



"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"

# **UNIVERSIDAD DE SONORA**

---

## **DIVISIÓN DE INGENIERÍA**

### **POSGRADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**

**Estudio experimental del desempeño térmico y  
eléctrico de CPV de disco parabólico con celdas de  
triple unión**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**

**PRESENTA:**

**NIDIA ARACELY CISNEROS CÁRDENAS**

**DIRECTOR: DR. RAFAEL ENRIQUE CABANILLAS LÓPEZ**

**Hermosillo, Sonora**

**junio, 2018**

## OFICIO DE APROBACIÓN DEL JURADO

OFICIO DE AUTORIZACIÓN DE EXAMEN DE GRADO

## RESUMEN

Este análisis experimental consiste en la evaluación del desempeño térmico y eléctrico de un concentrador solar fotovoltaico de disco parabólico utilizado para la generación de potencia eléctrica a partir de celdas de triple unión. Este sistema fue desarrollado por investigadores de la University of Arizona; la óptica utilizada se denomina XRX-Kohler y logra una concentración de 1000x produciendo 1.2 kW y 2.4 kW eléctrico y térmico, respectivamente, a una radiación directa normal de  $900 \text{ W/m}^2$  y a una temperatura ambiente de  $20^\circ\text{C}$ . Se realizaron diferentes tipos de pruebas experimentales en las que se evaluó la capacidad de potencia de potencias térmica y eléctrica en operación normal, la producción máxima de potencia eléctrica, la producción de potencia eléctrica en función de la temperatura de operación y la producción de potencia eléctrica durante una jornada completa. Encontrándose valores máximos de eficiencia eléctrica instantánea de 24.3% y de 22.6% para operación continua para un día de operación.

## ABSTRACT

This experimental analysis consists of the evaluation of the thermal and electrical performance of a parabolic dish photovoltaic solar concentrator used for the generation of electrical power from triple junction cells. This system was developed by researchers at the University of Arizona; the optics system used is called XRX-Kohler and achieved a concentration of 1000x producing 1.2 kWe and 2.4 kWt, under a direct normal irradiance of 900 W / m<sup>2</sup> and an ambient temperature of 20 ° C. Different types of experimental tests were carried out to evaluate the capacity of power of the thermal and electric powers in normal operation, the maximum production of electric power, the production of electric power depending on the operating temperature and the production of electric power for a full day. Finding maximum values of instantaneous electrical efficiency of 24.3% and 22.6% for continuous operation for a complete day.

---

## DEDICATORIA

Opcional

---

---

## TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN .....</b>	<b>V</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>V</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>X</b>
<b>LISTA DE TABLAS .....</b>	<b>XII</b>
<b>NOMENCLATURA .....</b>	<b>XIII</b>
<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1.1. Antecedentes.....	4
<b>1.2. Justificación.....</b>	<b>7</b>
<b>1.3. Objetivo General .....</b>	<b>8</b>
<b>1.4. Objetivos Específicos.....</b>	<b>8</b>
<b>1. 1.5 Metodología general.....</b>	<b>8</b>
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>10</b>
<b>ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS.....</b>	<b>10</b>

---

<b>2.1. Celda solar fotovoltaica.....</b>	<b>10</b>
2.1.1. Celdas multi-unión .....	12
<b>2.2. Configuración óptica .....</b>	<b>14</b>
<b>2.3. Sistema de concentración solar fotovoltaico.....</b>	<b>17</b>
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>22</b>
<b>MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>22</b>
<b>3.1. Equipo.....</b>	<b>22</b>
<b>3.2. Metodología.....</b>	<b>23</b>
3.2.1. Caracterización eléctrica .....	25
3.2.2. Caracterización térmica .....	27
3.2.3. Balance de energía.....	29
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>33</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>33</b>
<b>4.1 Resultados preliminares .....</b>	<b>33</b>
<b>4.2 Resultados finales .....</b>	<b>36</b>
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>54</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>54</b>
<b>5.1 Conclusiones .....</b>	<b>54</b>
<b>5.2 Recomendaciones .....</b>	<b>56</b>

---

<b>CAPÍTULO 6.....</b>	<b>57</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>57</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>61</b>

---

---

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Consumo mundial de energía. (British Petroleum , 2016).....	2
<b>Figura 2.</b> Precio del watt a través del tiempo. (Bloomberg New Energy Finance, 2016) .	3
<b>Figura 3.</b> Capacidad instalada mundial de energía solar fotovoltaica. (Energía Renovable, 2015).....	3
<b>Figura 4.</b> Concentrador PV de disco parabólico con celdas triple unión y óptica Kohler. ....	6
<b>Figura 5.</b> Componentes de la unidad de potencia (PCU).....	6
<b>Figura 6.</b> Efecto fotoeléctrico (izquierda) y Efecto fotodiodosemiconductor (derecha)	11
<b>Figura 7.</b> Espectro de radiación solar absorbido por una celda de Si.....	11
<b>Figura 8.</b> Estructura de una celda de triple unión.....	13
<b>Figura 9.</b> Espectro de radiación solar absorbido por una celda multi-unión. ....	13
<b>Figura 10.</b> Lente fresnel (izquierda) y Sistema CPV con lente fresnel (derecha). ....	15
<b>Figura 11.</b> Arreglo óptico cassegrain (izquierda) y Arreglo óptico cassegrain implementado en un sistema CPV (derecha) .....	16
<b>Figura 12.</b> Sistema óptico XRK-Kohler (Coughenour, et al., 2014) .....	16
<b>Figura 13.</b> Rayos refractados por la esfera (R) sobre el pequeño arreglo de espejos y posteriormente, sobre las celdas PV (Coughenour, et al., 2014).....	17
<b>Figura 14.</b> Concentrador solar de disco parabólico con óptica XRK-Kohler. ....	23
<b>Figura 15.</b> Pirheliómetro Marca Eppley.....	24
<b>Figura 16.</b> Sistema automatizado de carga eléctrica externa variable. ....	26
<b>Figura 17.</b> Unidad de potencia sin entrada de gas nitrógeno (izquierda) y unidad de potencia con entrada de gas nitrógeno (derecha) .....	28
<b>Figura 18.</b> Sistema hidráulico de pruebas para la evaluación de la caída de presión dentro de una unidad de conversión de potencia. ....	29
<b>Figura 19.</b> Diagrama de los arreglos térmico y eléctrico del concentrador. ....	30
<b>Figura 20.</b> Curva I-V a T= 38°C .....	34
<b>Figura 21.</b> Curva I-V a T= 54 °C .....	34
<b>Figura 22.</b> Eficiencias térmica y eléctrica en función de la temperatura de operación.	35

---

<b>Figura 23.</b> Estudio de caída de presión dentro de las unidades de conversión de potencia. ....	37
<b>Figura 24.</b> Radiación directa normal durante el intervalo seleccionado.....	38
<b>Figura 25.</b> Comportamiento de la potencia eléctrica durante el intervalo de estudio... 38	
<b>Figura 26.</b> Comportamiento de la potencia eléctrica y su efecto sobre la temperatura de una celda MJ.....	40
<b>Figura 27.</b> Comportamiento de la potencia eléctrica y la potencia térmica.....	41
<b>Figura 28.</b> Curva IV correspondiente a una de las celdas del arreglo PV del sistema. 42	
<b>Figura 29.</b> Curva IV correspondiente a una de las celdas de arreglo PV del sistema. 42	
<b>Figura 30.</b> Eficiencias térmica y eléctrica.....	43
<b>Figura 31.</b> Eficiencia total del sistema.....	44
<b>Figura 32.</b> Radiación directa normal, potencia térmica y potencia eléctrica durante operación en circuito abierto .....	45
<b>Figura 33.</b> Eficiencia total del sistema sin producción eléctrica.....	46
<b>Figura 34.</b> Eficiencias del concentrador 2M y del arreglo PV.....	47
<b>Figura 35.</b> Degradación de los espejos.....	47
<b>Figura 36.</b> Sombramiento realizado por la estructura de soporte y los PCUs sobre el área reflectora.....	48
<b>Figura 37.</b> Desbordamiento de radiación sobre los PCUs.....	48
<b>Figura 38.</b> Reflectancia de la esfera silica. ....	49
<b>Figura 39.</b> Eficiencia eléctrica instantánea del concentrador a lo largo de 5 meses de evaluación.....	50
<b>Figura 40.</b> Eficiencia eléctrica instantánea del concentrador en función de la temperatura.	
<b>Figura 41.</b> Eficiencia eléctrica instantánea del arreglo PV. ....	51
<b>Figura 42.</b> Radiación directa normal y potencias térmica y eléctrica durante una jornada diaria de operación normal.....	53

---

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Factor de llenado en función de la temperatura.....	34
---	----

---

## NOMENCLATURA

2M	2 Mirror Tracker: Seguidor de dos espejos, en referencia al concentrador fotovoltaico de 2 espejos.
CPV	Concentrador fotovoltaico
CPV-T	Concentrador térmico-fotovoltaico
DNI	Radiación directa normal
E2M	Eficiencia eléctrica instantánea del concentrador 2M
FF	Factor de llenado
GEI	Gases de efecto invernadero
HCPV	Sistema de alta concentración fotovoltaica
I-V	Intensidad-Voltaje; en referencia a las curvas I-V
LB	Banco de carga
LCPV	Sistema de baja concentración fotovoltaica
MCPV	Sistema de media concentración fotovoltaica
MJ	Multi-unión; en referencia a las celdas MJ
PCU	Unidad de conversión de potencia
PV	Fotovoltaico
REC	Eficiencia eléctrica instantánea con base en la radiación que reciben las celdas

---

## AGRADECIMIENTO

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

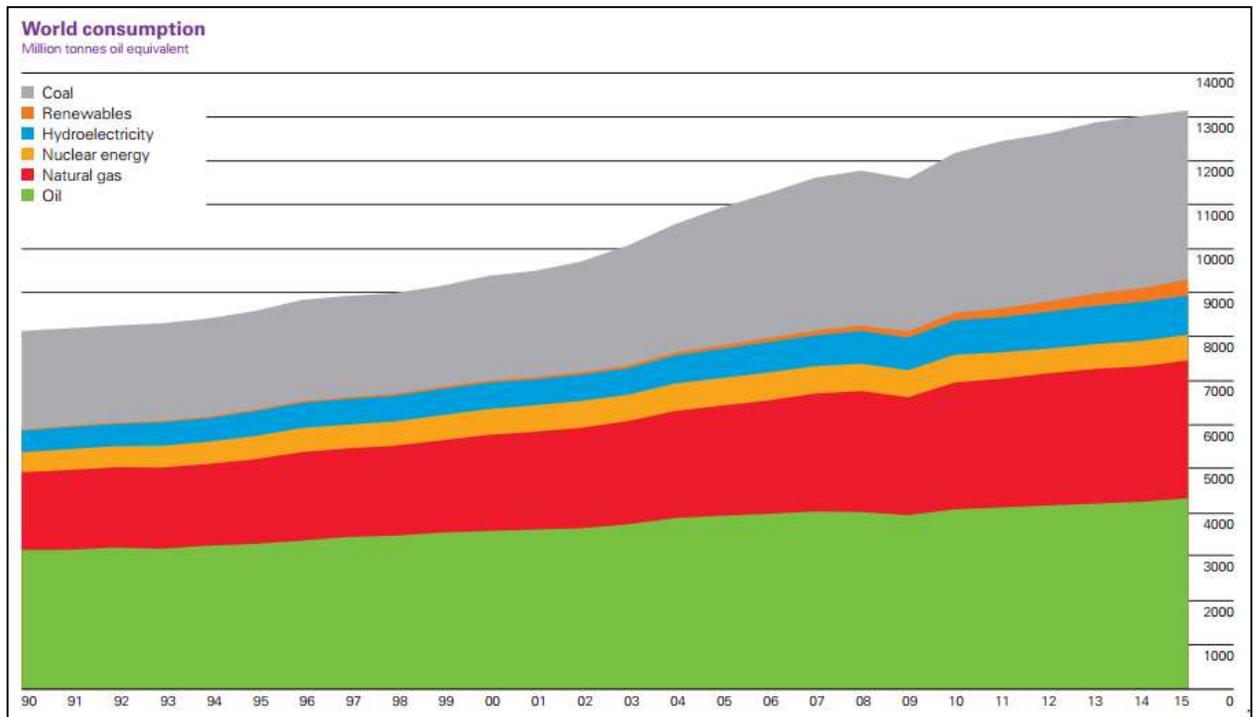
### 1.1.Introducción

El sistema energético global está sujeto a un crecimiento general de la demanda ya que las sociedades exigen mejores condiciones de vida, y esto se ha logrado en gran parte con el uso intensivo de energéticos fósiles (Figura 1) que generan CO<sub>2</sub> a la atmósfera, lo que intensifica el efecto invernadero. La preocupación por suplir de energía a la sociedad para lograr mejores niveles de vida haciéndolo de forma sustentable plantea la problemática de transformar el actual sistema energético, basado en combustibles fósiles, a un sistema que involucre el uso de fuentes más limpias y perdurables frenando así el cambio climático - gran parte del aumento del consumo de energía total es debido a la industria de la generación de energía eléctrica.

En México, la incorporación de la energía limpia en el mix de la generación de energía eléctrica, contemplada en la Reforma Energética facilitará el logro de que el 35% de la generación eléctrica provenga de fuentes limpias en 2024 (un objetivo específico en la Ley de Transición Energética) y desempeña un papel crucial de cara al cumplimiento de su compromiso por reducir, al 2030, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) como mínimo en un 25% con respecto al escenario actual (International Energy Agency, 2016). Esta normativa nace de la participación de México en el Acuerdo de París en el cual se establecieron medidas internacionales para frenar el cambio climático (Comisión Europea, 2017).

Con cifras correspondientes al año 2017, el porcentaje de energía eléctrica proveniente de fuentes limpias es de 18.98% (Secretaría de Energía, 2018) por lo que las decisiones

sobre las fuentes utilizadas para la generación de energía eléctrica que se tomen a corto plazo serán cruciales para lograr las metas establecidas.



**Figura 1.** Consumo mundial de energía. (British Petroleum , 2016)

Este estudio se desarrolla dentro del área de la energía solar fotovoltaica, donde las celdas solares fotovoltaicas (PV) son el elemento esencial de los dispositivos de la utilización de la radiación solar y su transformación en energía eléctrica.

La celda fotovoltaica es un dispositivo que permite convertir la radiación solar en potencia eléctrica, a través del efecto fotoeléctrico y el efecto fotodiodo semiconductor, sin la interferencia de algún tipo de maquinaria térmica. La eficiencia de las celdas fotovoltaicas ha aumentado rápidamente durante la última década, según National Research Energy Laboratory, lo cual ha contribuido a la disminución del precio por kilowatt en la producción de energía eléctrica a través del tiempo (Figura 2), posicionando estas tecnologías como una alternativa accesible y consecuentemente, incrementando la capacidad mundial instalada anualmente (Figura 3).

El desarrollo de celdas con mayor eficiencia conlleva a costos más elevados en su producción, estas celdas son llamadas multi-unión (MJ, por sus siglas en inglés) debido a que presentan varias capas de uniones en su composición y debido a su alto costo, generalmente son utilizadas en sistemas de concentración fotovoltaica (CPV, por sus siglas en inglés) (McConell, 2005).

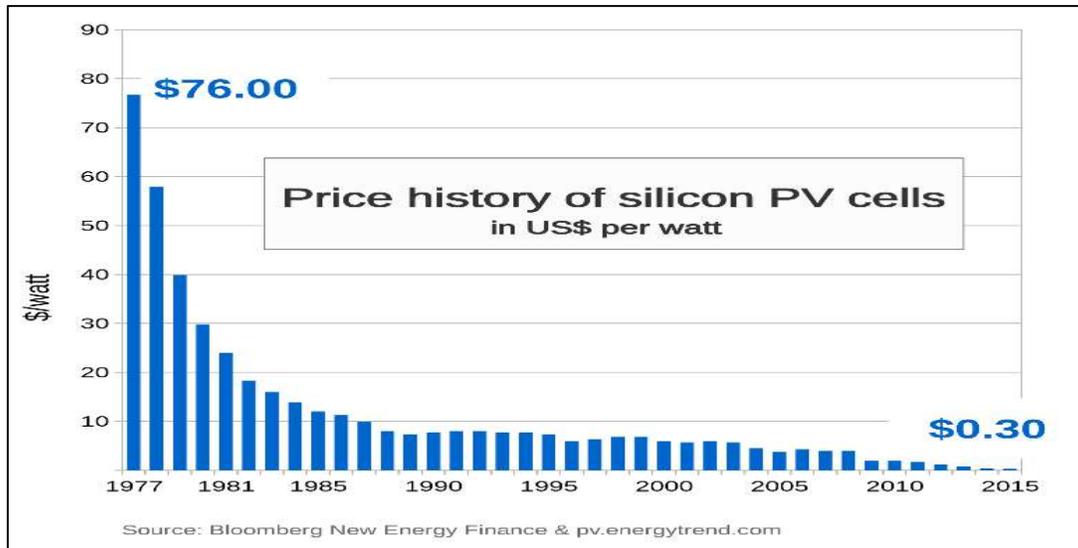


Figura 2. Precio del watt a través del tiempo. (Bloomberg New Energy Finance, 2016)

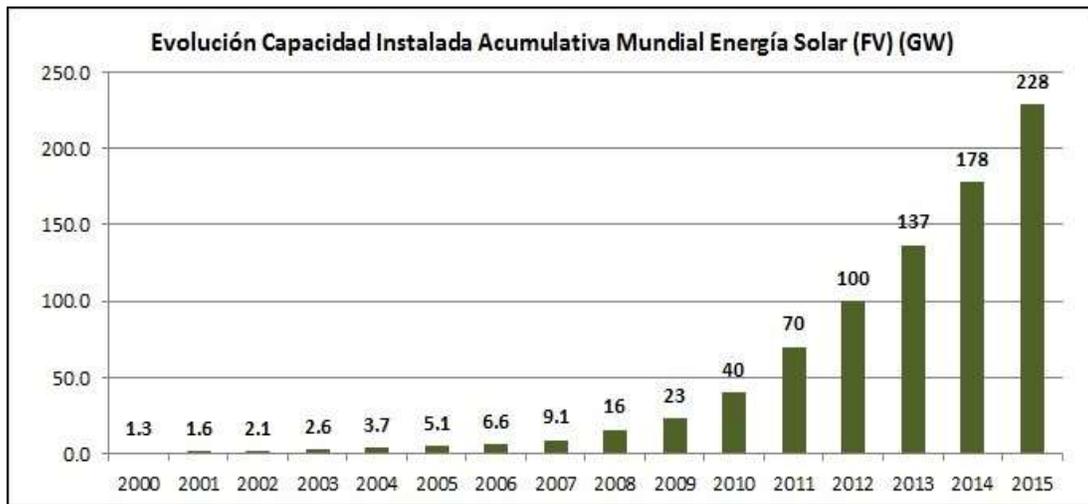


Figura 3. Capacidad instalada mundial de energía solar fotovoltaica. (Energía Renovable, 2015)

El funcionamiento de los CPV se basa en concentrar la radiación solar en un área pequeña donde se encuentran las celdas MJ; el proceso de concentración se logra a través del uso de lentes y/o espejos en una configuración óptica especial que resultan en un incremento de la razón de concentración de radiación reduciendo el área de celdas MJ requeridas (Luque López & Andreev, 2007). La alta concentración de radiación solar provoca un aumento de la temperatura de las celdas por lo que es necesario acoplar un sistema de enfriamiento que mantenga las celdas en un intervalo de temperaturas seguro para la misma y para mejorar su rendimiento; también son necesarios otros sistemas que garanticen su buen funcionamiento (un mecanismo de seguimiento solar y un sistema de control general) (Zhu, et al., 2011).

Los CPV logran un máximo desempeño cuando operan con radiación directa normal, por lo que se recomienda que estos sistemas sean instalados en regiones con valores de radiación directa normal (DNI, por sus siglas en inglés) mayores a 2000 kWh/m<sup>2</sup> al año (Wiesenfarth, et al., 2017) lo que coloca a Sonora en una de las mejores regiones a nivel mundial para la producción de energía eléctrica a partir de concentradores fotovoltaicos ya que recibe una radiación directa normal de ~ 2730 kWh/m<sup>2</sup> al año (World Bank Group, 2016).

Aunque la tecnología de concentración fotovoltaica aún se encuentra en desarrollo, se ha convertido en un competidor serio para proyectos solares en zonas con alta radiación directa normal. Se espera que, para los próximos años, los avances en este tipo de tecnología reduzcan sus costos de producción para convertirse en uno de los competidores más fuertes del mercado en comparación de los módulos convencionales y las tecnologías de concentración solar térmica. (INSIDER, 2017).

### **1.1.1. Antecedentes**

Los investigadores de la Universidad de Arizona han presentado estudios sobre concentradores CPV de disco parabólico. Las primeras versiones de los CPV desarrollados constaban de colectores con áreas más grandes (en comparación con la versión de este estudio), unidades de conversión de potencia (PCU, por sus siglas en inglés) más grandes y eficiencia del sistema relativamente baja, además de presentar

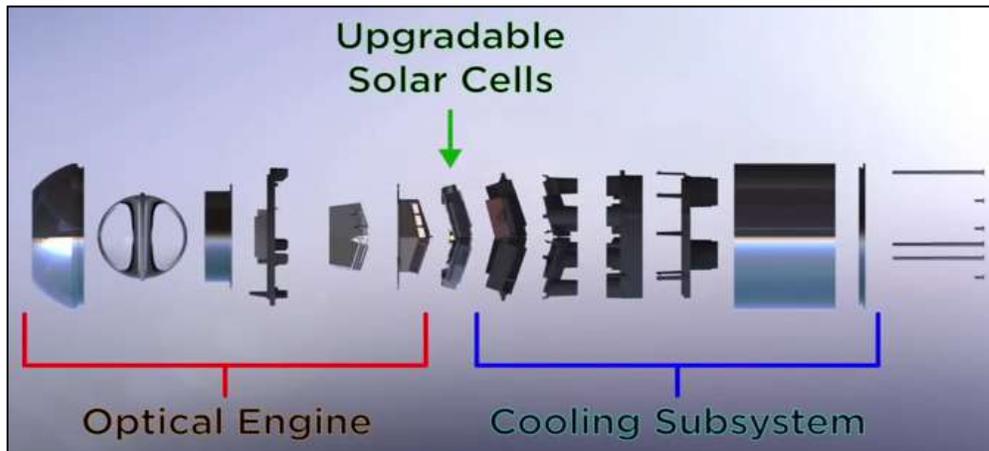
un costo de \$ 0.61 dólares por watt. La segunda generación de estos concentradores registró una eficiencia de 28.6% con un ángulo de aceptación de  $\pm 0.5^\circ$ , dicho ángulo concede un sistema de seguimiento solar más barato que los comúnmente usados para los CPV (Coughenour, et al., 2014).

En este estudio, se evaluará la eficiencia de conversión instantánea y global térmica y eléctrica de la tercera generación de CPV (Figura 4) desarrollada por dichos investigadores. Este nuevo diseño está enfocado en abaratar su producción y se espera una eficiencia eléctrica de conversión de 32% o mayor. La tercera generación presenta un sistema adaptado de bajo costo que emplea un espejo parabólico con óptica XRX-Kohler para la entrega de radiación solar uniforme y concentrada en una colección de celdas de triple unión. El diseño XRX-Kohler es una desviación de otros CPV a escala, método de manufactura y en la separación única de los elementos de colección y conversión.

La última propiedad permite la posibilidad de intercambiar celdas MJ por otras más eficientes, sin desmantelar la óptica primaria (Figura 5), por consiguiente esta característica especial asegura que el sistema no se vuelva obsoleto en poco tiempo (Kurtz, 2012). En la figura 5 se muestran los componentes del PCU dividiéndose en tres secciones: la primera corresponde a una parte del sistema óptico (esfera refractora y arreglo origami), en la segunda sección o parte central se encuentra el arreglo de celdas PV y en la tercera sección, se localiza una parte del sistema de enfriamiento (placa de enfriamiento que sirve como montura de las celdas). Otro de los aspectos destacados de este nuevo diseño es que el área de colección de radiación es una cuarta parte de su diseño anterior lo que permite que el PCU sea portátil con un peso de 2.26 Kg. Se estima que el costo por watt sea de \$ 0.13 dólares.



**Figura 4.** Concentrador PV de disco parabólico con celdas triple unión y óptica Kohler.



**Figura 5.** Componentes de la unidad de potencia (PCU).

## 1.2. Justificación

Este estudio se enmarca en el proyecto “Producción solar de energía eléctrica usando sistemas de disco parabólico, con celdas de alta eficiencia y dispositivos termo-iónicos” P03 del Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar (CEMIE-SOL) además cuenta con la colaboración de la Universidad de Arizona, la Universidad Autónoma de México y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

El presente trabajo plantea la evaluación experimental de la eficiencia tanto térmica como eléctrica de un sistema fotovoltaico de alta concentración compuesto por dos espejos parabólicos con sus respectivas unidades de conversión de potencia montados sobre una estructura de soporte. La potencia eléctrica producida está en función de la radiación solar incidente, la eficiencia de las celdas multi-unión y de la temperatura a la que éstas operan, por otra parte, la potencia térmica que produce este sistema depende de la cantidad de radiación incidente capaz de ser convertida en energía térmica. La potencia eléctrica se usará para alimentar la red pública y la térmica para un proceso posterior como calor de alimentación.

La elaboración de un análisis dinámico a partir de la radiación solar recibida en el CPV para la producción de potencia térmica y potencia eléctrica considerando, además, las pérdidas que se presentan, proporciona una buena herramienta para optimizar el uso energético del sistema.

### **1.3.Objetivo General**

Estudiar experimentalmente el desempeño térmico y eléctrico de un equipo de producción de potencia utilizando un concentrador solar de disco parabólico que incluye un arreglo de celdas fotovoltaicas de multi-unión.

### **1.4.Objetivos Específicos**

1. Instalación y pruebas de operación
2. Puesta a punto del sistema de control del seguidor solar
3. Instrumentación y monitoreo montaje
4. Diseño de las campañas de caracterización eléctrica del sistema.
5. Diseño de las campañas de caracterización térmica del sistema.
6. Evaluación eléctrica y térmica del sistema.

### **1. 1.5 Metodología general**

Para llevar a cabo este estudio exitosamente se instaló el sistema CPV en la Plataforma Solar de Hermosillo – ubicada en la carretera Hermosillo – Bahía de Kino en el Km 21.5- , para lo cual se realizó una cimentación para colocar el concentrador. Posteriormente, se instalaron los espejos parabólicos y los PCUs, ejecutando una correcta alineación entre éstos para lograr que el área de concentración se contenga dentro de la esfera refractora. Habiendo concluido exitosamente la alineación, se instaló el sistema automatizado de carga externa variable y se realizaron pruebas para comprobar su correcta operación; en conjunto con este paso, se desarrollaron habilidades para el manejo del software de control del sistema. Después, se colocaron las líneas de tubería de transporte de nitrógeno desde el tanque de almacenamiento hasta los dos PCUs; en

seguida, se hicieron pruebas de fugas para comprobar que este sistema se instaló correctamente. A continuación, se instrumentó el concentrador con un flujómetro en el circuito de agua del sistema de enfriamiento para monitorear el flujo durante las pruebas experimentales. Como último paso de la instalación, se realizaron pruebas de operación comprobando una instalación exitosa del concentrador.

Después de la instalación, se diseñaron campañas de pruebas experimentales para evaluar el concentrador tanto eléctrica como térmicamente. Para la parte eléctrica se desarrollaron pruebas para medir eficiencia eléctrica instantánea y para un día completo de operación, así como para evaluar su comportamiento con respecto a la variación de la temperatura de las celdas, curvas I-V y factor de llenado (FF). Mientras que, para la parte térmica, se evaluó el comportamiento de la eficiencia eléctrica tanto instantánea como para un día completo de operación continua y su comportamiento durante la realización de curvas I-V, así como una evaluación calorimétrica.

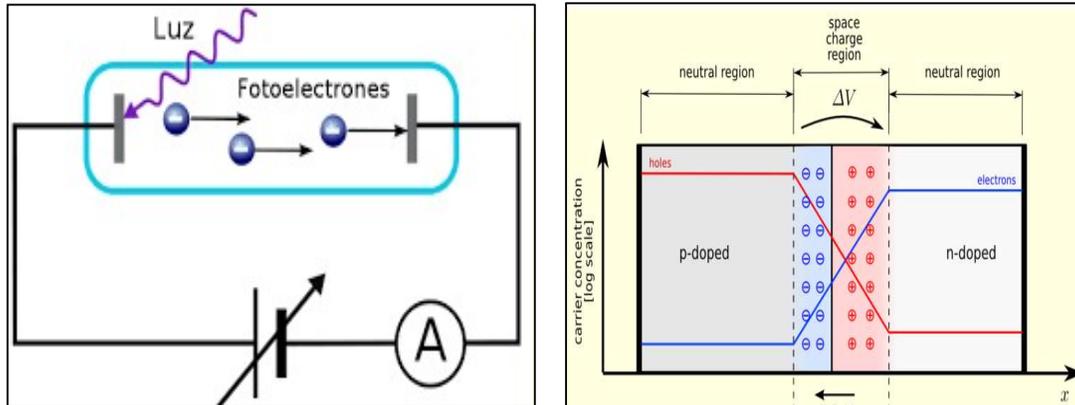
## CAPÍTULO 2

### ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

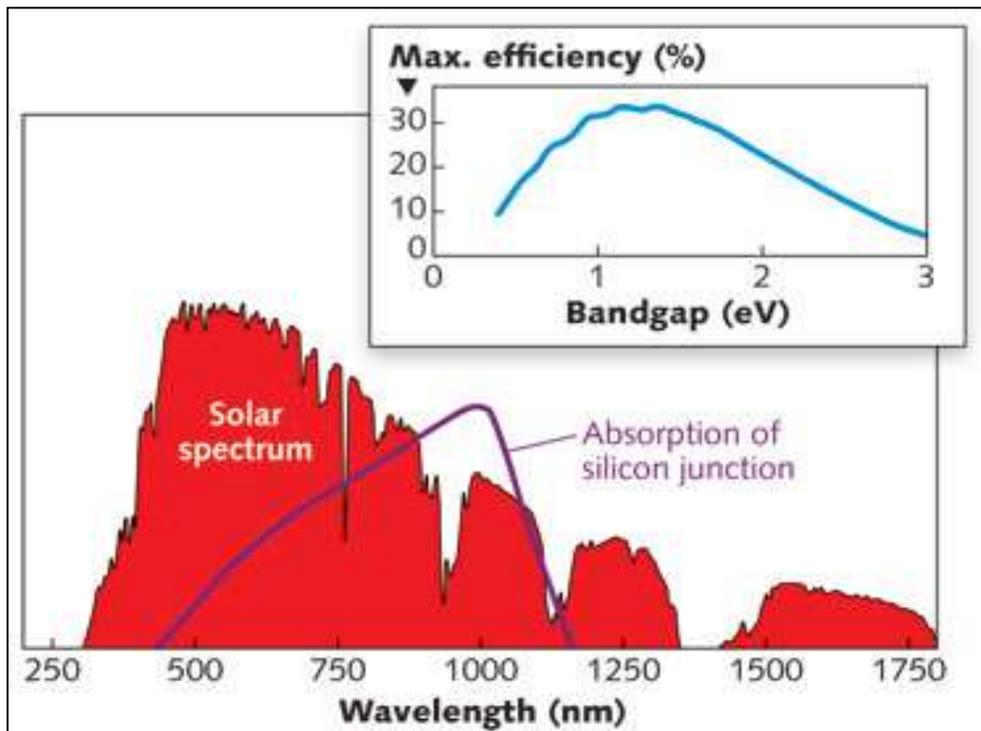
#### 2.1.Celda solar fotovoltaica

La celda solar fotovoltaica funciona con base en los siguientes efectos: fotoeléctrico y fotodiodo semiconductor (Figura 6). El efecto fotoeléctrico consiste en hacer incidir luz en la superficie de un metal (cátodo) con energía suficiente para liberar electrones que son atraídos por otra superficie de metal (ánodo), esto en un sistema cerrado, para producir una corriente de electrones. Por otra parte, el efecto fotodiodo semiconductor consta de un fotodiodo con una unión de material dopado-p y material dopado-n, con carga positiva y negativa respectivamente. Su funcionamiento se basa en hacer incidir luz sobre el material dopado-n para excitar electrones logrando que salga de su banda de valencia generando un diferencial de potencial ocasionando así una corriente eléctrica, dicha corriente circula solamente de manera inversa (con respecto a un diodo común) debido a su polarización inversa. Generalmente, están construidas de Silicio y dopadas con materiales como Fósforo, Cadmio, etc. Un módulo de celdas solares fotovoltaicas consiste en la agrupación de éstas conectadas en diferentes formas: en serie y en paralelo; el arreglo de conexiones dependerá de las características que desean obtenerse del sistema. Las celdas garantizan una eficiencia en cierto intervalo de temperaturas y considerando una distribución homogénea de luz sobre la superficie receptora, si la temperatura se eleva por encima de la recomendada se producen daños en la estructura del material y la eficiencia baja considerablemente (Jafari Fesharaki, et al., 2011).

El material que se utiliza para la fabricación de celdas fotovoltaicas está caracterizado por absorber un intervalo del espectro de radiación solar del cual obtiene la energía necesaria para llevar a cabo los efectos antes mencionados (Figura 7).



**Figura 6.** Efecto fotoeléctrico (izquierda) y Efecto fotodiodosemiconductor (derecha)



**Figura 7.** Espectro de radiación solar absorbido por una celda de Si.

### 2.1.1. Celdas multi-unión

Las celdas multi-unión (MJ, por sus siglas en inglés) son dispositivos que presentan múltiples uniones P-N hechas con diferentes materiales semiconductores. Cada unión de material produce una corriente eléctrica en respuesta a las diferentes longitudes de onda de luz que reciben, es decir, que cada unión acaba un espectro de la radiación solar recibida. Las uniones que existen son dobles (tándem), triple unión y cuádruple unión.

Las celdas triple unión generalmente tiene un arreglo de semiconductores de InGaP, InGaAs y Ge. (Figura 8). Cada capa de estas uniones está caracterizada por aprovechar un intervalo de la longitud de onda del espectro de la radiación solar, la suma total de estos intervalos abarca un área mayor (Figura 9) que las celdas sencillas lo que hace que se incremente su eficiencia. Sin embargo, la temperatura de operación de la celda impacta negativamente su rendimiento.

Las celdas MJ se han posicionado como las más eficientes a nivel laboratorio con un record registrado de 46.5% a una concentración de 324x (Tibbits, et al., 2014) mientras que para una celda triple unión se reportó una eficiencia de 44.4% a 302x (Sharp, 2013). Sin embargo, los altos costos de las celdas MJ en comparación con los dispositivos de Silicio o de película delgada (thin-film) están deteniendo su aplicación en módulos planos convencionales. No obstante, la solución al dilema costo-eficiencia se realiza mediante la aplicación de los módulos de concentración fotovoltaica. Los concentradores solares se han desarrollado con elementos ópticos de reflexión o refracción con el fin de concentrar la radiación solar en un área más pequeña donde se encuentran las celdas MJ para una conversión directa de electricidad. Este enfoque es capaz de reducir la costosa área de la celda solar mediante el incremento de la razón de concentración de luz solar y de su intensidad (Chong, et al., 2010).

A pesar de presentar una alta eficiencia en la producción eléctrica las celdas no pueden utilizar entre 60-70 % de la radiación recibida por lo que esta energía tiene que ser retirada con un sistema de enfriamiento para mantener la temperatura de la celda en un intervalo seguro que garantice su integridad y el mejor desempeño de la misma. Como cualquier celda fotovoltaica, las celdas MJ son afectadas por el incremento de la

temperatura, pero a diferencia de las celdas de unión sencilla, las MJ pueden operar a más altas temperaturas ( $\sim 90^{\circ}\text{C}$ ) con eficiencias aceptables de producción eléctrica.

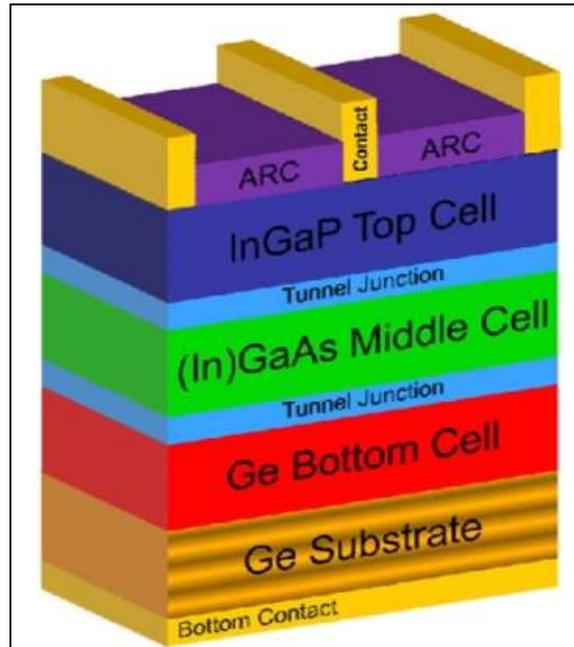


Figura 8. Estructura de una celda de triple unión.

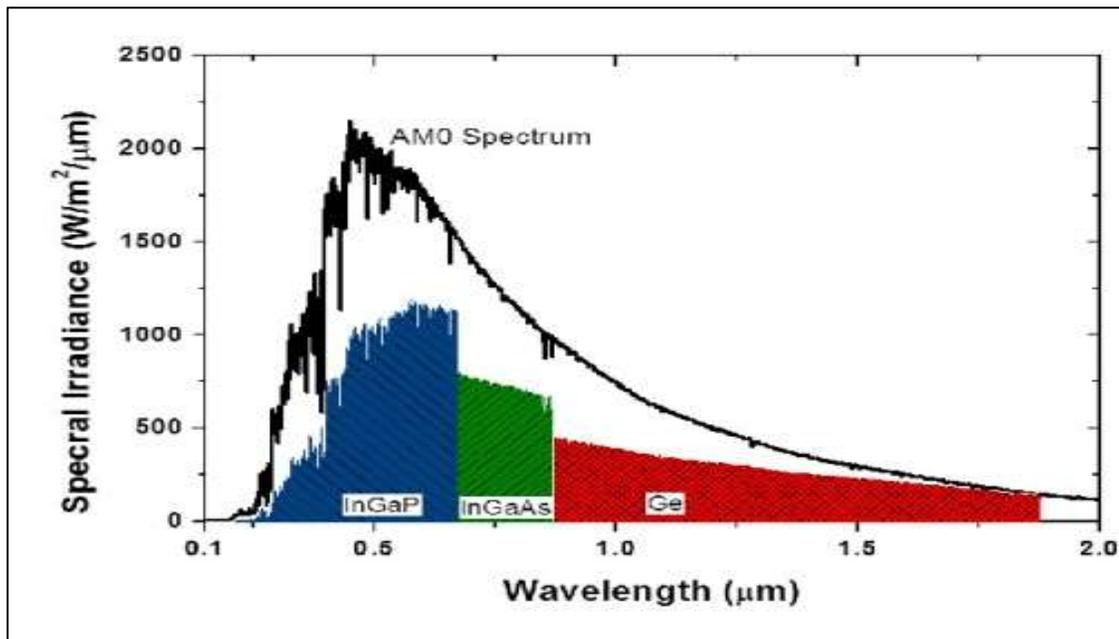


Figura 9. Espectro de radiación solar absorbido por una celda multi-unión.

## 2.2. Configuración óptica

La configuración del sistema óptico juega un papel importante en los CPV debido a que el área de celdas MJ que será necesario cubrir depende de éste, así como el sistema de seguimiento que deberá adaptarse y, por consiguiente, el costo del sistema en general. Los sistemas ópticos implementados en los CPV adaptan lentes y/o espejos aprovechando los fenómenos de refracción y/o reflexión.

Existen varias formas de clasificación de los concentradores. La configuración óptica también funciona como una forma de clasificación de los CPV, es decir que existen sistemas de reflexión, refracción o mixto.

Los lentes fresnel son empleados para refractar la luz debido a que poseen una gran apertura y una corta distancia focal siendo de poco peso y volumen (Figura 10). Para lograr esto, se mantienen los radios de curvatura de las lentes separándolas en anillos circulares. El grosor de la lente fresnel en cada anillo es diferente, eliminando el espesor necesario que tendría si su superficie fuera continua. Entre sus diferentes aplicaciones, se implementan en los sistemas CPV adaptándose en la parte superior de las celdas PV para concentrar la luz solar sobre ellas (Figura 10).

En cambio, el reflector Cassegrain consiste en la combinación de un espejo cóncavo primario y un espejo convexo secundario. En este diseño, el punto focal se localiza atrás del espejo primario y el espejo secundario agrega un efecto telefoto creando una longitud focal mucho más larga en un sistema mecánicamente corto (Figura 11). Generalmente, estos reflectores se emplean en las cámaras fotográficas y en los telescopios, además de la implementación en sistemas de concentración solar (Figura 11).

Mientras que las configuraciones ópticas Fresnel o Cassegrain en sistemas CPV concentran la radiación solar de manera individual en celdas MJ ampliamente espaciadas, un concentrador de disco parabólico tiene la ventaja de coleccionar una gran cantidad de radiación solar con un solo espejo y enfocarla en un arreglo de celdas MJ contenidas en un paquete pequeño. El desafío de la distribución uniforme de radiación

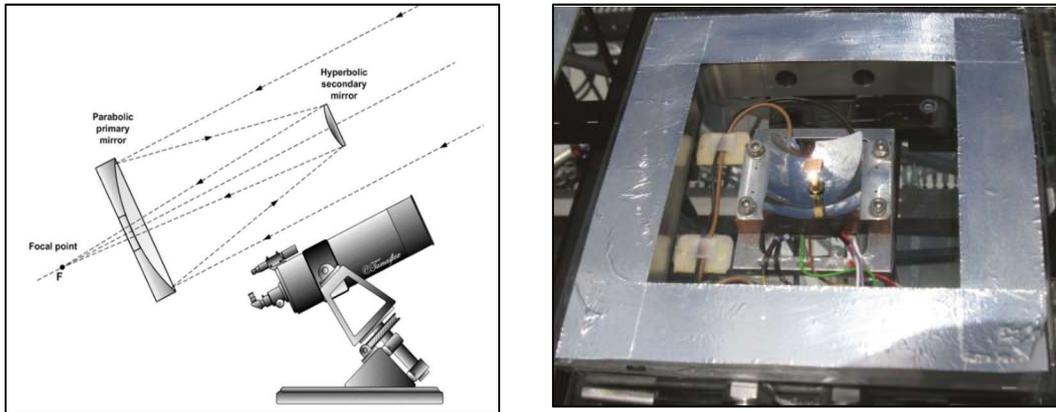
solar sobre el arreglo de las celdas MJ es logrado usando una técnica óptica única basada en la iluminación Kohler (Angel, 2013).

El sistema óptico utilizado en el CPV de este estudio tiene una razón de concentración de 1000x, esto es posible debido a la configuración óptica llamada XRX-Kohler (Figura 12) en la cual los rayos son recibidos en un espejo parabólico de 1.65x1.65 m<sup>2</sup> (X) para ser reflejados en el foco de la parábola donde se encuentra una esfera (R) que refracta los rayos sobre un pequeño arreglo de espejos (X) para finalmente ser reflejados sobre una superficie pequeña donde se encuentran las celdas fotovoltaicas de triple unión (Coughenour, et al., 2014).

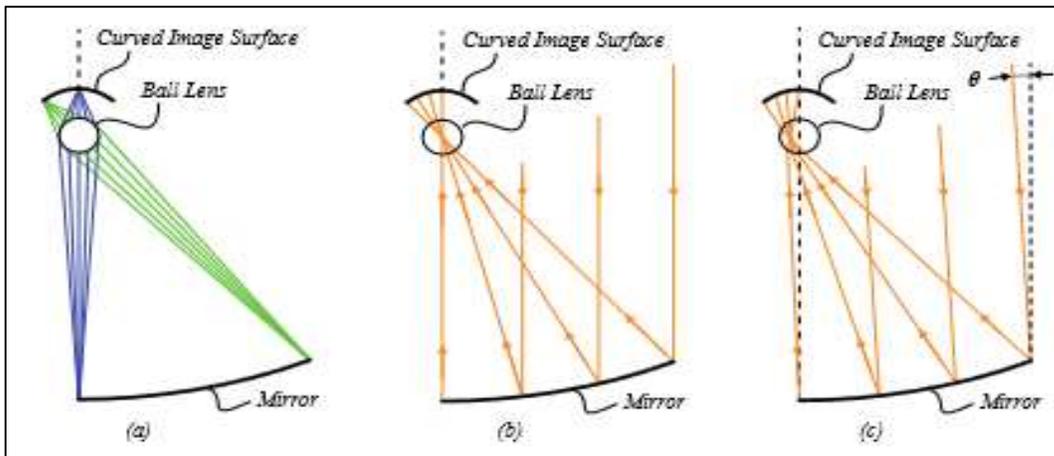
El sistema óptico XRX-Kohler (Coughenour, et al., 2014) permite una tolerancia al error de seguimiento proporcionado por un ángulo de aceptación de  $\pm 0.7^\circ$  que garantiza una distribución de radiación solar homogénea sobre el arreglo de celdas PV (Figura 13) además de contribuir a la disminución de costos del sistema de seguimiento solar.



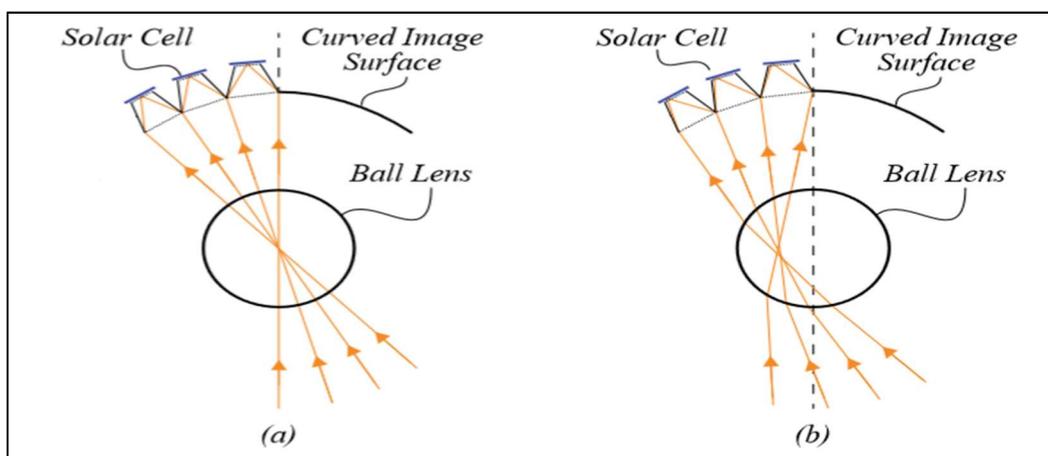
**Figura 10.** Lente fresnel (izquierda) y Sistema CPV con lente fresnel (derecha).



**Figura 11.** Arreglo óptico cassegrain (izquierda) y Arreglo óptico cassegrain implementado en un sistema CPV (derecha)



**Figura 12.** Sistema óptico XR-Kohler (Coughenour, et al., 2014)



**Figura 13.** Rayos refractados por la esfera (R) sobre el pequeño arreglo de espejos y posteriormente, sobre las celdas PV (Coughenour, et al., 2014).

### 2.3. Sistema de concentración solar fotovoltaico

Un sistema de concentración solar fotovoltaico consiste en una estructura mecánica (o soporte) con una configuración óptica (lentes o espejos) que permite obtener una concentración de luz en un área pequeña, en este punto se localiza la celda fotovoltaica de alta eficiencia la cual mantiene su temperatura en un intervalo seguro de operación para su buen funcionamiento debido a la implementación de un sistema de enfriamiento además de la adaptación de un sistema de seguimiento solar y un sistema de control general para mejorar el rendimiento. Estos sistemas son capaces de transformar la radiación solar recibida en potencia eléctrica, asimismo, existen variaciones en sus diseños ya que pueden incluir la conversión de radiación solar a potencia térmica a partir del calor que retira su sistema de enfriamiento recibiendo el nombre de concentrador solar térmico-fotovoltaico (CPV-T).

Los CPV se pueden clasificar con base en la cantidad de radiación que concentran. Según la literatura, existen varias versiones en los intervalos de su clasificación, sin embargo la más utilizada es la que se presenta a continuación: los sistemas CPV de baja concentración (LCPV) logran  $< 3x$  utilizando generalmente celdas de Si, por otra parte, los sistemas CPV (MCPV) de media concentración se adaptan celdas de Si o MJ desde

~ 3 x a 100x, mientras que los sistemas CPV de alta concentración (HCPV) usan celdas MJ y sus concentraciones son mayores a los 100x y por último, los sistemas de ultra concentración (UCPV) que usan celdas MJ y sus concentraciones son mayores a los 500x. (Kurtz, 2012).

Otra manera de clasificarlos es según el tipo de concentrador que se utilice. En general, surgen dos categorías: concentrador de imagen y de no imagen. Los concentradores de imagen son ampliamente utilizados en aplicaciones ópticas como el telescopio astronómico y la cámara, requieren de una alta precisión en el seguimiento, pero no están dirigidos a producir una distribución de flujo de radiación uniforme lo cual no es adecuado para los módulos CPV. Según la literatura, el desempeño del sistema CPV descenderá considerablemente cuando se utiliza iluminación no uniforme sobre el arreglo de celdas PV. Por esta razón, algunos investigadores han diseñado varios tipos de concentradores sin imagen para producir una concentración solar uniforme (Chong, et al., 2010).

Además de las clasificaciones mencionadas anteriormente, existen otras dos categorías: con o sin sistema de seguimiento solar y el tipo de seguimiento solar que se utiliza el se divide en seguidores solares ecuatoriales (con un grado de libertad y requieren de un ajuste diario de la declinación) y seguidores solares azimutales (con dos grados de libertad y sigue en dos ejes: en elevación y azimutal). (Tushar C., et al., 2015)

En este trabajo, el sistema CPV estudiado logra una concentración de 1000x mediante una distribución del flujo de radiación solar homogénea, lo cual lo clasifica como un sistema CPV de alta concentración sin imagen de seguimiento continuo.

La ventaja más importante del enfoque de los sistemas CPV es que se requiere una menor inversión de capital, lo cual hace factible su escalabilidad (Kurtz, 2012). Algunos análisis de costos han predicho que el uso de lentes o espejos para concentrar la luz solar en pequeñas celdas conduce a costos bajos en la producción de energía eléctrica (Luque, et al., 2006) (Swanson, 2000).

Un estudio realizado por investigadores en conjunto con una compañía europea, que trabaja en avances de celdas solares PV para aplicaciones terrestres y espaciales,

desarrollaron concentradores con platos parabólicos. El CPV en estudio no utilizaba un homogeneizador de radiación solar lo que resulta en una distribución no uniforme sobre las celdas MJ produciendo diferencias de temperaturas en distintos puntos de las celdas generando diferentes cantidades de energía eléctrica. La solución planteada ante este problema, lo cual supondría implementar un sistema óptico capaz de homogeneizar la radiación recibida, es realizar un arreglo de diferentes tipos de celdas, es decir, en donde se obtiene una menor concentración de luz solar se insertan celdas con una mayor eficiencia que las que reciben una mayor concentración. La eficiencia de conversión eléctrica producida por este arreglo fotovoltaico se reportó en un 30% bajo intensidades de luz en el intervalo de 500-1000 kW /m<sup>2</sup> (Lockenhoff, et al., 2010).

Investigadores de la empresa Zenith Solar Ltd desarrollaron un sistema de concentración fotovoltaica con un disco parabólico para la co-generación de energía eléctrica y energía térmica utilizando celdas de triple unión. El disco parabólico presenta un área receptora de 11 m<sup>2</sup> y un sistema de enfriamiento que utiliza agua como refrigerante, así como un sistema óptico para distribuir uniformemente la radiación sobre las celdas de triple unión. El arreglo único de las celdas compensa la distribución no uniforme del flux radiativo. Con este arreglo se generan 2.3 kWp y 5.5 kWp lo que representa 21% y 50% de eficiencia eléctrica y térmica, respectivamente. Las pruebas para medir su eficiencia se realizaron con una radiación directa normal de 900 W/m<sup>2</sup> (Chayet, et al., 2011).

En 2015, investigadores del Instituto de Energía Solar (ISE) Fraunhofer diseñaron un módulo CPV de alta concentración con un sistema de enfriamiento pasivo y un arreglo óptico Cassegrain. El ángulo de aceptación del sistema óptico es de 90°, utilizaron celdas de triple unión con un área activa de 1mm<sup>2</sup>, el área de apertura del concentrador es de 32.2x 32.2 mm<sup>2</sup> resultando en una geometría que concentra 1037x. La celda se localiza en el punto focal del arreglo óptico a 7.5 mm sobre el vértice del elemento óptico primario (POE), por lo tanto, la celda está colocada en una torre y conduce el calor a un disipador que se encuentra por debajo del POE. Por otra parte, cuenta con una cubierta de vidrio anti-reflectivo como elemento óptico secundario (SOE). La eficiencia del módulo fue registrada en 30.2% (Dreger, et al., 2015).

Investigadores suizos de diferentes institutos trabajaron en conjunto para el desarrollo de un sistema térmico-fotovoltaico de alta concentración el cual está compuesto de 6 recibidores con 36 celdas de triple unión cada uno, sistema de enfriamiento y sistema de seguimiento además de probar con tres tipos de espejos (plateados, membranas de aluminio y de superficie delgada) que concentran 1733x. La altura del CPV es de 10.5 m y la apertura de la parábola es de 8.6 m lo cual lo vuelve voluminoso en comparación con el concentrador de este estudio. Las pruebas realizadas arrojaron como resultado una eficiencia de conversión eléctrica de 28.5% cuando se encuentra en modo fotovoltaico y de 26.6% en modo de cogeneración mientras extrae energía térmica a 89.8°C. (Schmitz, et al., 2017).

Además del principal uso de los CPV para la producción de energía eléctrica y energía térmica, es posible adaptar un sistema de desalinización como realizaron los investigadores del ISE Fraunhofer, quienes implementaron tres tipos de tecnologías de las cuales se incluye un sistema CPV-T con disco parabólico. El espejo parabólico consta de 9 segmentos y está instalado sobre un soporte con un sistema de seguimiento solar, el área de apertura es de 15.9 m<sup>2</sup> y el espejo presenta una distancia focal de 2.4 m. El recibidor o unidad de potencia cuenta con un sistema activo de enfriamiento en el cual la temperatura del ciclo puede ser controlada. El sistema presentó una eficiencia térmica de 79.2% bajo una radiación normal directa de 850 W/m<sup>2</sup> (Wiesenfarth, et al., 2016).

Una empresa del suroeste de Estados Unidos desarrolló un CPV de disco parabólico que consta de un arreglo de 12 espejos que suman en total un área de superficie de 52 m<sup>2</sup> que refleja la radiación recibida sobre 12 módulos que aloja una óptica secundaria que refracta la luz para posteriormente reflejarse sobre un arreglo lineal de celdas multi-unión. Este arreglo óptico logra una razón de concentración de 1200x que resulta en un incremento de la temperatura de las celdas por lo que se implementó un sistema de enfriamiento que utiliza un radiador para eliminar el calor al medio ambiente. Esta tecnología se encuentra a nivel experimental por lo que los datos de eficiencia no han sido reportados sin embargo se ha registrado la producción de 12 kW eléctricos y 25 kW térmicos durante las pruebas experimentales. (Hayden, et al., 2012).

La tecnología CPV a estudiar, también llamada 2 Mirror Tracker (2M), en esta investigación fue desarrollada por un grupo de investigadores en el Colegio de Ciencias Ópticas en la Universidad de Arizona. En el sistema CPV se concentra la radiación solar en pequeñas celdas de triple unión gracias al arreglo óptico XRK-Kohler. Se espera que para esta tecnología, la cual es la tercera en su generación, presente una eficiencia eléctrica del 32% (Coughenour, et al., 2014). Esta tecnología se diferencia de las demás por su arreglo óptico, debido a que no se han construido equipos que funcionen con esta configuración. Habiendo realizado una exhaustiva revisión del estado del arte de concentradores solares fotovoltaicos, se concluye que no existe un estudio sobre un concentrador con las características del sistema en cuestión en etapa de investigación o en el mercado, por lo que su evaluación es conveniente para el desarrollo de tecnologías que aprovechan las fuentes renovables para la producción de energía eléctrica y de energía térmica.

## CAPÍTULO 3

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Equipo

El sistema fotovoltaico de alta concentración, también llamado 2M, (Figura 14) se encuentra instalado en la Plataforma Solar de Hermosillo (carretera Hermosillo – Bahía de Kino en el Km 21.5) (Anexo 1), en este lugar se desarrollan diferentes tipos de tecnologías de concentración solar para fines de investigación.

El 2M está compuesto por dos espejos reflectores, que mide 1.65 m x 1.65 m cada uno (2.72 m<sup>2</sup>), hechos de vidrio bajo en hierro y plateado de segunda superficie con un reflectividad de 0.9, tienen una distancia focal de 1.50 m, son paraboloides con axis simétricos con soporte en 4 puntos y un peso total de 28 kg. Dos unidades de conversión de potencia (PCU, por sus siglas en inglés) de diámetro de 152 mm que contienen 12 celdas de triple unión cada una con 42% de eficiencia de conversión de energía eléctrica. El sistema de enfriamiento está constituido por un circuito de agua que transporta flujo de refrigerante, a 7.2 lpm y un gradiente de presión de 1,500 Pa, enfriado por un radiador.



**Figura 14.** Concentrador solar de disco parabólico con óptica XRK-Kohler.

### 3.2. Metodología

Las campañas experimentales se diseñaron para evaluar la parte térmica y la parte eléctrica del sistema para las unidades de conversión de potencia. Se realizaron diferentes tipos de pruebas experimentales en las que se evaluó la capacidad de producción de potencias térmica y eléctrica en operación normal durante un período corto y durante una jornada, la producción máxima de potencia eléctrica, la producción de potencia eléctrica en función de la temperatura de operación y curvas I-V.

Como parte de la evaluación eléctrica del sistema, se consideró el estándar IEC 62670-1:2013 en el que se definen las condiciones para evaluar la potencia producida por estos sistemas y sus subcomponentes fotovoltaicos. El objetivo del estándar es definir un conjunto coherente de condiciones para que las clasificaciones de potencia informadas en las hojas de datos tengan una base estándar. Se consideran dos condiciones para su evaluación:

1. Condiciones de operación (CSOC: concentrator standard operating conditions) considerando la temperatura ambiental de 20°C, radiación directa normal de 900 W/m<sup>2</sup> y masa de aire de 1.5.
2. Condiciones de prueba (CSTC: concentrator standard for test conditions) con la temperatura de la celda de 25 °C, radiación directa normal de 1000 W/m<sup>2</sup> y masa de aire de 1.5. (International Electronical Comission, 2013)

La certificación mediante estos estándares es un requisito para la entrada al mercado de estos sistemas. Es por esa razón que en la evaluación eléctrica de este sistema en particular se consideran las condiciones de operación aquí establecidas.

Se midió la DNI durante todo el tiempo de los experimentos realizados con un pirheliómetro de la marca Eppley, modelo NIP, serie 3560802K6 (Figura 15). Este instrumento está montado sobre un sistema de seguimiento solar que permite medir la radiación directa normal a través de un proceso especial en el que la radiación solar atraviesa la ventana y se dirige sobre una termopila, que convierte el calor en una señal eléctrica que puede monitorearse; el voltaje de la señal es convertido a través de una fórmula para medir voltios por m<sup>2</sup> (The Eppley Laboratory Inc., 2006). El correcto funcionamiento de este instrumento es de suma importancia ya que los datos obtenidos de DNI son utilizados para el balance de energía.



Figura 15. Pirheliómetro Marca Eppley.

### 3.2.1. Caracterización eléctrica

Para la caracterización eléctrica se instrumentó el 2M con un sistema automatizado de resistencia externa variable (LB, por sus siglas en inglés) (Figura 16); se realizó la instalación in situ y la programación mediante un software para obtener los datos necesarios para este estudio. El LB funciona como un reóstato, es decir, que regula la resistencia de carga mediante un software de control. El LB varía la resistencia (o carga total) desde circuito abierto hasta corto circuito, es controlado desde un sistema de control remoto utilizando un programa que registra los datos de voltaje y de corriente del sistema; y convierte la energía eléctrica alimentada en calor a través de las resistencias, y éste calor es eliminado por enfriamiento al medio ambiente. El fin de la adaptación del LB es obtener datos para la elaboración de curvas I-V características de las celdas y del sistema en general, lo que también permite obtener el factor de llenado (FF, por sus siglas en inglés) y la potencia máxima producida.

El FF el cual expresa la relación entre la potencia máxima que puede obtenerse del sistema y el producto de voltaje en circuito abierto por la corriente en corto circuito, es decir, que el FF es una relación entre la potencia eléctrica obtenida y la potencia máxima teórica (Sathyanarayana, et al., 2015). El FF (ecuación 1) proporciona una idea de la calidad del arreglo fotovoltaico, mientras más cercano sea este valor a la unidad, el arreglo es capaz de proveer más potencia. El FF se encuentra entre 0.7-0.8 para celdas fotovoltaicas de silicio comerciales en módulos planos.

$$FF = \frac{P_{m\acute{a}x}}{I_{sc}V_{oc}} = \frac{I_{m\acute{a}x}V_{m\acute{a}x}}{I_{sc}V_{oc}} \quad Ec. (1)$$

Donde:

$P_{m\acute{a}x}$  es la potencia máxima

$I_{m\acute{a}x}$  es la intensidad de corriente máxima

$V_{m\acute{a}x}$  es el voltaje máximo

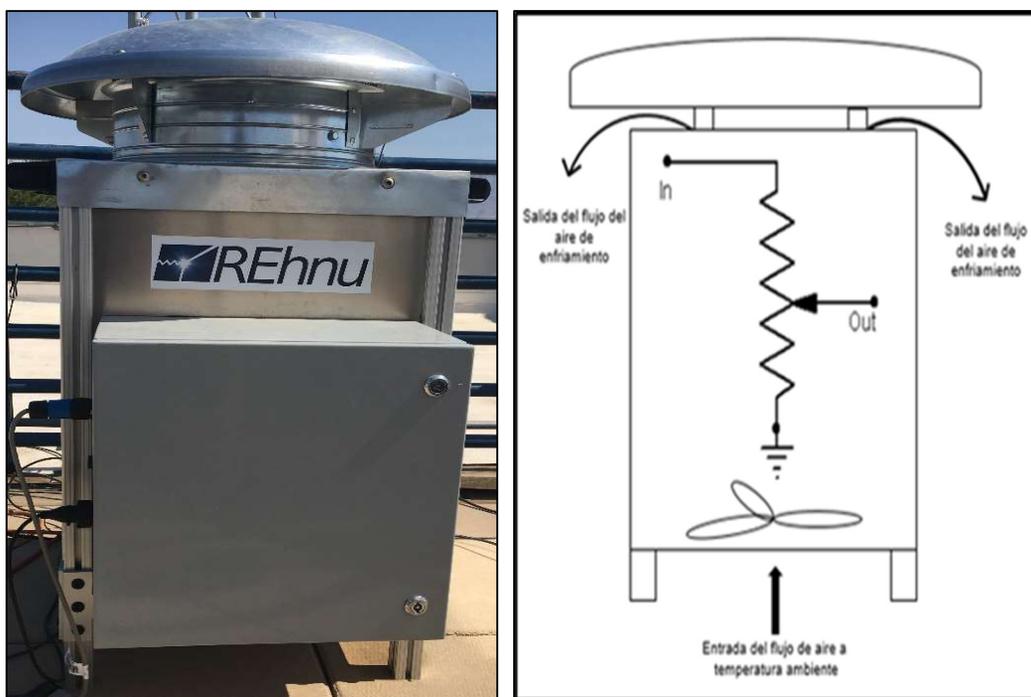
$I_{sc}$  es la intensidad de corriente en corto circuito

$V_{oc}$  es el voltaje es circuito abierto

Las corridas experimentales para la determinación de la eficiencia eléctrica instantánea se realizaron bajo valores de alrededor de 900 W/m<sup>2</sup> de DNI, la temperatura ambiente de 20°C y una masa de aire de 1.2, además se monitorearon las temperaturas de las celdas y la radiación directa normal durante todo el tiempo de los experimentos.

Para la evaluación de la eficiencia eléctrica del sistema se variaron las temperaturas de las celdas, controlando la capacidad de remoción de calor del sistema de enfriamiento, esto con el fin de aumentar las temperaturas del fluido de enfriamiento y analizar su efecto sobre la eficiencia eléctrica (Jafari Fesharaki, et al., 2011). Con los datos obtenidos en este experimento, se calculó el coeficiente de temperatura del concentrador y del arreglo PV, el cual permite establecer una relación entre la eficiencia eléctrica del sistema y la temperatura de operación (O. Dupré, 2017)

También se efectuaron campañas de pruebas con duración de días completos en producción normal, desde el amanecer hasta el atardecer para estimar eficiencias diarias, durante las pruebas se tuvieron aproximadamente 10 horas de operación continua por día.



**Figura 16.** Sistema automatizado de carga eléctrica externa variable.

### 3.2.2. Caracterización térmica

Para llevar a cabo la caracterización térmica se realizó, primeramente, un estudio de caída de presión dentro de los PCUs (Figura 17) y posteriormente, el cálculo de la eficiencia térmica instantánea y de una jornada completa, así como para las curvas I-V.

Para el estudio de caída de presión se construyó un sistema hidráulico de pruebas de caídas de presión (Figura 18) constituido por un tanque de almacenamiento de agua, una bomba hidráulica, un flujómetro, un manómetro diferencial y los PCUS. Se estudiaron tres casos, en los dos primeros se utilizaron versiones diferentes de PCUs y en el último, dos unidades conectadas en serie. La segunda versión de los PCUS difiere de la primera por la entrada del gas nitrógeno a la cámara la cual alberga una parte del arreglo óptico y las celdas fotovoltaicas, la utilización de este gas tiene la finalidad de eliminar la humedad y el oxígeno que se introducen en la cámara causando daños en su interior y afectando directamente el rendimiento del concentrador.

Para garantizar un flujo estable en la entrada del flujómetro, se consideró un flujo completamente desarrollado por lo que se utilizó la ecuación de longitud de entrada hidrodinámica (ecuación 2), para realizar el cálculo se consideró el flujo en régimen transitorio obteniendo una longitud de 1.33 metros agregando una longitud extra de 0.33 metros dando un total de 1.66 metros en los cuales no debe haber ningún accesorio conectado que pudiera alterar el comportamiento del flujo, además de tener en cuenta las recomendaciones del fabricante sobre la instalación del flujómetro (Omega Engineering, 2017).

$$Le \approx 0.05 Re * d \quad Ec. (2)$$

Donde:

Le - longitud de entrada hidrodinámica

Re - número de Reynolds

d - diámetro de la tubería

Los resultados esperados, según las especificaciones de los investigadores de la Universidad de Arizona, para un flujo recomendado de 10 litros por minuto se registra una caída de presión de 1500 pascales.



**Figura 17.** Unidad de potencia sin entrada de gas nitrógeno (izquierda) y unidad de potencia con entrada de gas nitrógeno (derecha)

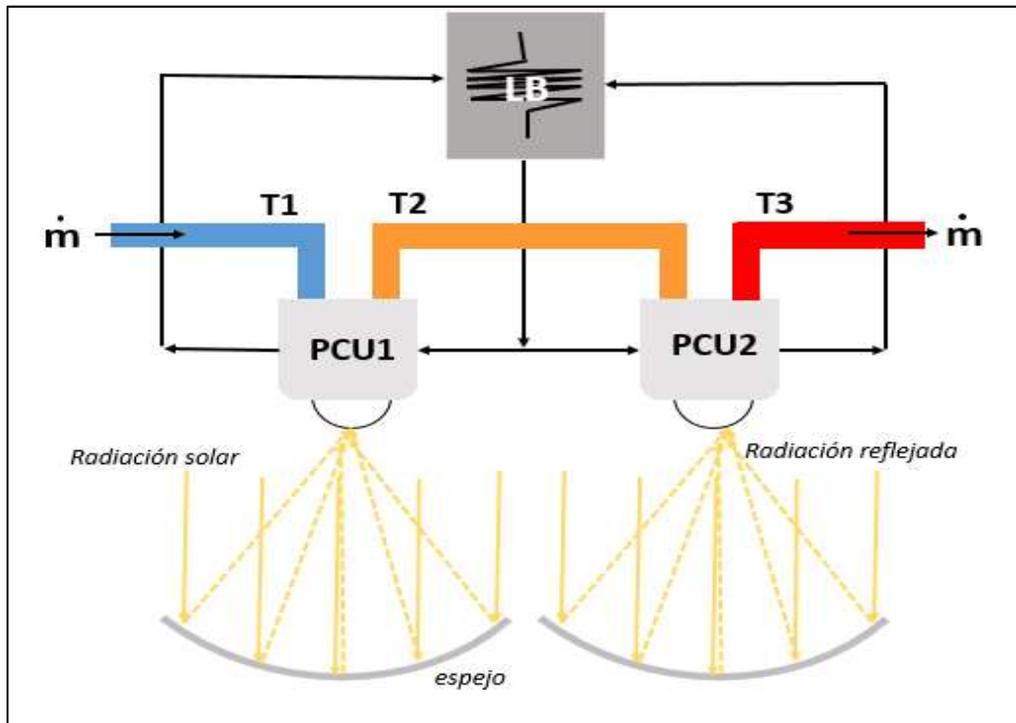
Para el cálculo de la eficiencia térmica instantánea, se monitoreó el flujo másico del refrigerante dentro del sistema de enfriamiento para lo cual se instaló un flujómetro calibrado - exactitud de  $\pm 1\%$ , temperatura de operación máxima de  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ - en el circuito del agua del sistema de enfriamiento del concentrador, así como las temperaturas en las entradas y las salidas de los PCUs, en operación normal, es decir, con producción eléctrica de las fotoceldas. La cantidad total de radiación solar recibida se calculó con el área de apertura total del concentrador. Sin embargo, para estimar con mayor precisión la cantidad de potencia solar recibida en los PCUs se usó el sistema como un calorímetro al correr en sistema en circuito abierto, con esto se logró solo producir calor. Con un balance de energía siguiendo la primera ley de termodinámica se estimó la cantidad total de radiación que logra entrar al PCU y que es la que realmente reciben las celdas. Dado que las pérdidas de calor por convección, conducción o radiación de la cavidad de los PCUs se consideraron despreciables se supone entonces que toda la radiación que se recibe en las celdas se transforma en potencia térmica. De esta forma se pudieron estimar las pérdidas ópticas del sistema y mejorar la precisión del cálculo de la eficiencia eléctrica de las celdas en específico.



**Figura 18.** Sistema hidráulico de pruebas para la evaluación de la caída de presión dentro de una unidad de conversión de potencia.

### 3.2.3. Balance de energía

En la Figura 19 se muestra el esquema de los arreglos térmico y eléctrico del concentrador. El proceso de concentración de la radiación solar – mencionado en la sección 2.2: Configuración Óptica – sucede de la siguiente manera: se recibe la radiación solar en el espejo para posteriormente se reflejada en el foco de la parábola donde se encuentra la esfera para llevarse a cabo la distribución de radiación sobre las celdas fotovoltaicas dentro de la unidad de potencia. Por la parte eléctrica sucede lo siguiente: las celdas fotovoltaicas producen potencia eléctrica la cual es recibida en el banco de carga que, a su vez, éste hace pasar esta potencia por resistencias transformándola en calor y eliminándola por enfriamiento al medio ambiente. Por la parte térmica, se presenta un arreglo en serie del sistema de enfriamiento, es decir, que el flujo entra con una temperatura  $T_1$  a la primera unidad de potencia donde se realiza el intercambio de calor para salir con una temperatura  $T_2$  que posteriormente entra a la segunda unidad para llevar a cabo el intercambio de calor y salir con una temperatura  $T_3$ .



**Figura 1919.** Diagrama de los arreglos térmico y eléctrico del concentrador.

Habiendo obtenido los datos necesarios se procedió a realizar el balance energético, el cual se calculó basándose en la primera y la segunda ley de la termodinámica. Del balance global de energía se obtiene que,

$$P_{in} = P_t + P_e + \text{pérdidas} \quad (3)$$

La potencia que se recibe en el área reflectiva es calculada de la siguiente forma:

$$P_{in} = \text{área reflectora} * DNI \quad (4)$$

Mientras que la potencia térmica se define como:

$$P_t = Q = m \cdot Cp \Delta T \quad (5)$$

Y la cantidad de potencia eléctrica es obtenida de los datos recolectados por el banco de carga. Por lo tanto, en el balance de energía total se tiene que,

$$\text{área reflectora} * DNI = m \cdot Cp \Delta T + P_e + \text{pérdidas} \quad (6)$$

Para el cálculo de la eficiencia eléctrica del sistema se utiliza la siguiente ecuación,

$$\% \text{ Eficiencia eléctrica} = \frac{P_e}{P_{in}} \times 100 \quad (7)$$

Mientras que para el cálculo de la eficiencia térmica se utiliza la ecuación 8,

$$\% \text{ Eficiencia térmica} = \frac{P_t}{P_{in}} \times 100 \quad (8)$$

Y para el cálculo de la eficiencia total del sistema, se suman la eficiencia térmica y la eficiencia eléctrica, es decir,

$$\begin{aligned} & \text{Eficiencia total del Sistema} \\ & = \% \text{ Eficiencia eléctrica} + \% \text{ Eficiencia térmica} \end{aligned} \quad (9)$$

Donde:

$P_{in}$  – Potencia recibida

$P_e$  – Potencia eléctrica

$P_t$  – Potencia térmica

$Q$  – Flujo de calor

$m$  – flujo másico

$C_p$  – Capacidad calorífica de la mezcla

$\Delta T$  – diferencia de temperatura

En cuanto al balance de energía para los estudios de calorimetría, se utilizó la ecuación 10; basándose en el balance presentado anteriormente, aunque considerando que toda la potencia recibida se convierte en potencia térmica.

$$P_{in} = P_t + P_e + \text{pérdidas} \quad (3)$$

Por lo tanto, el porcentaje de eficiencia total del sistema se espera que será igual al porcentaje de eficiencia térmica.

## CAPÍTULO 4

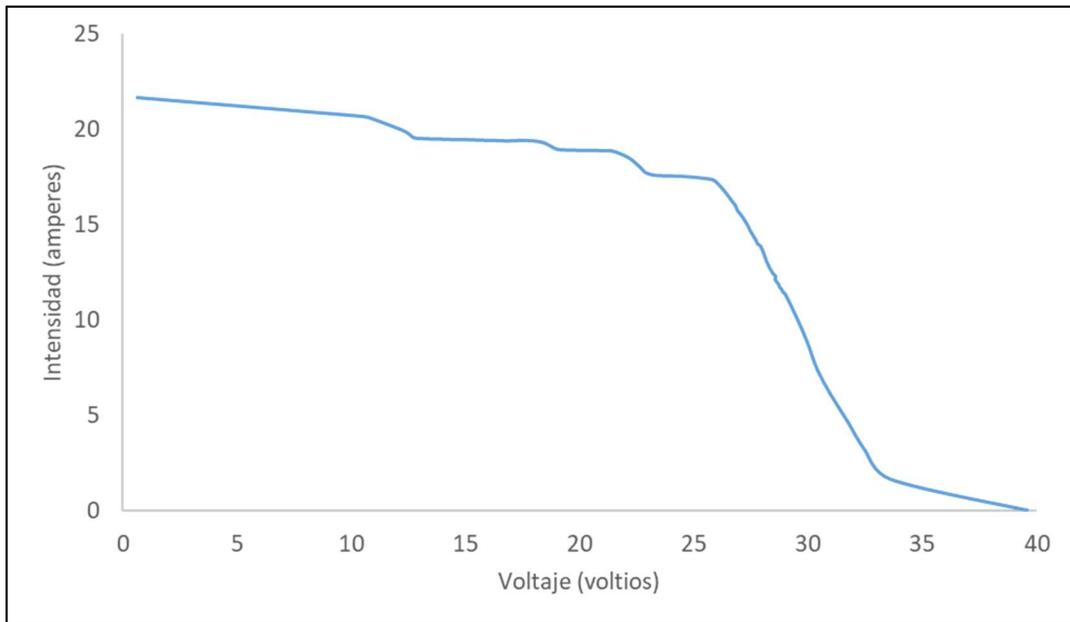
### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados mostrados a continuación corresponden a las campañas de evaluación realizadas durante el periodo de realización de esta tesis. Estos resultados incluyen, además de los resultados finales, etapas preliminares que sirvieron para realizar correcciones y adecuar el sistema para una evaluación consistente.

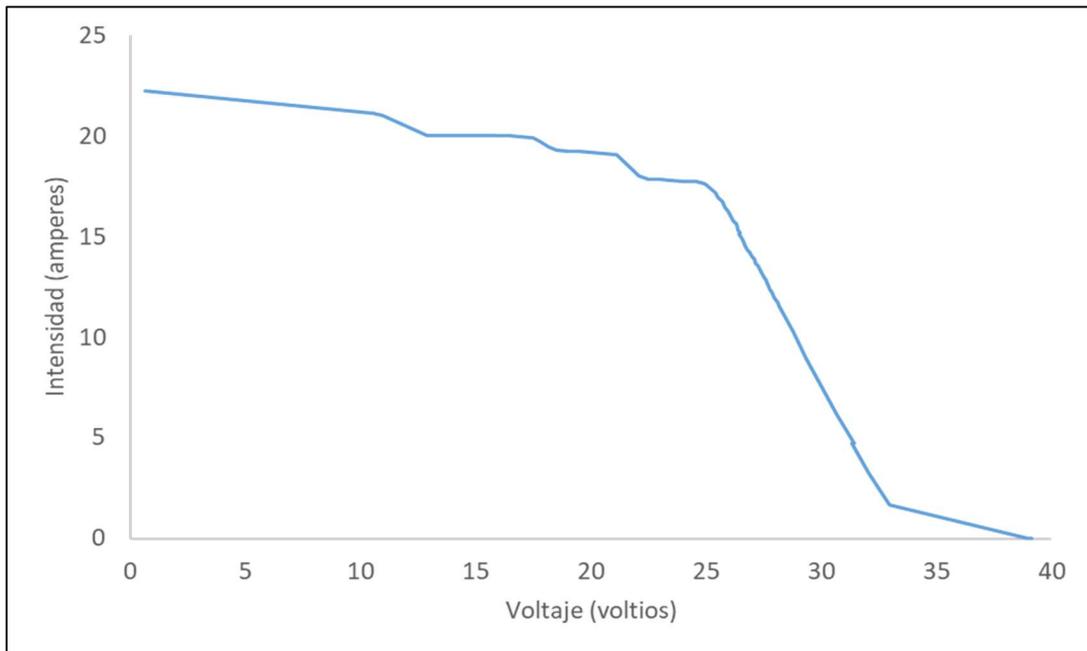
#### 4.1 Resultados preliminares

Se realizaron curvas I-V de las cuales se muestran las más representativas en las Figuras 20 y 21. Las curvas IV se realizaron a diferentes temperaturas de operación para solo una de las unidades de conversión de potencia sin entradas de nitrógeno, y se utilizaron para calcular el factor de llenado y la eficiencia de conversión eléctrica total del sistema,

Las curvas I-V mostradas a continuación sugirieron algún tipo de problema con el concentrador debido a que no muestra el comportamiento esperando; esto se atribuyó a problemas con el PCU. Posteriormente, se calculó el FF con el fin de corroborar las deficiencias de la unidad.



**Figura 200.** Curva I-V a T= 38°C

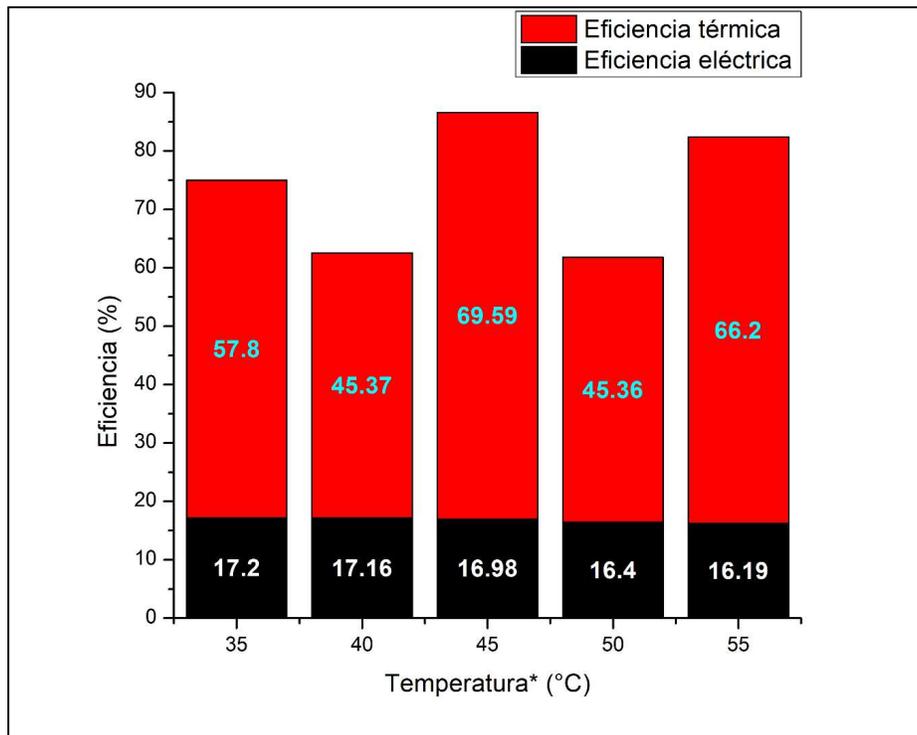


**Figura 211.** Curva I-V a T= 54 °C

El FF obtenido confirmó los problemas dentro del PCU debido a que el FF para módulos comerciales de celdas de Si se encuentra en 0.7-0.8, mientras que el concentrador sólo logró un FF de 0.5; lo que indicó problemas en las celdas MJ.

**Tabla 1.** Factor de llenado en función de la temperatura de operación.

T (°C)	FF
35	0.5
40	0.5
45	0.5
48	0.5
54	0.5



**Figura 222.** Eficiencias térmica y eléctrica en función de la temperatura de operación.

En la Figura 22 se muestran las eficiencias térmica y eléctrica en función de la temperatura de operación (temperatura de salida del fluido de enfriamiento) y se

observan inconsistencias, por lo que es pertinente realizar los arreglos y adecuaciones correspondientes al sistema en general para su correcto funcionamiento.

Los cambios realizados al concentrador fueron importantes para su correcto funcionamiento. Por un lado, se cambiaron los PCUs debido a que se encontraron evidencias de humedad y oxidación dentro de la cámara que alberga las celdas MJ por lo que se rediseñó el PCU para incluir una entrada de aire de nitrógeno con el fin de eliminar la humedad y el oxígeno en el interior de la cámara y evitar fallas de este tipo. Consecuentemente, se adaptó un tanque de nitrógeno y un sistema de líneas transportadoras del gas; además se realizó la instalación y alineación de los nuevos PCUs en el concentrador. Por otra parte, se hicieron mejoras en el sistema de control general lo que contribuyó a un mejor funcionamiento del concentrador. Posterior a estas mejoras, se realizaron corridas experimentales para la evaluación del sistema esperando resultados consistentes.

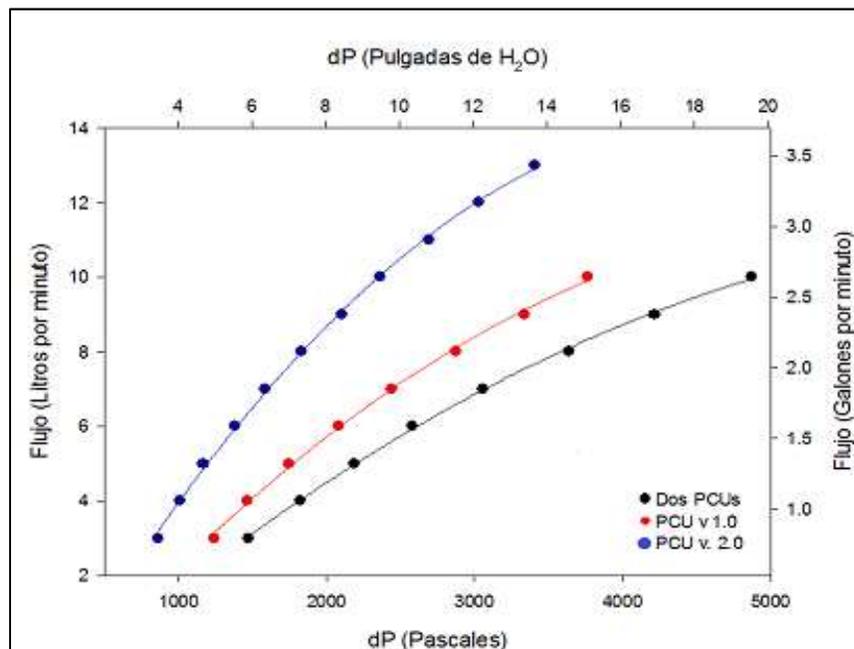
## **4.2 Resultados finales**

Como parte de la evaluación térmica, se muestran los resultados de las pruebas de caída de presión dentro de los PCUs en diferentes configuraciones: por separadas y conectadas en serie. La Figura 23 señala la comparación de los resultados obtenidos para ambas configuraciones y se observa que, la caída de presión en el PCU 1 con respecto a la variación del flujo es mayor que la caída de presión en el PCU 2 lo que indica una mejoría en el diseño interno de la unidad de conversión. Es conveniente mencionar que el PCU 2 tienen entradas de aire a su cámara interna además que, en dicha unidad, se puede intercambiar las celdas PV por unas más recientes – como se mencionó anteriormente-. La prueba realizada con 2 PCUs son unidades de la versión 2.0, en este experimento se observó un comportamiento del flujo y caída de presión similar a la versión 1.0.

Se realizaron pruebas experimentales para evaluar la eficiencia instantánea y las curvas I-V, de las cuales se seleccionó un intervalo de 900 segundos para un análisis detallado

de los datos recolectados. Observando un comportamiento de la DNI casi constante alrededor de  $925.9 \pm 5.94 \text{ W/m}^2$  (Figura 24) con una masa de aire de 1.2, se consideró conveniente realizar el análisis en este periodo.

En la Figura 25, se presenta el comportamiento de la potencia eléctrica producida y una curva I-V en la parte central. Para un estudio minucioso de este comportamiento, se dividió la gráfica en tres secciones. Las secciones laterales corresponden al comportamiento de la potencia eléctrica en condiciones de operación normal, mientras que la sección central muestra el comportamiento de la potencia eléctrica durante la realización de la curva I-V. Esta curva I-V se produce debido a que el banco de carga hace que el concentrador empiece a trabajar en circuito abierto (voltaje máximo) por lo que la potencia eléctrica tiene un valor de cero; mientras se agregan resistencias, las cuales provocan la generación de potencia, se incrementan los valores de intensidad de corriente, al incrementar las resistencias se incrementa el voltaje hasta llegar a un punto donde se obtiene la potencia máxima que puede producir el sistema; después de este punto, el incremento de las resistencias genera que el sistema llegue a corto circuito (intensidad de corriente máxima).



**Figura 233.** Estudio de caída de presión dentro de las unidades de conversión de potencia.

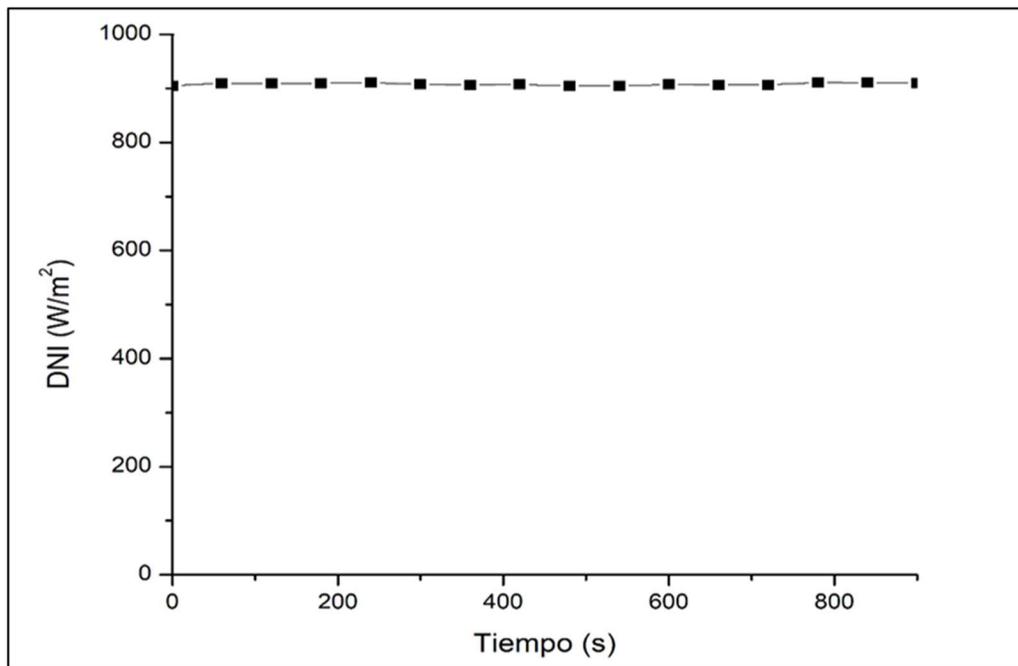


Figura 244. Radiación directa normal durante el intervalo seleccionado.

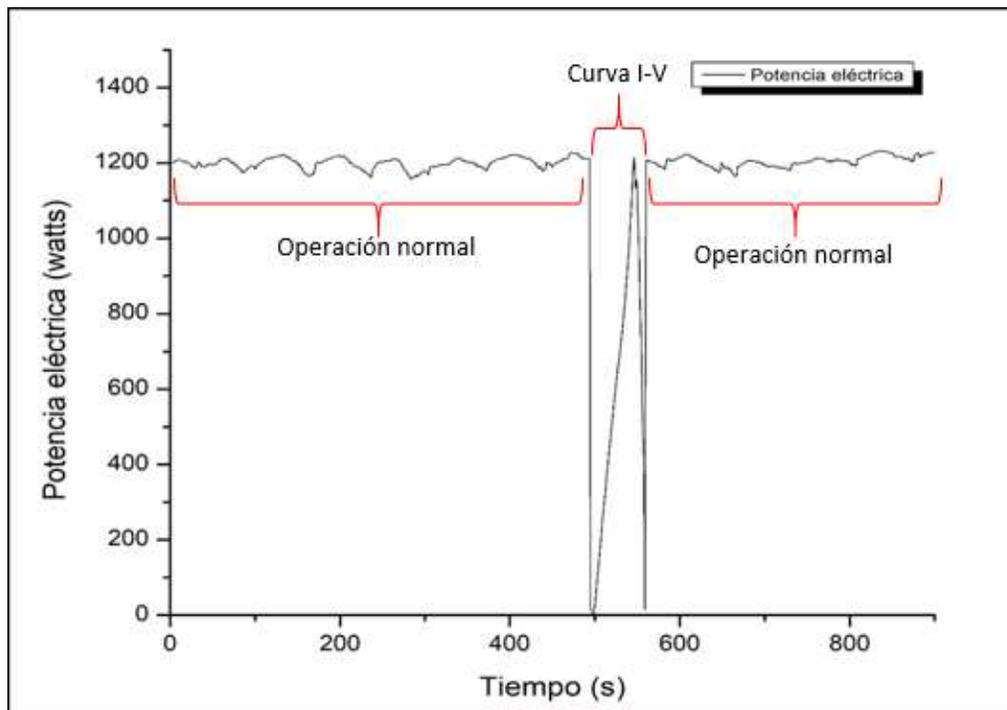
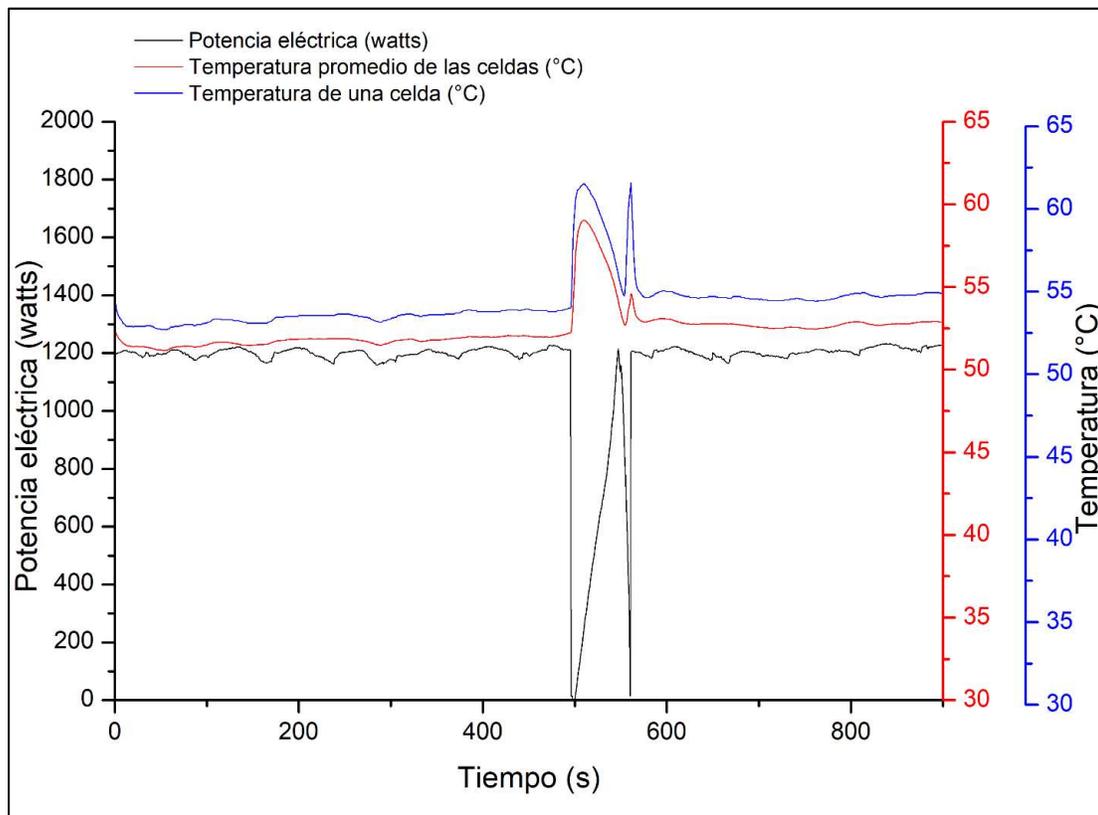


Figura 255. Comportamiento de la potencia eléctrica durante el intervalo de estudio.

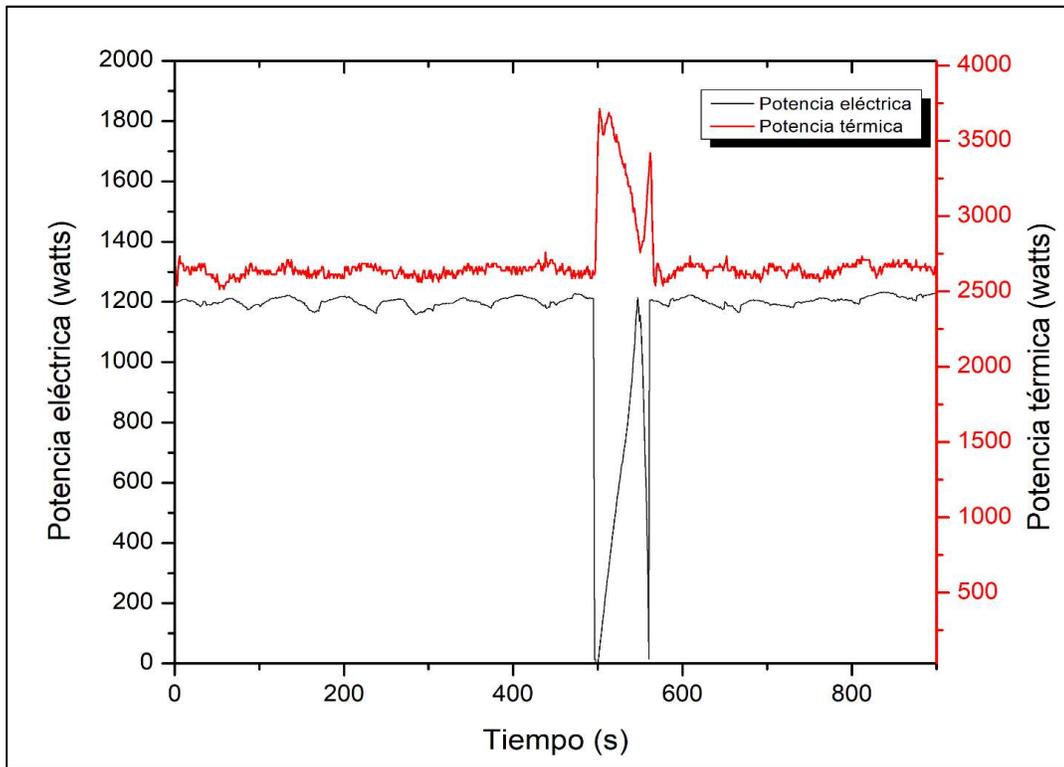
En la Figura 25, se observa que el punto de potencia máxima obtenido durante la curva IV es igual que la potencia eléctrica en operación normal, es decir, que el concentrador produce el máximo de potencia posible en condiciones de operación normal. Por otra parte, es posible apreciar que la potencia eléctrica presenta pequeñas variaciones alrededor del valor de 1200 watts, esto se atribuye a que el sistema de seguimiento solar realiza ajuste durante la operación del concentrador.

Ahora bien, el comportamiento de la potencia eléctrica tiene un efecto sobre la temperatura de la celda así se puede observar en la Figura 26. Se debe señalar que la comparación se realiza con la temperatura de una sola celda y con el promedio de temperaturas de las 24 celdas del sistema. Se observa que la temperatura aumenta cuando el sistema trabaja en circuito abierto y empieza a disminuir al acercarse al punto de potencia máxima, donde alcanza una temperatura parecida a la de condiciones de operación normal, para aumentar nuevamente al llegar a corto circuito y continuar con una temperatura constante después de la realización de la curva I-V. El comportamiento que presenta la temperatura es el mismo que la potencia eléctrica, aunque en sentido inverso. También se observa que el promedio de temperaturas de las celdas es afectado en menor medida por el comportamiento de la potencia eléctrica debido a que cada celda maneja una temperatura diferente de operación – aunque exista una diferencia pequeña – sin embargo, esto puede atribuirse a una distribución de radiación no homogénea o al comportamiento de la transferencia de calor entre la placa de enfriamiento (en la que se encuentran montadas las celdas) y el fluido de enfriamiento.



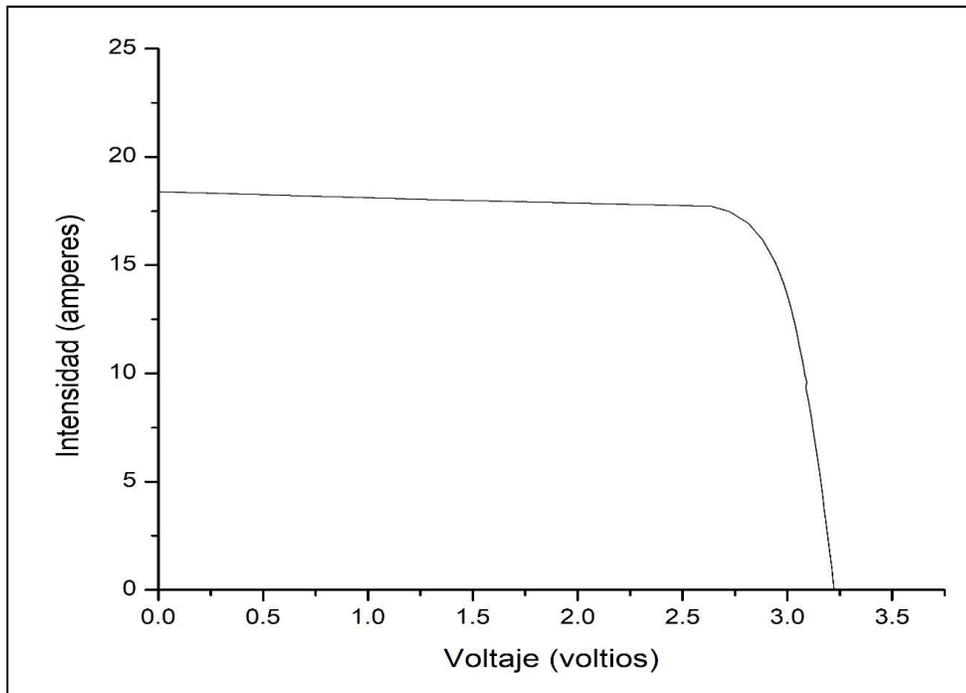
**Figura 266.** Comportamiento de la potencia eléctrica y su efecto sobre la temperatura de una celda MJ.

En la siguiente gráfica (Figura 27) se presenta el comportamiento de la potencia térmica durante la misma corrida experimental. Se aprecia que la potencia térmica presenta el mismo comportamiento que la potencia eléctrica, pero en el sentido inverso, es decir que, cuando el sistema trabaja en circuito abierto la potencia térmica aumenta y mientras que se acerca al punto de potencia eléctrica máxima, la potencia térmica disminuye; para aumentar y llegar al punto de corto circuito donde la potencia eléctrica disminuye. El hecho de que no se aprecie un efecto tan pronunciado, como en la Figura 26 donde se compara con la temperatura de una sola celda, se atribuye a la inercia térmica del sistema.

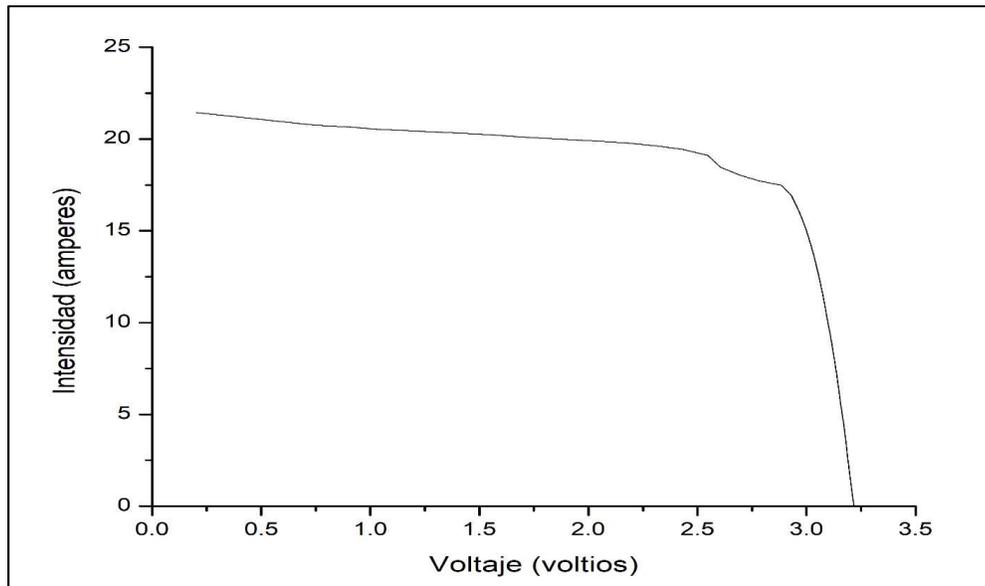


**Figura 277.** Comportamiento de la potencia eléctrica y la potencia térmica.

Para continuar con el análisis, se presenta la curva I-V (Figura 28) correspondiente a una de las celdas del concentrador. Esta curva se realizó cuando el DNI se encontraba en  $930.86 \pm 1.2 \text{ W/m}^2$  y a  $58.41 \pm 2.81 \text{ }^\circ\text{C}$  de temperatura promedio de la celda. A partir de la curva IV obtenida, se obtuvo el FF calculando el área debajo de la curva. Seguida de esta figura, se presenta la curva IV realizada para el arreglo fotovoltaico en general, en la cual se observa una deflexión; se debe considerar que cada celda muestra un comportamiento diferente y el promedio de estos comportamientos es el resultado que se presenta en la Figura 29, sin embargo, realizar un análisis más a fondo de este comportamiento (deflexión) es una de las recomendaciones de este trabajo. Las condiciones bajo las que se realizó dicha curva son una DNI de  $930.86 \pm 1.2 \text{ W/m}^2$ , una temperatura promedio del arreglo PV de  $55.48 \pm 3.75 \text{ }^\circ\text{C}$ , una temperatura ambiente de  $20^\circ\text{C}$  y una masa de aire de 1.2.



**Figura 28.** Curva IV correspondiente a una de las celdas del arreglo PV del sistema.



**Figura 29.** Curva IV correspondiente a una de las celdas de arreglo PV del sistema.

Los valores de FF obtenidos son 0.97 y 0.86, para una celda y para el arreglo PV respectivamente. Estos valores señalan que el arreglo fotovoltaico integrado en el concentrador es de buena calidad y son sustancialmente altos en comparación con los

obtenidos en los resultados preliminares lo que significa una mejora considerable en el desempeño eléctrico de las celdas MJ. Sin embargo, la diferencia entre el valor de una celda y del arreglo en general es significativa, por lo que se deberá realizar un análisis complementario para estudiar esta situación.

A continuación, se presenta la eficiencia eléctrica y la eficiencia térmica con dos temperaturas de referencia diferentes (Figura 30). La temperatura de referencia es la temperatura promedio de las celdas que corresponde al promedio realizado de las 12 celdas que están ubicadas en 4 arreglos dentro de cada unidad de conversión de potencia, es decir, la temperatura promedio de un total de 24 celdas en el concentrador. La temperatura de 52 °C corresponde al primer periodo de operación normal, mientras que la temperatura de 53°C corresponde al segundo periodo, por lo que se infiere que el incremento de 1°C se debe a la realización de la curva IV. Es importante mencionar que en esta parte del estudio no se analiza el comportamiento de la eficiencia eléctrica en función de la temperatura. La eficiencia eléctrica obtenida fue de 24.17% en promedio mientras que la eficiencia térmica fue de 53.28%.

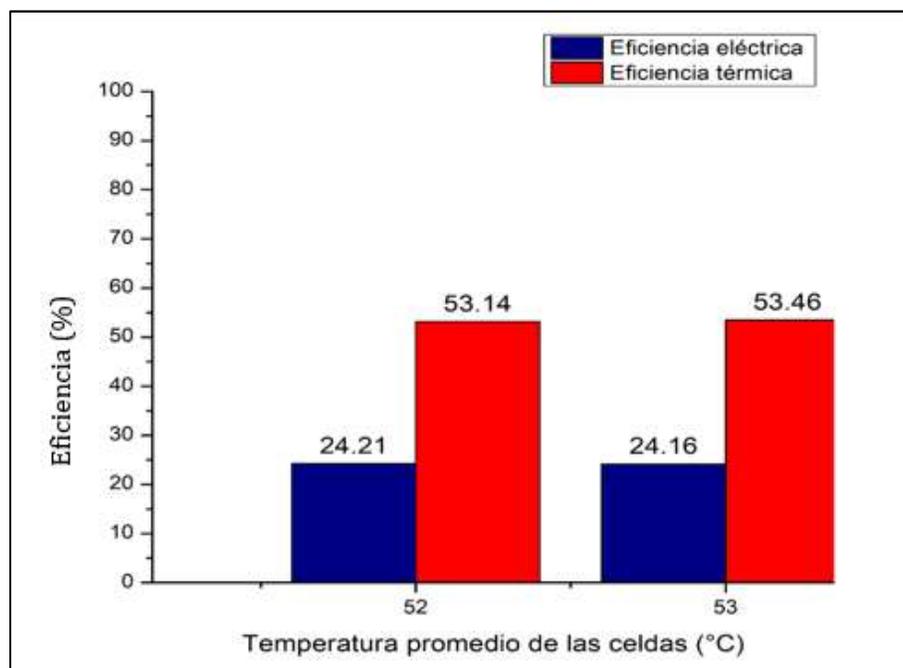
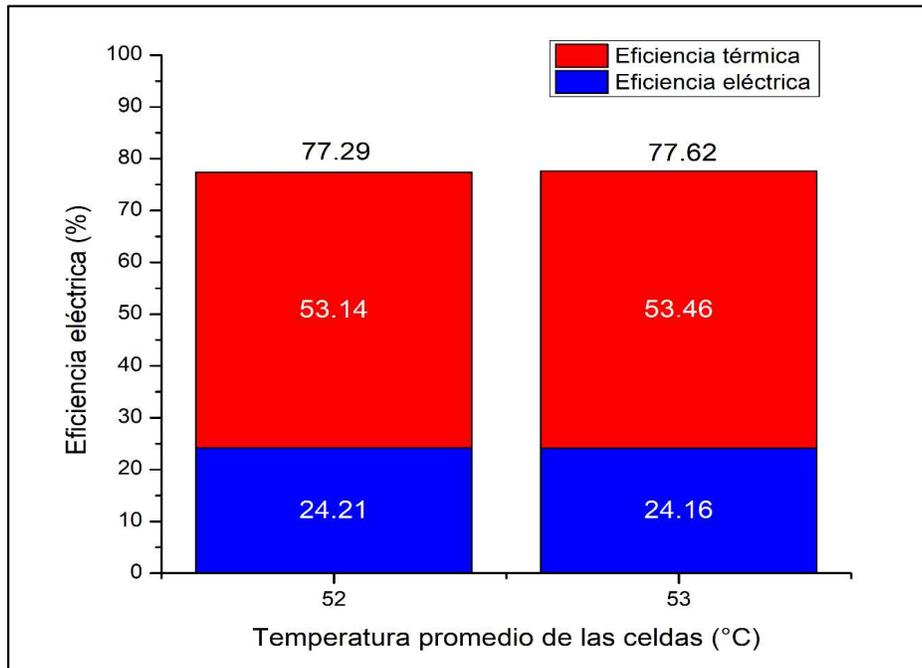


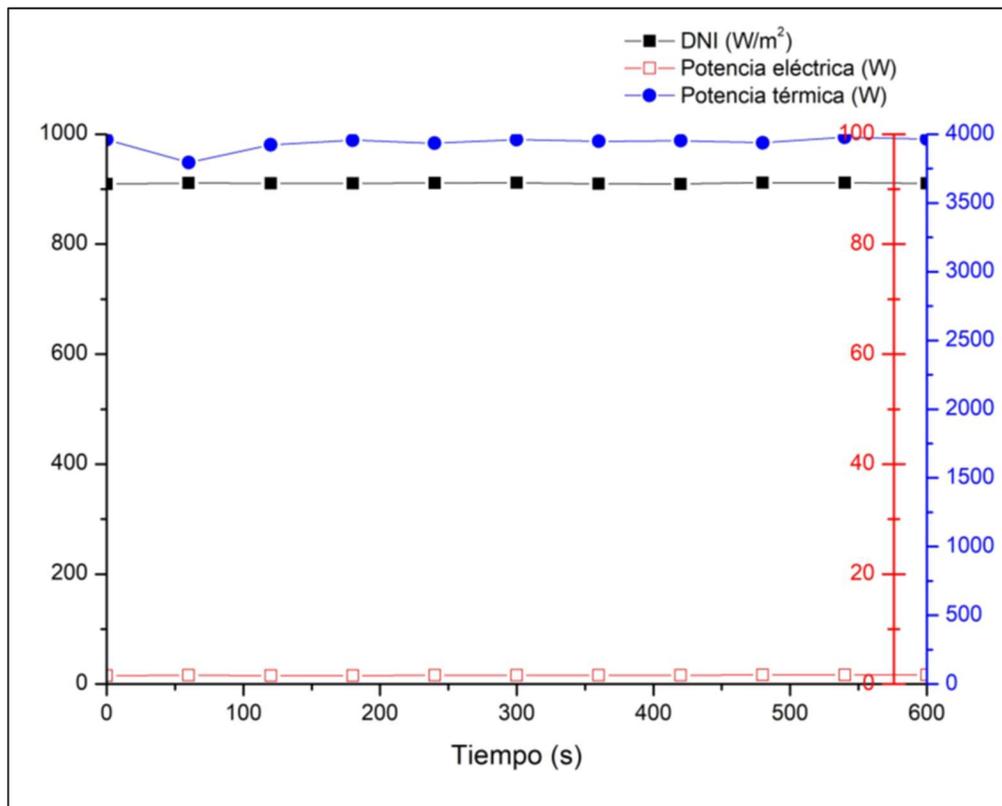
Figura 30. Eficiencias térmica y eléctrica.

La eficiencia total del sistema obtenida durante la segunda campaña de evaluación fue de 77.45% en promedio (Figura 31), es importante mencionar que en esta segunda etapa se utilizaron las dos unidades de conversión de potencia además de señalar que en el valor de eficiencia reportado el área de apertura incluye la parte sombreada por los mismos PCUs y la estructura del concentrador. El 22.55% restante se atribuye a las pérdidas por reflectividad, absorbancia, transmitancia, sombreadamiento, degradación de los espejos y error en el seguimiento solar.



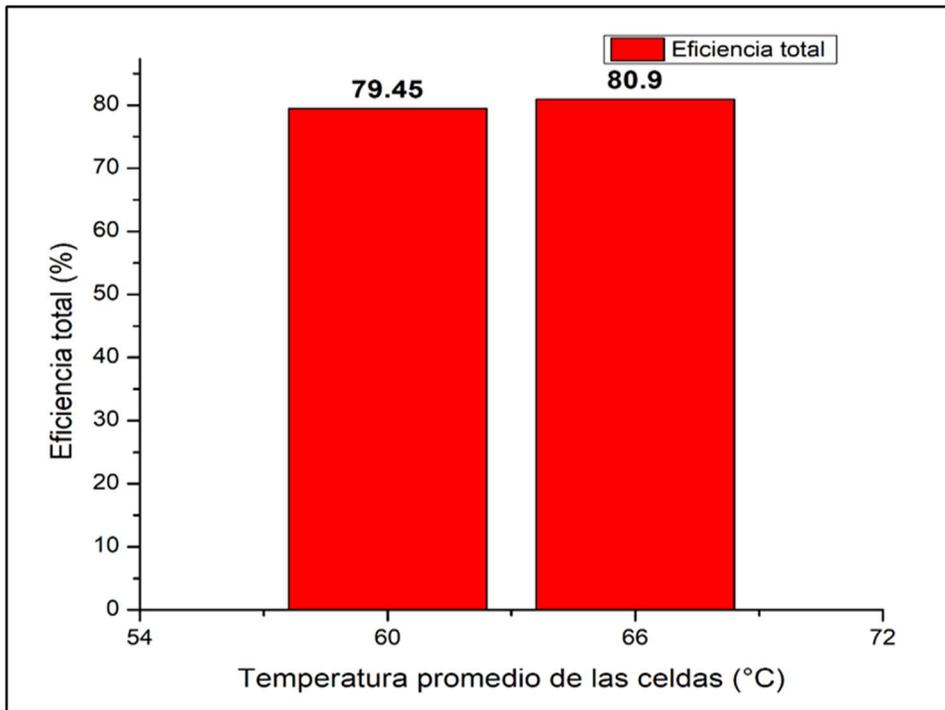
**Figura 31.** Eficiencia total del sistema

Seguidamente, se presentan la gráfica de la DNI registrada durante la prueba experimental realizada cuando el concentrador funcionó en circuito abierto por 600 segundos. En la Figura 32 no es posible apreciar variaciones considerables, por lo que el experimento realizado durante este período es válido para el análisis. El valor promedio de la DNI fue de  $910.3 \text{ W/m}^2 \pm 0.90$  en promedio.



**Figura 32.** Radiación directa normal, potencia térmica y potencia eléctrica durante operación en circuito abierto

Ahora bien, en la Figura 32 se presenta el comportamiento de la potencia térmica y la potencia eléctrica del concentrador durante la operación en circuito abierto. Es evidente que no se logra alcanzar el punto de circuito abierto debido a que se podría dañar el sistema, sin embargo, tiene valores cercanos a cero y en comparación con los valores de la potencia térmica, la potencia eléctrica tiene una aportación poco significativa en la eficiencia total del sistema. Por esta razón es posible cuantificar la radiación solar que, mediante un balance de energía, recibe el arreglo PV sancionado las pérdidas generadas por problemas ajenos a las propias celdas.

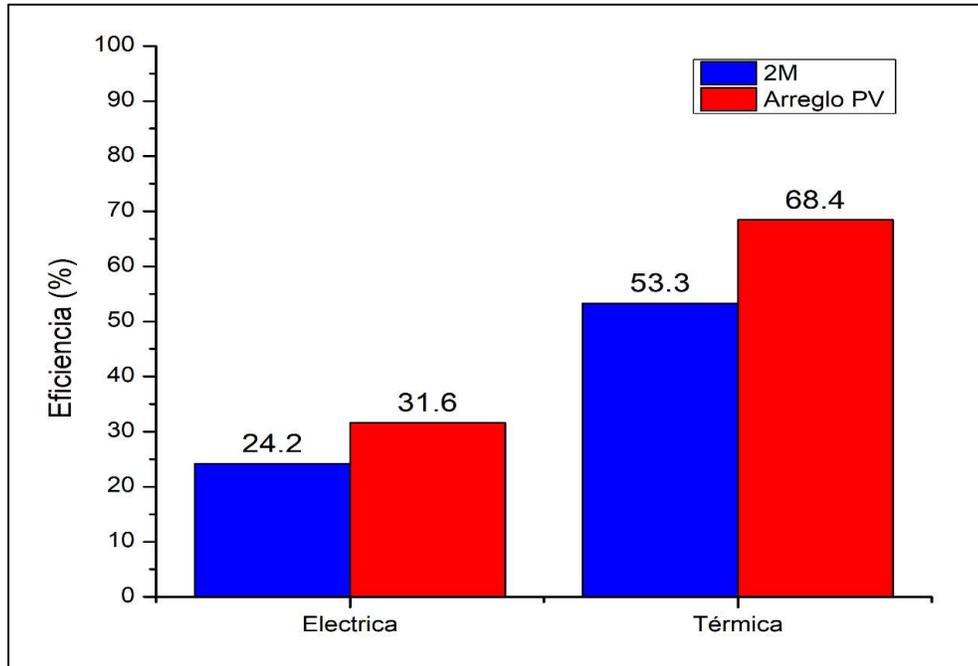


**Figura 333.** Eficiencia total del sistema sin producción eléctrica.

En la Figura 33 se muestra la eficiencia total del sistema sin producción eléctrica cuando el concentrador opera en circuito abierto, se observan dos datos de eficiencia total del sistema debido a que la prueba se repitió para confirmar los resultados bajo operaciones de operación (DNI y temperatura ambiente muy similares). La eficiencia total del sistema sin producción eléctrica es de 80.1%; este resultado explica la existencia de un 20% de pérdida ópticas acumuladas, es decir, que solo el 80% de la radiación recibida en la apertura del concentrador se recibe dentro de los PCUs debido a la reflectancia del espejo (Figura 35), irregularidades de la curvatura del disco, sombramiento del espejo por la misma estructura del concentrador (Figura 36), desbordamiento de la radiación en el foco (Figura 37), reflectancia de la esfera silica (Figura 38) y errores del mecanismo de seguimiento solar.

Tomando como base la radiación que se reciben en las celdas se calculó la eficiencia de conversión de potencia eléctrica generada por el arreglo PV sancionando las pérdidas que se generan por razones ajenas al sistema eléctrico, del cual se obtiene que la

eficiencia eléctrica es de 31.58% y el 68.42% corresponde a potencia térmica. En la Figura 34, se realiza una comparación de las eficiencias en función de la base de cálculo.



**Figura 34.** Eficiencias del concentrador 2M y del arreglo PV.



**Figura 35.** Degradación de los espejos



**Figura 36.** Sombramiento realizado por la estructura de soporte y los PCUs sobre el área reflectora.

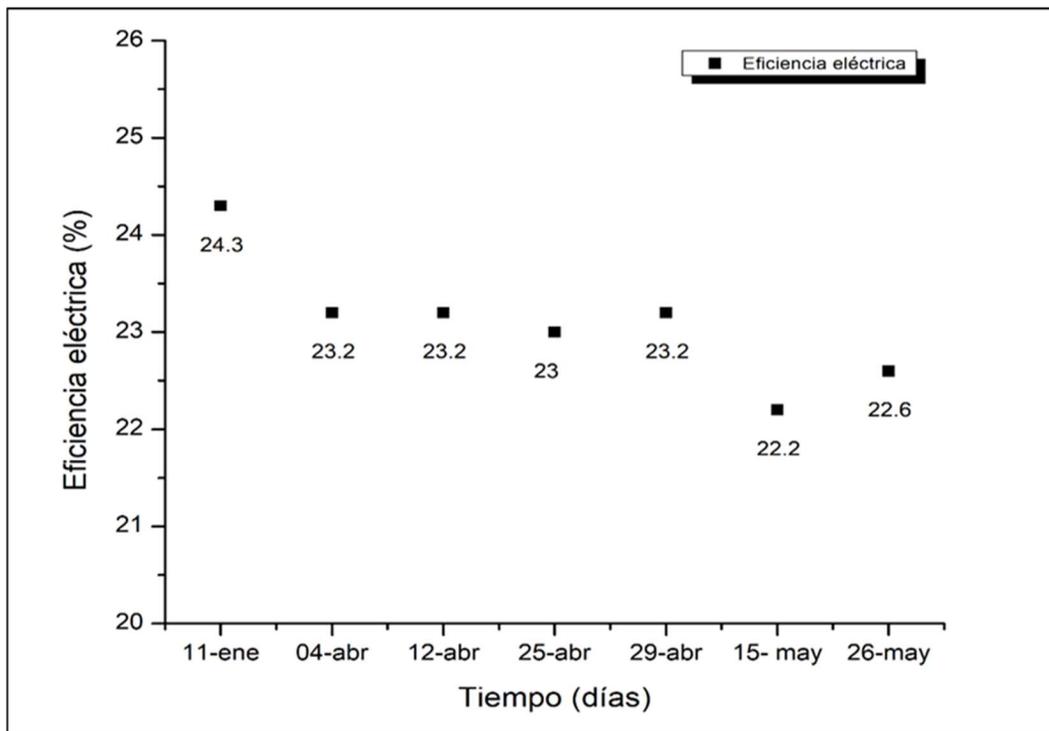


**Figura 37.** Desbordamiento de radiación sobre los PCUs.



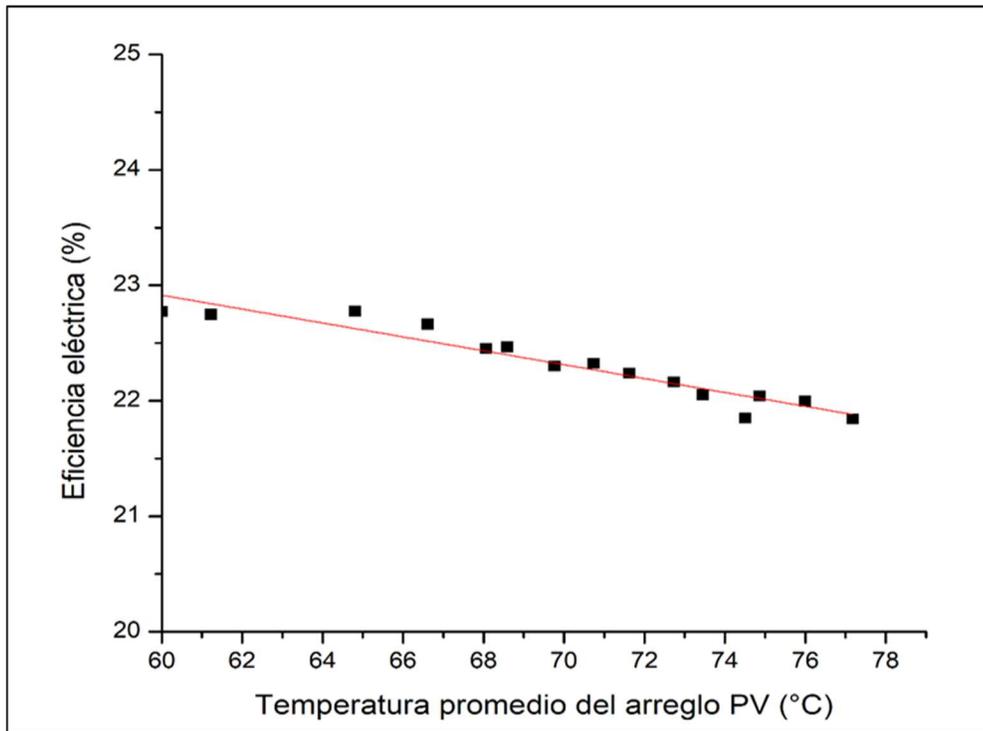
**Figura 38.** Reflectancia de la esfera silica.

Como parte de los experimentos, se realizaron pruebas en distintos días del año para evaluar la eficiencia eléctrica instantánea del concentrador en operación normal a lo largo de cinco meses de evaluación; en la Figura 39 se observa que la eficiencia eléctrica presenta valores entre 22 y poco más de 24%. La disminución que se aprecia durante el periodo de evaluación se atribuye a la temperatura ambiente –durante el primer trimestre temperatura ambiente es más baja que en el segundo trimestre-. La temperatura ambiente afecta el desempeño del concentrador debido a que el sistema de enfriamiento utiliza aire a temperatura ambiente para el proceso de enfriamiento.

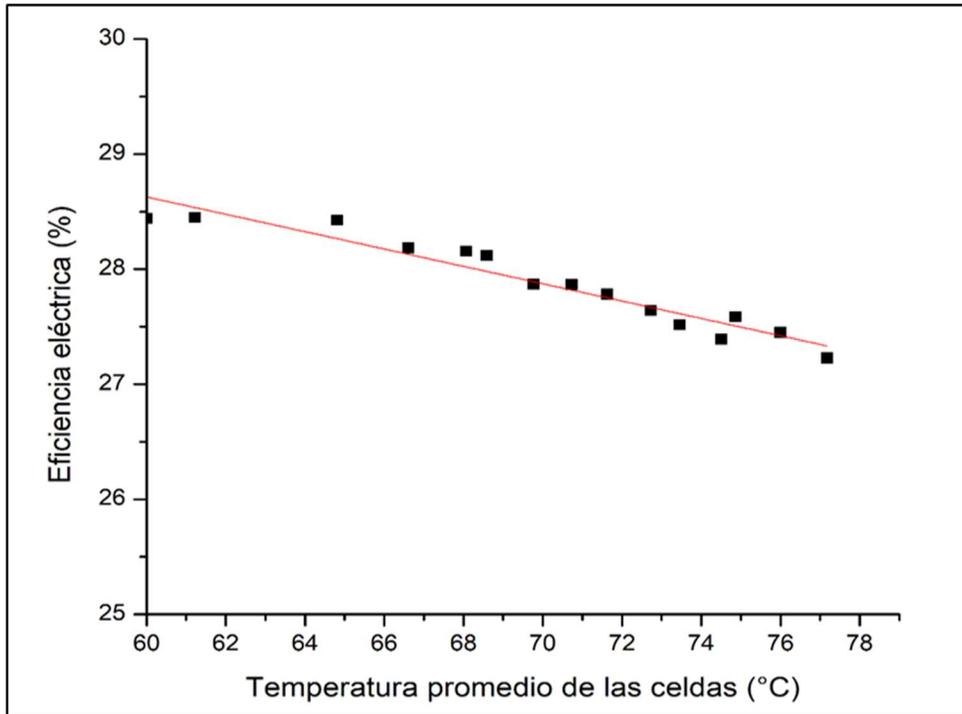


**Figura 39.** Eficiencia eléctrica instantánea del concentrador a lo largo de 5 meses de evaluación.

Con respecto al efecto de la temperatura sobre la eficiencia eléctrica, se muestra en la Figura 40 el comportamiento de la eficiencia eléctrica instantánea del concentrador para distintas temperaturas y se aprecia que, con un incremento de  $17.18^{\circ}\text{C}$ , la eficiencia eléctrica disminuye un  $0.93\%$ , resultando en un  $C_T = -0.054\ \%/^{\circ}\text{C}$ ; la DNI registrada durante esta prueba experimental fue de  $963.15 \pm 13.66\ \text{W/m}^2$  y el intervalo de temperaturas de  $60$  a  $77.18^{\circ}\text{C}$ , la temperatura de referencia es el promedio de temperaturas de las 24 celdas del concentrador.



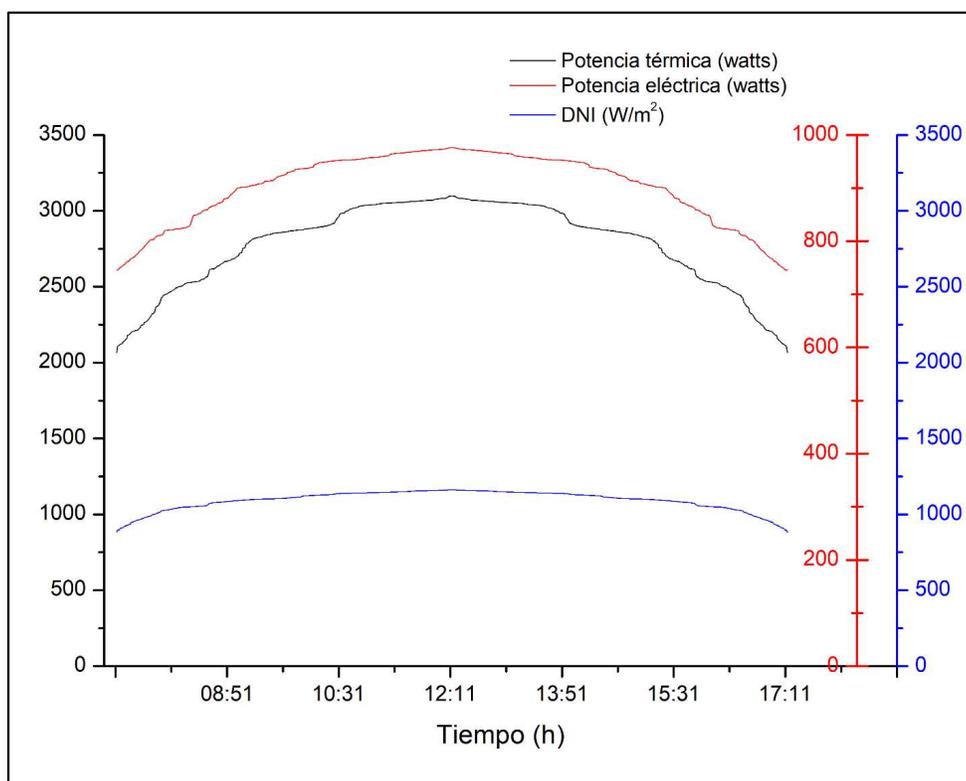
**Figura 40.** Eficiencia eléctrica instantánea del concentrador en función de la temperatura.



**Figura 41.** Eficiencia eléctrica instantánea del arreglo PV.

En la Figura 41 se presenta el efecto que tiene la temperatura de operación sobre el comportamiento de la eficiencia eléctrica instantánea del arreglo PV – utilizando como base de cálculo la radiación que se recibe en las celdas- y se aprecia que en un aumento de temperatura de **17.18 °C**, la eficiencia eléctrica disminuye **1.21%**; resultando en  **$C_T = -0.070 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$** , las condiciones de operación durante esta prueba experimental son iguales a las que se mencionan en el párrafo anterior.

Por último, para una jornada diaria de operación normal realizada de manera continua con una duración de 10 h se observa una producción muy estable con una potencia casi estable de 1,100 W con pequeñas variaciones debidas a variaciones propias de los valores de la DNI, como se observa en la Figura 42. Al final del día se produjo un total de 11 kWh y 28 kWh, de energía eléctrica y energía térmica respectivamente, comparados con los 9.02 kWh/m<sup>2</sup> recibidos de radiación directa normal en el área receptora, la eficiencia de conversión eléctrica diaria resultó en 22.6% mientras la eficiencia térmica fue del 57.4%, para una eficiencia diaria total del concentrador de ~80%.



**Figura 42.** Radiación directa normal y potencias térmica y eléctrica durante una jornada diaria de operación normal.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

La instalación del concentrador en su conjunto – estructura de soporte, espejos, PCUs y LB – tomó más tiempo de lo estimado sin embargo se concluyó exitosamente el proceso por lo que se pudieron realizar los experimentos necesarios para este estudio.

Con la realización de varias campañas de pruebas, se logró caracterizar tanto eléctrica como térmicamente un sistema de concentración solar compuesto por dos unidades de potencia con celdas multi-unión.

Con las pruebas hidráulicas se encontraron ecuaciones que describen la caída de presión en los PCUs para distintas configuraciones. El diferencial de presión obtenido cuando la rapidez de flujo es de 10 litros por minuto es de 2,362 Pa, mientras que el diferencial de presión reportado es de 1,500 Pa.

El sistema operó normalmente a una potencia eléctrica máxima de 1,200  $W_e$  y alrededor de 2,400  $W_t$  de potencia térmica cuando la radiación directa normal es de aproximadamente 900  $W/m^2$ , la temperatura ambiente es de 20°C y la masa de aire de 1.2; dando una eficiencia instantánea de 24.2% y 53.5%, eléctrica y térmica respectivamente.

El valor de FF obtenido para el sistema en su conjunto (dos PCUs) fue de 0.86, mientras que para una de las celdas del arreglo PV fue 0.97. El valor del FF del concentrador es significativamente bajo en comparación con el de una celda PV, esto señala la existencia de problemas en una o varias celdas debido a que el valor de 0.86 corresponde a un

promedio de los valores de FF de las 24 celdas que utiliza este sistema. No obstante, si se comparan estos valores de FF con los de módulos PV comerciales, que se encuentran en 0.7-0.8, es notable que las celdas MJ dan mejor rendimiento que las celdas sencillas.

El estudio de calorimetría muestra que las celdas sólo reciben ~80% de la radiación teórica que entra al área de apertura del concentrador.

Al calcular la eficiencia eléctrica de las celdas partiendo de lo que realmente reciben de radiación se obtiene valores que rondan los 30%, mientras que usando la radiación solar del aérea de apertura los valores no rebasan el 25%.

En operación constante la eficiencia instantánea global del concentrador oscila de 22 a 24.3%, estos valores se obtuvieron en forma consistente a lo largo de un periodo de cinco meses de pruebas. Esta diferencia se atribuye a que la temperatura del fluido refrigerante depende de la temperatura ambiente (debido a la configuración del sistema de enfriamiento); durante los primeros meses del año, la temperatura ambiente no es tan alta como en los meses posteriores.

En el rango estudiado la temperatura de las celdas tiene un leve impacto negativo en la eficiencia eléctrica del concentrador y del arreglo PV. Se registró un decremento de la eficiencia del 0.93% para E2M y para la REC del 1.2% con un aumento de la temperatura promedio de las celdas de 17.18°C, en el intervalo de 60 a 77.18 °C. En términos del “coeficiente de temperatura” los valores obtenidos varían de -0.054%/°C a -0.070%/°C, esto es un orden de magnitud menor comparados con un módulo de silicio del mercado que es de ~-0.5/°C.

En un día la producción eléctrica alcanza valores promedios de 11 kWh de energía eléctrica y de 28 kWh de energía térmica operando 10 horas continuas cuando se tienen 9 kWh/m<sup>2</sup> recibidos de radiación directa normal durante ese período lo que se traduce a una eficiencia de conversión eléctrica diaria de 22.6%, mientras que la eficiencia térmica fue de 57.31% para resultar en una eficiencia total diaria del sistema de 79.89%.

## 5.2 Recomendaciones

Las burbujas de aire en el circuito de agua del concentrador alteran considerablemente los resultados ya que perturban el flujo sensiblemente, se debe tratar de evitar cualquier formación de burbujas o de estancamientos de flujo.

El valor total de FF en los PCUs en conjunto es sustancialmente más bajo que el de algunas de las celdas en lo individual, por lo que un estudio más detallado definirá la razón de este comportamiento.

Por último, un estudio del sistema óptico para distribuir las pérdidas en las diferentes razones presentadas y, el cambio de los espejos actualmente por espejos nuevos.

## CAPÍTULO 6

### BIBLIOGRAFÍA

Angel, J. R. P., 2013. *Photovoltaic generator with a spherical imaging lens for use with paraboloidal solar reflector*. U.S., Patente nº 8350145.

Anon., 2013. Sharp Develops Concentrator Solar Cell with World's Highest Conversion Efficiency of 44.4%\*1. *Sharp Press Release*, 14 Junio.

Bloomberg New Energy Finance, 2016. *EnergyTrend*. [En línea] Available at: <http://pv.energytrend.com/pricequotes.html>

British Petroleum , 2016. *BP Statistical Review of World Energy*. [En línea] Available at: <https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2016/bp-statistical-review-of-world-energy-2016-full-report.pdf>

Bruton, T. y otros, 2005. *31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. s.l., s.n., p. 647.

Burgees, E. & Pritchard, D., 1978. *13th Photovoltaic Specialist Conference*. s.l., s.n., p. 1121.

Chayet, H. y otros, 2010. High efficiency, low cost parabolic dish system for cogeneration of electricity and heat. *AIP Conference Proceedings*, Volumen 175.

Chong, K.-K.y otros, 2010. *Solar flux distribution analysis of non-imaging planar concentrator for the application in concentrator photovoltaic system*. s.l., s.n.

Comisión Europea, 2017. *Commission and its priorities*. [En línea] Available at: [https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris\\_es](https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_es)

Coughenour, B. M. y otros, 2014. Dish-based high concentration PV system with Kohler optics. *Optics Express*, Volumen 22, pp. A211-A224.

Dreger, M. y otros, 2015. Development and investigation of a CPV module with cassegrain mirror optics. *AIP Conference Proceedings*, Volumen 177.

Energía Renovable, 2015. *Energía Renovable*. [En línea]  
Available at: <http://www.energiarenovable.net/energia-solar-2015>

Hayden, H., Thomas, P., Fette, N. & Pawlowski, E., 2012. *CPV semi-dense array design for a dish and tower collector*. s.l., s.n.

INSIDER, 2017. How CPV trumps CSP in high DNI locations. *Solar PV bussines intelligence*, 14 Febrero.

International Electronical Comission, 2013. *International Electronical Comission*. [En línea]  
Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/7341>

International Energy Agency, 2016. *Mexico Energy Outlook*, Paris: IEA Publications.

Jafari Fesharaki, V., Dehghani, M. & Jafari Fesharaki, J., 2011. *The Effect of Temperature on Photovoltaic Cell Efficiency*. Tehran, Iran, s.n.

Kurokawa, K. & Aratani, F., 2004. *19th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*. Paris, Francia, s.n., pp. 2731-2732.

Kurtz, S., 2012. *Opportunities and Challenges for development of a mature concentrating photovoltaic power industry*, s.l.: s.n.

Lockenhoff, R., Kubera, T. & Dieter-Rasch, K., 2010. Water cooled TJ dense array modules for parabolic dishes. *AIP Conference Proceedings*, Volumen 43.

Luque López, A. & Andreev, V. M., 2007. *Concentrator Photovoltaics*. s.l.:Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Luque, A., Sala, G. & Luque-Heredia, I., 2006. Photovoltaic Concentration at the Onset of its Commercial Deployment. *Progress in Photovoltaics*, Volumen 14, pp. 413-428.

McConell, R., 2005. Concentrator photovoltaics technologies: review and market projects.. *Refocus*, Volumen 6, pp. 35-39.

O. Dupré, 2017. *Thermal Behaviour of PV devices*. s.l.:Springer International Publishing.

Omega Engineering, 2017. *Omega User's Guide FPR 300/310 series low-flow meter*. [En línea]

Available at: <https://www.omega.com/manuals/manualpdf/M4172.pdf>

Parida, B., Iniyam, S. & Goic, R., 2011. A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volumen 15, pp. 1625-1636.

Sathyanarayana, P., Rajkiran , B., Lakshmi Sagar , P. & Girish Kumar, 2015. Effect of Shading on the Performance of a Solar PV Panel. *Energy and Power*, pp. 1-4.

Schmitz, M. y otros, 2017. A 6-focus high-concentration photovoltaic-thermal dish system. *Solar Energy*, Volumen 155, pp. 445-463.

Secretaria de Energía, 2018. *Sistema de información energética*. [En línea]  
Available at:  
<http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&subAction=applyOptions>

Shanks, K., Sarmah, N., Reddy, K. & Mallick, T., 2014. The design of a parabolic reflector system with tracking tolerance for high solar concentration. *AIP Conference proceedings*, Volumen 211.

Sharp, 2013. Sharp Develops Concentrator Solar Cell with World's Highest Conversion Efficiency of 44.4%\*1. *Sharp Press Releases*, 14 Junio.

Stalcup, T. y otros, 2016. Rehn dish-based CPV: Module performance and planned 100kW plant. *American Institute of Physics*.

Swanson, R., 2000. The Promise of Concentrators. *Progress in Photovoltaics: Research and Application*, Volumen 8, pp. 93-111.

Tibbits, T., Beutel, P. & Grave, M., 2014. *New efficiency frontiers with wafer-bonded multi-junction solar cells*. s.l., s.n.

Tushar C., A., Sanjay N., H., Sunil V., D. & Adinath, F., 2015. Design and prototyping of optical Compound Parabolic Concentrator (CPC) for concentrating solar cell. *International Engineering Research Journal*, pp. 1794-1799.

Wiesenfarth, M. y otros, 2017. *Current status of concentrator pv technology*, s.l.: Fraunhofer ISE Publications.

Wiesenfarth, M. y otros, 2016. CPV-T mirror dish system combined with water desalination system. *AIP Conference proceedings*, Volumen 111.

World Bank Group, 2016. *Global Solar Atlas*. [En línea] Available at: <http://globalsolaratlas.info/?c=29.22889,-111.610107,7&s=29.09556,-110.95083>

Zhu, L. y otros, 2011. Water immersion cooling of PV cells in a high concentration system. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Volumen 95, pp. 538-545.

## ANEXOS

Anexo 1.- Ubicación del concentrador en la Plataforma Solar de Hermosillo.

