	11.669	11.711	11.752
290	11.793	11.835	11.876	11.918	11.959	12.000	12.042	12.083	12.125	12.166
300	12.207	12.249	12.290	12.332	12.373	12.415	12.456	12.498	12.539	12.581
310	12.623	12.664	12.706	12.747	12.789	12.831	12.872	12.914	12.955	12.997
320	13.039	13.080	13.122	13.164	13.205	13.247	13.289	13.331	13.372	13.414
330	13.456	13.497	13.539	13.581	13.623	13.665	13.706	13.748	13.790	13.832
340	13.874	13.915	13.957	13.999	14.041	14.083	14.125	14.167	14.208	14.250
350	14.292	14.334	14.376	14.418	14.460	14.502	14.544	14.586	14.628	14.670
360	14.712	14.754	14.796	14.838	14.880	14.922	14.964	15.006	15.048	15.090
370	15.132	15.174	15.216	15.258	15.300	15.342	15.384	15.426	15.468	15.510
380	15.552	15.594	15.636	15.679	15.721	15.763	15.805	15.847	15.889	15.931
390	15.974	16.016	16.058	16.100	16.142	16.184	16.227	16.269	16.311	16.353
400	16.396	16.438	16.480	16.522	16.564	16.607	16.649	16.691	16.733	16.776
410	16.818	16.860	16.902	16.945	16.987	17.029	17.072	17.114	17.156	17.199
420	17.241	17.283	17.326	17.368	17.410	17.453	17.495	17.537	17.580	17.622
430	17.664	17.707	17.749	17.792	17.834	17.876	17.919	17.961	18.004	18.046
440	18.088	18.131	18.173	18.216	18.258	18.301	18.343	18.385	18.428	18.470
450	18.513	18.555	18.598	18.640	18.683	18.725	18.768	18.810	18.853	18.895
460	18.938	18.980	19.023	19.065	19.108	19.150	19.193	19.235	19.278	19.320
470	19.363	19.405	19.448	19.490	19.533	19.576	19.618	19.661	19.703	19.746
480	19.788	19.831	19.873	19.916	19.959	20.001	20.044	20.086	20.129	20.172
490	20.214	20.257	20.299	20.342	20.385	20.427	20.470	20.512	20.555	20.598
500	20.640	20.683	20.725	20.768	20.811	20.853	20.896	20.938	20.981	21.024
510	21.066	21.109	21.152	21.194	21.237	21.280	21.322	21.365	21.407	21.450
520	21.493	21.535	21.578	21.621	21.663	21.706	21.749	21.791	21.834	21.876
530	21.919	21.962	22.004	22.047	22.090	22.132	22.175	22.218	22.260	22.303
540	22.346	22.388	22.431	22.473	22.516	22.559	22.601	22.644	22.687	22.729
550	22.772	22.815	22.857	22.900	22.942	22.985	23.028	23.070	23.113	23.156
560	23.198	23.241	23.284	23.326	23.369	23.411	23.454	23.497	23.539	23.582
570	23.624	23.667	23.710	23.752	23.795	23.837	23.880	23.923	23.965	24.008
580	24.050	24.093	24.136	24.178	24.221	24.263	24.306	24.348	24.391	24.434
590	24.476	24.519	24.561	24.604	24.646	24.689	24.731	24.774	24.817	24.859
600	24.902	24.944	24.987	25.029	25.072	25.114	25.157	25.199	25.242	25.284
610	25.327	25.369	25.412	25.454	25.497	25.539	25.582	25.624	25.666	25.709
620	25.751	25.794	25.836	25.879	25.921	25.964	26.006	26.048	26.091	26.133
630	26.176	26.218	26.260	26.303	26.345	26.387	26.430	26.472	26.515	26.557
640	26.599	26.642	26.684	26.726	26.769	26.811	26.853	26.896	26.938	26.980
650	27.022	27.065	27.107	27.149	27.192	27.234	27.276	27.318	27.361	27.403
660	27.445	27.487	27.529	27.572	27.614	27.656	27.698	27.740	27.783	27.825
670	27.867	27.909	27.951	27.993	28.035	28.078	28.120	28.162	28.204	28.246
680	28.288	28.330	28.372	28.414	28.456	28.498	28.540	28.583	28.625	28.667
690	28.709	28.751	28.793	28.835	28.877	28.919	28.961	29.002	29.044	29.086
700	29.128	29.170	29.212	29.254	29.296	29.338	29.380	29.422	29.464	29.505
710	29.547	29.589	29.631	29.673	29.715	29.756	29.798	29.840	29.882	29.924
720	29.965	30.007	30.049	30.091	30.132	30.174	30.216	30.257	30.299	30.341
730	30.383	30.424	30.466	30.508	30.549	30.591	30.632	30.674	30.716	30.757
740	30.799	30.840	30.882	30.924	30.965	31.007	31.048	31.090	31.131	31.173
750	31.214	31.256	31.297	31.339	31.380	31.422	31.463	31.504	31.546	31.587
760	31.629	31.670	31.712	31.753	31.794	31.836	31.877	31.918	31.960	32.001
770	32.042	32.084	32.125	32.166	32.207	32.249	32.290	32.331	32.372	32.414
780	32.455	32.496	32.537	32.578	32.619	32.661	32.702	32.743	32.784	32.825
790	32.866	32.907	32.948	32.990	33.031	33.072	33.113	33.154	33.196	33.236
800	33.277	33.318	33.359	33.400	33.441	33.482	33.523	33.564	33.604	33.645
810	33.686	33.727	33.768	33.809	33.850	33.891	33.931	33.972	34.013	34.054
820	34.095	34.136	34.176	34.217	34.258	34.299	34.339	34.380	34.421	34.461

Nota Técnica 2, rev. b, <http://www.arlan.cl>

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
830	34.502	34.543	34.583	34.624	34.665	34.705	34.746	34.787	34.827	34.868
840	34.909	34.949	34.990	35.030	35.071	35.111	35.152	35.192	35.233	35.273
850	35.314	35.354	35.395	35.435	35.476	35.516	35.557	35.597	35.637	35.678
860	35.718	35.758	35.799	35.839	35.880	35.920	35.960	36.000	36.041	36.081
870	36.121	36.162	36.202	36.242	36.282	36.323	36.363	36.403	36.443	36.483
880	36.524	36.564	36.604	36.644	36.684	36.724	36.764	36.804	36.844	36.885
890	36.925	36.965	37.005	37.045	37.085	37.125	37.165	37.205	37.245	37.285
900	37.325	37.365	37.405	37.445	37.484	37.524	37.564	37.604	37.644	37.684
910	37.724	37.764	37.803	37.843	37.883	37.923	37.963	38.002	38.042	38.082
920	38.122	38.162	38.201	38.241	38.281	38.320	38.360	38.400	38.439	38.479
930	38.519	38.558	38.598	38.638	38.677	38.717	38.756	38.796	38.836	38.875
940	38.915	38.954	38.994	39.033	39.073	39.112	39.152	39.191	39.231	39.270
950	39.310	39.349	39.388	39.428	39.467	39.507	39.546	39.585	39.625	39.664
960	39.703	39.743	39.782	39.821	39.861	39.900	39.939	39.979	40.018	40.057
970	40.096	40.136	40.175	40.214	40.253	40.292	40.332	40.371	40.410	40.449
980	40.488	40.527	40.566	40.605	40.645	40.684	40.723	40.762	40.801	40.840
990	40.879	40.918	40.957	40.996	41.035	41.074	41.113	41.152	41.191	41.230
1000	41.269	41.308	41.347	41.385	41.424	41.463	41.502	41.541	41.580	41.619
1010	41.657	41.696	41.735	41.774	41.813	41.851	41.890	41.929	41.968	42.006
1020	42.045	42.084	42.123	42.161	42.200	42.239	42.277	42.316	42.355	42.393
1030	42.432	42.470	42.509	42.548	42.586	42.625	42.663	42.702	42.740	42.779
1040	42.817	42.856	42.894	42.933	42.971	43.010	43.048	43.087	43.125	43.164
1050	43.202	43.240	43.279	43.317	43.356	43.394	43.432	43.471	43.509	43.547
1060	43.585	43.624	43.662	43.700	43.739	43.777	43.815	43.853	43.891	43.930
1070	43.968	44.006	44.044	44.082	44.121	44.159	44.197	44.235	44.273	44.311
1080	44.349	44.387	44.425	44.463	44.501	44.539	44.577	44.615	44.653	44.691
1090	44.729	44.767	44.805	44.843	44.881	44.919	44.957	44.995	45.033	45.070
1100	45.108	45.146	45.184	45.222	45.260	45.297	45.335	45.373	45.411	45.448
1110	45.486	45.524	45.561	45.599	45.637	45.675	45.712	45.750	45.787	45.825
1120	45.863	45.900	45.938	45.975	46.013	46.050	46.088	46.126	46.163	46.201
1130	46.238	46.275	46.313	46.350	46.388	46.425	46.463	46.500	46.537	46.575
1140	46.612	46.649	46.687	46.724	46.761	46.799	46.836	46.873	46.910	46.948
1150	46.985	47.022	47.059	47.096	47.134	47.171	47.208	47.245	47.282	47.319
1160	47.356	47.393	47.430	47.468	47.505	47.542	47.579	47.616	47.652	47.689
1170	47.726	47.763	47.800	47.837	47.874	47.911	47.948	47.985	48.021	48.058
1180	48.095	48.132	48.169	48.205	48.242	48.279	48.316	48.352	48.389	48.426
1190	48.462	48.499	48.536	48.572	48.609	48.645	48.682	48.718	48.755	48.792
1200	48.828	48.864	48.901	48.937	48.974	49.010	49.047	49.083	49.120	49.156
1210	49.192	49.229	49.265	49.301	49.338	49.374	49.410	49.446	49.483	49.519
1220	49.555	49.591	49.627	49.663	49.700	49.736	49.772	49.808	49.844	49.880
1230	49.916	49.952	49.988	50.024	50.060	50.096	50.132	50.168	50.204	50.240
1240	50.276	50.311	50.347	50.383	50.419	50.455	50.491	50.526	50.562	50.598
1250	50.633	50.669	50.705	50.741	50.776	50.812	50.847	50.883	50.919	50.954
1260	50.990	51.025	51.061	51.096	51.132	51.167	51.203	51.238	51.274	51.309
1270	51.344	51.380	51.415	51.450	51.486	51.521	51.556	51.592	51.627	51.662
1280	51.697	51.733	51.768	51.803	51.838	51.873	51.908	51.943	51.979	52.014
1290	52.049	52.084	52.119	52.154	52.189	52.224	52.259	52.294	52.329	52.364
1300	52.398	52.433	52.468	52.503	52.538	52.573	52.608	52.642	52.677	52.712
1310	52.747	52.781	52.816	52.851	52.886	52.920	52.955	52.989	53.024	53.059
1320	53.093	53.128	53.162	53.197	53.232	53.266	53.301	53.335	53.370	53.404
1330	53.439	53.473	53.507	53.542	53.576	53.611	53.645	53.679	53.714	53.748
1340	53.782	53.817	53.851	53.885	53.920	53.954	53.988	54.022	54.057	54.091
1350	54.125	54.159	54.193	54.228	54.262	54.296	54.330	54.364	54.398	54.432
1360	54.466	54.500	54.535	54.569	54.603	54.637	54.671	54.705	54.739	54.773
1370	54.807	54.841	54.875							
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

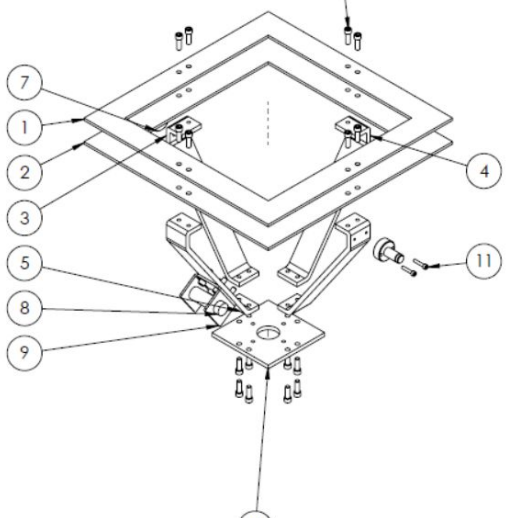


ANEXO E DISEÑO DE ESTRUCTURA DE CONCENTRADOR SOLAR

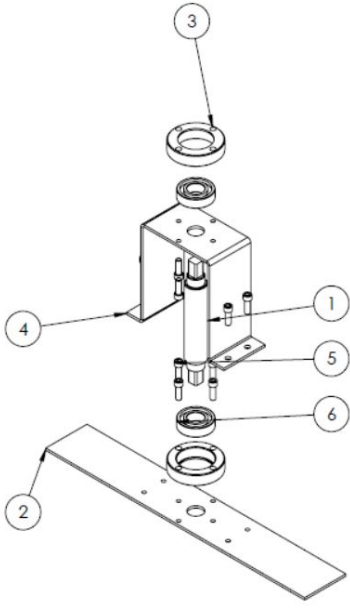
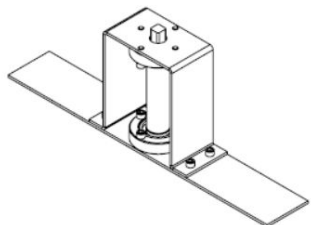
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	HX-SHCS 0.25-20x1.5x1-N	Tornillo de 1/4"X3"	4
2	HHJNUT 0.2500-20-D-N	Tuerca de 1/4"	4
3	Sistema de Enfriamiento	CeldaPV-Disipador-Peltier	1
4	Esqueleto del fotovoltaico	Soporte del sistema	1
5	Soporte angulo Azimuth	Mecanismo de ang-azimuth	1
6	Mec-ang-zenith	Mecanismo Ang-Zenith	1
7	Base	Base del banco de prueba	1

	Nombre del Proyecto	Nombre de la Pieza	Diseño: Daniel Moreno Jorge Daniel Moreno Gómez	Asesor: Dr. Ivan Salgado Tránsito
	Indicadores Generales	Banco de Pruebas	Ensamble Completo	Título: Jorge Daniel Moreno Gómez
Indicadores Particulares	Indicadores Particulares		Aprobó: Mpto. Diego Torres	Fecha: 19/04/2017
Material: Acabado:	Acot. mm - [plg] mm Tolerancias: ±0.04		Prototipo para Tesis	
			Escala 1:10	Página 1/27





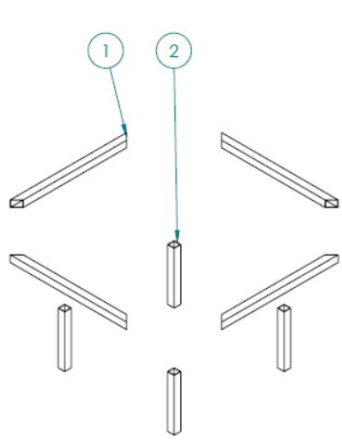
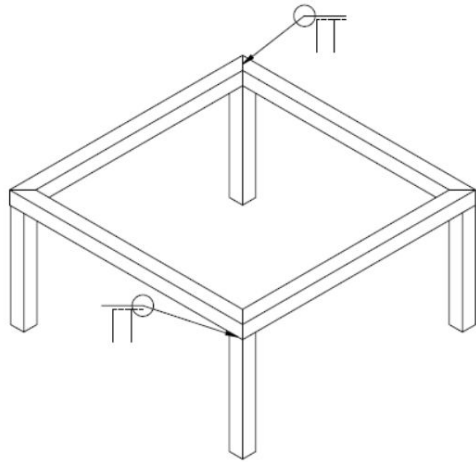
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Acrílico	Bastidor Acrílico 1	1
2	Acrílico 2	Bastidor Acrílico 2	1
3	Soporte 1	Soporte para giro	2
4	Soporte 2	Soporte simple	1
5	Soporte Z	Soporte para mov. zenith	1
6	Base de soporte	Base del Soporte	1
7	Ejes	Eje	2
8	Ejezenith a tope	Eje para libre giro	1
9	Base sin ranura	Base sin ranura para mov. zenith	1
10	HX-SHCS 0.25-20x0.75x0.75-N	Tornillo de 1/4"X3/4"	20
11	B18.3.1M - 4 x 0.7 x 20 Hex SHCS -- 20NHX	Tornillo milimetrico M4X20	4

	Nombre del Proyecto	Nombre de la Pieza	Diseño: Daniel Moreno Jorge Daniel Moreno Gómez	Asesor: Dr. Ivan Salgado Tránsito
	Indicadores Generales	Banco de Pruebas	Soporte del Sistema	Título: Jorge Daniel Moreno Gómez
Indicadores Particulares	Indicadores Particulares		Aprobó: Mpto. Diego Torres	Fecha: 19/04/2017
Material: Varios Acabado:	Acot. mm - [plg] mm Tolerancias: ±0.04		Prototipo para Tesis	
			Escala 1:10	Página 3/27





N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	mov azimuth	Eje del azimuth	1
2	Base-portabalero	Base del azimuth	1
3	portabalero	Base para el Balero	2
4	soporte-portabalero	Soporte general Azimuth	1
5	HX-SHCS 0,25-20x0,75x0,75-N	Tornillo de 1/4"X3/4"	12
6	AFBMA 20.1 - 10-20 - 12,SI,NC,12_68	Baleros	2

 Nombre del Proyecto <b>Banco de Pruebas</b> Indicadores Generales Indicadores Particulares Material: Acol. mm - [plg] mm Tolerancias: ±0.04	Nombre de la Pieza Mecanismo de ang. azimuth	Diseñó: Daniel Moreno Jorge Daniel Moreno Gómez Título: Jorge Daniel Moreno Gómez Aprobó: Mpto. Diego Torres Maquinó: Jorge Daniel Moreno Gómez	Asesor: Dr. Ivan Salgado Tránsito Fecha: 19/04/2017 Prototipo para Tesis Escala 1:4 Pagina 13/27
			

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Bastidor	Perfil cuadrado 1" para Bast	4
2	Patas Base	Perfil cuadrado 1" para patas	4

 Nombre del Proyecto <b>Banco de Pruebas</b> Indicadores Generales Indicadores Particulares Material: Varios Acol. mm - [plg] mm Tolerancias: ±0.04	Nombre de la Pieza Base del banco de prueba	Diseñó: Daniel Moreno Jorge Daniel Moreno Gómez Título: Jorge Daniel Moreno Gómez Aprobó: Mpto. Diego Torres Maquinó: Jorge Daniel Moreno Gómez	Asesor: Dr. Ivan Salgado Tránsito Fecha: 19/04/2017 Prototipo para Tesis Escala 1:10 Pagina 25/27
	