

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISION DE INGENIERIA

Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia

**Operación de equipo de concentración solar para
celda fotovoltaica de alta eficiencia**

TESIS PROFESIONAL

Que presenta:

Mario Coronel Higuera

Para obtener el título de:

Ingeniero Químico

Director de Tesis:

Dr. Rafael Enrique Cabanillas López

HERMOSILLO, SONORA

Junio de 2016

Repositorio Institucional UNISON



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



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

RESUMEN

En este trabajo se describe la operación de un equipo de concentración solar diseñado para producir energía eléctrica haciendo uso de celdas fotovoltaicas multi-unión de alta eficiencia. La óptica del concentrador está basada en la característica de permitir cierta tolerancia para el seguimiento solar sin afectar la razón de concentración. Así mismo, el arreglo geométrico de los colimadores permite una distribución homogénea de la radiación sobre la fotocelda de multi-unión, aspecto crítico para su buen funcionamiento. El prototipo es capaz de operar con una producción casi constante de 800 W por unidad y además puede ser usado para aprovechar calor para aplicaciones de media temperatura.

ABSTRACT

In this work the operation of a solar concentration designed to produce electricity using multi-junction photovoltaic cells high efficiency is described. The optical concentrator is based on the feature of allowing some tolerance for solar tracking without affecting the concentration ratio. Likewise, the geometric arrangement of the collimators allows a homogeneous distribution of radiation on the multijunction solar cell, critical for proper operation. The prototype is capable of operating with an almost constant output of 800 W per unit and can also be used to take heat to medium temperature applications.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera dar un gran agradecimiento a mi director de tesis el doctor Rafael Enrique Cabanillas López, a mi institución la universidad de sonora, la cual ha sido mi casa desde el día que entre a esta carrera, a mis padres los cuales han hecho todo esto posible, en especial a mi pareja quien me ha ayudado y apoyado para realizar mi trabajo de tesis, así como también me gustaría agradecer a mis lectores y a mi comité de tesis y también me gustaría agradecer a aquellas personas que me han ayudado a lo largo de mi carrera y con mi trabajo de tesis.

ÍNDICE GENERAL

Índice de tablas e imágenes. -----	Pg.5
Capítulo I. -----	Pg.7
1.1 <i>Introducción.</i> -----	Pg.7
1.2 <i>Justificación.</i> -----	Pg.9
1.3 <i>Objetivos.</i> -----	Pg.13
1.4 <i>Metodología.</i> -----	Pg.14
Capítulo II.- La Óptica. -----	Pg.15
Capítulo III. -----	Pg.22
3.1 <i>Unidad de Potencia.</i> -----	Pg.22
3.2 <i>Sobre las celdas fotovoltaicas.</i> -----	Pg.23
Capítulo IV. -----	Pg.29
4.1 <i>Ensamblado de todo el equipo.</i> -----	Pg.29
4.2 <i>Estructura metálica.</i> -----	Pg.30
4.3 <i>Estructura mecánica.</i> -----	Pg.30
4.4 <i>Módulos.</i> -----	Pg.32
Capitulo V.- Operación del equipo-----	Pg.35
Conclusiones. -----	Pg. 44
Referencias. -----	Pg. 45

ÍNDICE DE TABLAS E IMÁGENES

<i>Tabla 1.1: Capacidad instalada de distintos tipos de generación eléctrica en México. (Electricidad, 2014).</i>	Pg.11
<i>Tabla 1.2: Comparación de Producción de energía neta entre el año 2013 y 2014 (Electricidad, 2014).</i>	Pg.12
<i>Imagen 2.1: visualización de una faceta en forma de paraboloides elíptico con un punto focal determinado.</i>	Pg.15
<i>Imagen 2.2: ejemplificación del funcionamiento de la esfera de cristal.</i>	Pg.16
<i>Imagen 2.3: diagrama de operación del arreglo óptico.</i>	Pg.18
<i>Imagen 2.4: arreglo óptico de redistribución de la luz</i>	Pg.18
<i>Imagen 2.5: Simulación computarizada de un concentrador kohler de 804x para una celda de multi-unión de 1 cm². Distribución en la celda perfectamente alineada con el sol. (Radiación directa normal = 850 w/m²).</i>	Pg.20
<i>Imagen 2.6: Simulación computarizada de un concentrador kohler de 804x para una celda de multi-unión de 1 cm². Con un error de alineación de 0.7 grados. (Radiación directa normal = 850 w/m²).</i>	Pg. 21
<i>Imagen 3.1: diagrama de la unidad de potencia. (2014).</i>	Pg.22
<i>Imagen 3.2: (a) Rango de absorción de las celdas de silicio, (b) rango de absorción dentro del espectro total de emisión por tipo de celda. (potential, 2007).</i>	Pg.24
<i>Imagen 3.3: Visualización arreglo de los materiales de las distintas capas que conforman cada celda. (Sherif, 2006).</i>	Pg.25
<i>Imagen 3.4: Grafica del laboratorio NREL de distintas eficiencias para cada tipo de celda solar contra en año en el que se fabricaron.</i>	Pg.28
<i>Imagen 4.1: Equipo de concentración solar (estructura metálica, mecánica y facetas).</i>	Pg.29
<i>Imagen 4.2: Motor y rotor encargados de girar el equipo en el eje azimutal.</i>	Pg.31
<i>Imagen 4.3: Motor encargado de mover el equipo en el eje de elevación.</i>	Pg.31
<i>Imagen 4.4: Generador de 2 Módulos REhnu con montaje en eje dual.</i>	Pg.32
<i>Imagen 4.5: Unidad de potencia utilizada en el equipo de concentración solar.</i>	Pg.33
<i>Imagen 4.6: visualización del sistema de enfriamiento montado en la estructura.</i>	Pg.33
<i>Imagen 4.7: Unidad de REhnu de 8 modulos.</i>	Pg.34

Imagen 5.1: Programa utilizado para operar el equipo de concentración solar haciendo uso del software de "labview 2009". -----Pg.35

Imagen 5.2: Apagadores ubicados dentro de la caja del equipo. -----Pg.36

Imagen 5.3: Equipo en posición de "parking". -----Pg.37

Imagen 5.4: Casillas de "pointing offset" que deben ser establecidas. -----Pg.37

Imagen 5.5: Opción "Run" dentro del "Tracker mode command". -----Pg.38

Imagen 5.6: Graficas en tiempo real de las temperaturas. -----Pg.38

Imagen 5.7: Opción "Park" en el "Tracker mode command". -----Pg.39

Imagen 5.8: Opcion "Manual pointing" (azul) en "Tracker mode command" y la opción de "Manual target" (rojo). -----Pg.39

Imagen 5.9: Conexión a un par de baterías para almacenar la energía producida por el equipo. -----Pg.40

Imagen 5.10: Circuito completo de la unidad de potencia en conexión con las baterías y las resistencias. -----Pg.41

Imagen 5.11: Grafica de temperatura aumentando(azul) a medida que el error de alineación solar "Pointing error" disminuye (Rojo). -----Pg.42

Imagen 5.12: Grafica de temperatura disminuyendo(azul) a medida que el error de alineación solar "Pointing error" aumenta (Rojo). -----Pg.42

CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUCCIÓN:

En esta investigación se van a describir las partes y el funcionamiento de un equipo diseñado para concentrar la energía del sol y posteriormente que sea aprovechada por celdas fotovoltaicas de alta eficiencia (celdas fotovoltaicas de multi-unión). Este es un proyecto de CONACYT de un conjunto de universidades de las cuales se encuentra la Universidad de Sonora y la Universidad de Arizona.

La energía solar es una fuente renovable de energía que se aprovecha de la radiación electromagnética que proviene del sol.

Este tipo de energía puede aprovecharse en forma de calor o en forma de luz para diferentes propósitos mediante diferente uso de tecnologías que han ido evolucionando desde la antigüedad.

En la actualidad esta energía puede aprovecharse por medio de diversos tipos de captadores como celdas fotovoltaicas, heliostatos o colectores térmicos convirtiendo la energía solar en energía eléctrica o térmica.

A diferencia de los otros métodos de generación de energía por medio de energía solar, las celdas fotovoltaicas convierten directamente la energía solar en energía eléctrica, esto tienen una ventaja enorme, debido a que no es necesario realizar transformaciones de energía (solar- térmica- mecánica- eléctrica), así como tampoco trabajar con un ciclo termodinámico, las celdas fotovoltaicas tienen la ventaja de transformar directamente la energía solar en energía eléctrica, evitándose las pérdidas por disminución de eficiencia en cada una de las etapas

Existen varios tipos de celdas fotovoltaicas, las más comunes son las de silicio, pero las celdas utilizadas para este proyecto son celdas fotovoltaicas de multi-unión, estas son celdas pequeñas, pero muy eficientes hasta un 40% de conversión según Roger Angel (*Angel, 2011*)

Roger Angel explica el funcionamiento, metodología y problemática en la realización de este equipo.

El funcionamiento es así: las celdas fotovoltaicas convencionales de silicio convierten una cierta porción del espectro total de radiación emitido por la luz solar, las celdas que se utilizan en este equipo son celdas de multi-unión, son celdas que están hechas de diversos materiales, los cuales abarcan un rango mucho más amplio de la radiación emitida por la luz solar, en otras palabras, tenemos varios materiales unidos y cada material abarca un rango distinto de radiación, pudiendo así abarcar un gran porcentaje del rango total de radiación que llega de la luz del sol, así a estas celdas muy eficientes, pero para poder hacer que estas celdas tengan una eficiencia muy alta es necesario concentrar mucha luz y que este uniformemente distribuida, lo cual nos lleva a la problemática principal.

Problemática: cómo hacer para concentrar la luz en estas celdas, y aún más difícil, como hacer para que este lo mejor distribuido posible?, Roger Angel diseñó un concentrador solar haciendo uso de espejos curvos, estos espejos son originalmente planos a los cuales se les aplica calor hasta el punto elástico y toman la forma del molde, el cual tiene la forma de un paraboloide con un punto focal determinado. Para solucionar el problema de la distribución se utilizó una esfera de cristal, la cual enfoca de manera más uniforme la luz concentrada en el punto focal, y dentro de la unidad de potencia (lugar donde se encuentra montadas las celdas) hay un arreglo de pirámides truncas en forma de conos para distribuir uniformemente la luz en las celdas fotovoltaicas.

El problema subsiguiente fue que la energía no transformada en energía eléctrica queda como energía calorífica, la cual es necesaria retirar, por lo que se necesitó diseñar un sistema de enfriamiento, el cual consta de un flujo de agua destilada la cual es bombeada dentro de la unidad de potencia para retirar el exceso de calor y después pasa por un intercambiador de calor para retirar el calor del agua y completar el ciclo.

1.2 JUSTIFICACIÓN:

La idea es dar a conocer estos equipos para mejorar el aprovechamiento de las tecnologías solares en nuestra región e implementarlo, para ofrecerse a industrias particulares o estatales como un método viable de inversión para la producción de energía eléctrica.

Esta nueva tecnología de concentración solar para producir energía eléctrica haciendo uso de celdas fotovoltaicas de multi-unión ha mostrado ser bastante redituable, la idea es competir con los costos de la energía producida por medio de combustibles fósiles, el precio aproximado de energía por combustible fósil es de 1 USD por Watt., el precio por celdas fotovoltaicas de silicio cristalino es de aproximadamente 5 USD por watt, pero las celdas de multi-unión llegan a producir hasta 0.20 USD por watt, en conjunto con el sistema requerido para que las celdas logren estos costos hace que el precio llegue a estar cerca de 1USD por watt. Lo que las hace competitivas a las del combustible fósil, la diferencia es que los costos de inversión para este tipo de producción de energía son mucho más bajos que los del combustible fósil, lo que hace un método viable para empresas que quieran producir su propia energía eléctrica sin realizar una inversión tan grande y generar energía limpia de una fuente renovable que es el sol.

Cerca del 80% del consumo mundial de la energía eléctrica proviene de los combustibles fósiles y de plantas nucleares.

El principio de la generación eléctrica es el mismo: energía en forma de calor, proporcionada por la quema de combustibles fósiles. En el caso de las plantas nucleares por fisión nuclear, dicha energía se utiliza para producir vapor de agua, el cual se utiliza para mover una turbina acoplada a un generador y de este modo producir corriente eléctrica.

En el caso de la producción de energía con celdas fotovoltaicas de multi-unión, la producción es relativamente más sencilla, debido a que no es necesario manejar ciclos termodinámicos complejos en los que se requiere la quema de combustible el cual deja como residuo gases contaminantes.

En el caso de la concentración solar no es necesario contar con grandes equipos ni maquinarias y lo más importante es que el “combustible” utilizado es la energía solar, la cual es libre de contaminación y es una fuente prácticamente inagotable de energía.

México cuenta con mucho potencial para convertirse en un líder mundial de energía solar, gracias a su posición geográfica a nivel mundial, debido a una alta radiación solar que recibe (10 veces más que el promedio mundial), alta densidad de kW/m² (5kWh/m²), con un 90% de radiación directa.

En específico, Sonora, es un lugar privilegiado en comparación a otros estados de la república mexicana en cuanto a energía solar se refiere; con un promedio anual de 7 a 8 kWh/m² por día (dependiendo la época del año), a diferencia del D.F. que es sólo de 3.5 kWh/m² por día.

En el Informe anual del año 2014 de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) dice que: *“la CFE tiene un firme compromiso con las energías renovables. Por ello, también impulsa el desarrollo de proyectos de generación renovable, a partir del agua y el vapor del subsuelo, que son las fuentes renovables constantes, del viento y solar para aprovechar el alto potencial del país en esta materia. Al cierre de 2014, la CFE contaba con cuatro centrales de generación renovable en proceso de construcción: Central Geotérmica Los Azufres III Fase I en Michoacán, Central Geotérmica Los Hornos III Fase A en Puebla, Informe Anual 13 2014 Central Eólica Sureste I Fase II en Oaxaca y Campo Solar Agua Prieta en Sonora. Estos proyectos representan 191 Megawatts de capacidad instalada y cuentan con una inversión conjunta de alrededor de 283 millones de dólares.”*

Generador	Tipo de tecnología	Capacidad efectiva (MW)		Número de Centrales y de Unidades en 2014		Participación porcentual por tecnología	Variación 2013-2014 (%)
		2013	2014	Centrales	Unidades		
CFE	Hidroeléctrica	11,266.8	12,268.8	80	218	22.6	8.9
	Vapor (combustóleo y gas)	11,698.6	11,398.6	26	89*	21.0	-2.6
	Ciclo combinado	7,420.3	7,566.6	13	68	13.9	2
	Carboeléctrica	5,378.4	5,378.4	3	15	9.9	-
	Turbogás	1,510.4	2,303.4	46	110	4.2	52.5
	Geotermoelectrica	823.4	813.4	4	38	1.5	-1.2
	Combustión interna	259.2	302.4	9	78	0.6	16.7
	Eoloeléctrica	86.8	86.3	3	8	0.2	-
	Solar fotovoltaica	6.0	6.0	2	2	< 0.1	-
Nucleoeléctrica**	1,400.0	1,400.0	1	2	2.6	-	
Total CFE	-	39,849.9	41,523.9	187	628	75.4	4.3
Productores Independientes de Energía (PIE)	Ciclo Combinado	12,339.9	12,339.9	23	77	22.7	-
	Eoloeléctrica	510.9	510.9	5	376	0.9	-
Total PIE	-	12,850.8	12,850.8	28	453	23.6	-
Total		52,700.7	54,374.7	215	1,081	100	3.2

Fuente: Dirección de Operación, Comisión Federal de Electricidad. Diciembre 2014. Cifras redondeadas.

* De estas unidades, 6 utilizan gas natural, 66 usan combustóleo y 17 queman tanto gas natural como combustóleo.

** La capacidad efectiva con tecnología nucleoelectrica no incluye el aumento de capacidad autorizado por la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias el 19 de diciembre de 2014.

Tabla 1.1: Capacidad instalada de distintos tipos de generación eléctrica en México. (Electricidad, 2014)

A pesar del potencial que tenemos en México (entre 4.5 y 7 kW/m²) de producir energía eléctrica por medio de la energía solar, estamos muy escasos en tecnología solar instalada en comparación con otros países como estados unidos, España e inclusive Alemania (la cual recibe entre 2.4 y 3.4 kW/m²).

La energía solar en México según el informe anual 2014 de CFE, es la que tiene la menor aportación, a pesar de que tuvo un incremento de generación de 5.4 Gigawatts hora en comparación con el año 2013, sigue siendo la tecnología que tiene el menor aporte en cuanto producción de energía neta (la producción de energía neta es la producción de energía bruta menos la energía utilizada en las centrales de generación).

En la siguiente tabla se muestra la comparación de generación de energía entre el año 2013 y el 2014 en los distintos tipos de tecnologías.

Generador	Tipo de tecnología	Generación (Gigawatts hora)		Variación relativa (%)	Variación absoluta (Gigawatts hora)
		2013	2014	2013-2014	2013-2014
CFE	Hidroeléctrica	26,675.3	37,491.3	40.5	10,816.0
	Ciclo combinado	41,159.1	45,772.6	11.2	4,613.5
	Carboeléctrica	29,299.7	31,229.8	6.6	1,930.1
	Eólica	189.3	211.8	11.9	22.5
	Solar fotovoltaica	7.0	12.4	77.1	5.4
	Geotermoeléctrica	5,592.0	5,578.6	-0.2	-13.4
	Combustión interna	1,439.4	1,343.5	-6.7	-95.9
	Turbogás	3,691.9	2,481.4	-32.8	-1,210.5
	Vapor (combustóleo y gas)	43,782.0	30,743.9	-29.8	-13,038.1
	Nucleoeléctrica	11,377.1	9,302.7	-18.2	-2,074.4
	Diversas tecnologías	1,791.6	997.3	-44.3	-794.3
Total CFE	-	165,004.4	165,165.3	0.1	160.9
Productores Independientes de Energía (PIE)	Ciclo combinado	82,358.7	83,840.3	1.8	1,481.6
	Eólica	1,624.1	1,864.4	14.8	240.3
Total PIE	-	83,982.8	85,704.7	2.0	1,721.9
Total		248,987.2	250,870.0	0.8	1,882.8

Fuente: Dirección de Operación, Comisión Federal de Electricidad. Diciembre 2014. Cifras redondeadas.

* Considera la electricidad generada en unidades móviles y en las pruebas de nuevas unidades durante su construcción.

Tabla 1.2: Comparación de Producción de energía neta entre el año 2013 y 2014 (Electricidad, 2014)

En otras palabras, Sonora tiene un gran potencial no explotado y es por eso que es necesario implementar nuevas tecnologías y hacer uso de nuestro potencial para impulsar el uso de las fuentes renovables de energía, no solo en nuestro estado, sino también en todo el país.

Este es un proyecto en conjunto de la Universidad de Sonora junto con la Universidad de Arizona, la UNAM y con el Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar (CeMIEsol) el cual estructura un consorcio capaz de generar sinergias hacia el uso de energía solar en México, los cuales han realizado este proyecto de producción de electricidad solar mediante sistemas de disco parabólico, a partir de fotoceldas de alta eficiencia y dispositivos termoiónicos avanzados.

Este proyecto es un conjunto de tecnologías y habilidades de todos los organismos involucrados para poder llevar a cabo el prototipo de seguidor solar que permita integrar los sistemas fotovoltaicos con el sistema de Kohler (desarrollado por la Universidad de Arizona).

Con esto se pudo diseñar un mecanismo de seguimiento solar con las especificaciones necesarias para las tecnologías desarrolladas por la Universidad de Sonora y la Universidad de Arizona y fabricar un prototipo de seguimiento funcional de seguidor solar.

1.3 OBJETIVOS:

Objetivo Principal:

- Describir el funcionamiento de un prototipo experimental de generación de potencia eléctrica con concentración solar para celdas fotovoltaicas de alta eficiencia.

Objetivos Específicos

- Describir el funcionamiento del equipo completo ensamblado y funcionando.
- Describir sus partes principales (estructura metálica, mecánica y unidad de potencia).
- Describir la óptica que se utiliza para la concentración en dichas celdas.
- Describir la operación con el sistema de control.

1.4 METODOLOGÍA:

En este trabajo se va a describir la operación de un equipo de concentración solar para celdas fotovoltaicas de alta eficiencia, así como la descripción de cada una de sus partes y su funcionamiento.

Primero se realizó una revisión de la literatura especializada al respecto.

Se estudió el sistema óptico para comprender el funcionamiento del prototipo.

Se identificaron las principales componentes del prototipo.

Se participó en la instalación y puesta en marcha del prototipo en la Plataforma Solar de Hermosillo.

CAPÍTULO 2

LA ÓPTICA:

La óptica que se emplea en este sistema es una parte crucial en la elaboración de este mecanismo, ya que, lo que se busca es captar la mayor cantidad de luz posible y concentrarla en un punto para después distribuirlo de una manera uniforme a las celdas de multi-unión, y para lograr hacer esto se necesita hacer uso de conocimientos ópticos para dar un buen rendimiento y aprovechamiento de la energía solar.

Para captar la energía solar es necesario tener una superficie reflejante, en este caso se utilizó un espejo al cual se le llama *faceta*, esta faceta es un espejo de 1.65m por 1.65m (*Imagen 2.1*), pero esta faceta tiene la cualidad de tener una forma de un paraboloide elíptico, el cual es una superficie con una curvatura definida, esta forma tiene la ventaja de tener un punto focal a una distancia determinada, en este caso de 1.5m, lo que hace posible concentrar la energía en un punto más pequeño pero con mucha más intensidad.



Imagen 2.1: visualización de una faceta en forma de paraboloide elíptico con un punto focal determinado

No existe superficie en la actualidad que sea 100% reflejante, es decir, que toda la energía que incida en ella se refleje por completo. Brian whelright (Coughenour et al., 2014) dice que: “Los reflectores de vidrio de cristal plateados tienen una larga tradición en las plantas cilindro-parabólicos CPS. Uno de estos casos es la planta SEGS en California que ha estado en funcionamiento desde principios de 1980. Aquí se ha demostrado que por más de 15 años de servicio, los espejos pueden todavía ser limpiados a su apariencia como nueva con una reflectividad del 94%. La tasa de pérdida de reflectividad de los paneles ocasionada por granizo, microrráfagas, etc. era sólo el 0,3% anual. Más recientemente, los revestimientos ultra reflectantes y anti-suciedad se han desarrollado específicamente para reflectores de vidrio. Los recubrimientos de superficie anti suciedad desarrollados por Flabeg afirman haber demostrado un 50% menos de adherencia de polvo y de partículas desde que comenzaron las demostraciones en 2011 , mientras que la reflectividad de la superficie posterior con revestimiento fue medida de forma independiente por NREL en 2012 han demostrado mejorado enormemente el rendimiento óptico de reflectores de vidrio, tan altas como 97,5% de reflectividad a 500 nm, con reflectancia solar-ponderada global del 95,4%.”

Este tipo de facetas son las utilizadas en este sistema, debido a su gran capacidad de reflectividad y concentración en el punto deseado.

Las celdas fotovoltaicas de multi-unión dentro de la unidad de potencia se encuentran dentro de un arreglo de espejos atrás de la esfera de cristal (*Imagen 2.2*).

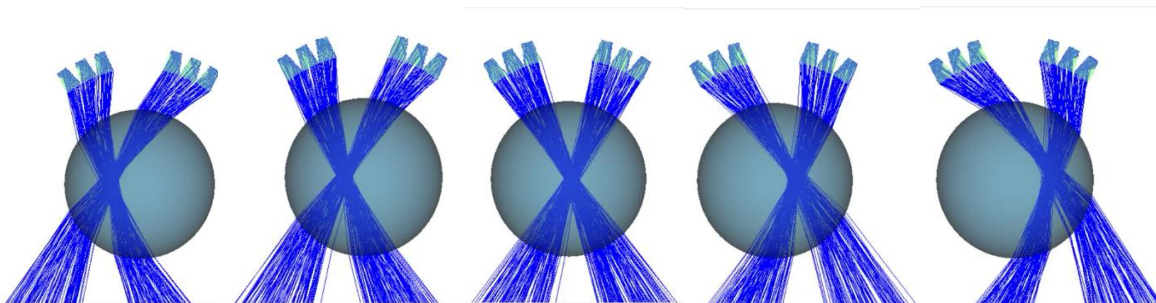


Imagen 2.2: ejemplificación del funcionamiento de la esfera de cristal, las celdas fotovoltaicas de alta eficiencia de multi-unión se ubican en la parte superior, y los ramos de color azul

ejemplifican la variación angular de la luz solar y la corrección de la misma en un rango aproximado de ± 1.5 grados de alineación.(Wheelwright, 2011)

En el punto focal, la luz se encuentra concentrada, pero no se encuentra uniformemente distribuida, lo que genera un problema debido a que, para que las celdas de multi-unión alcancen la eficiencia deseada es necesario tener una distribución uniforme en toda la superficie.

Para Distribuir de manera uniforme la energía solar concentrada se hace uso de 2 partes, la primera es una esfera de cristal, cuya función es redistribuir la energía de manera más uniforme a lo largo de las celdas de multi-unión, como se explica en el documento *(Christian Dávila-Peralta and Rodríguez-Carvajal, 2015)* de la siguiente manera:

“Una segunda fase óptica es hecha por una lente esférica de sílice, que distribuye la radiación solar en las células fotovoltaicas de multi-unión, colocadas detrás de la esfera en una superficie curva, incluso cuando el seguimiento está fuera de eje. Esta matriz óptica tiene un ángulo de aceptación de $1,5^\circ$, Relajando los requisitos del seguimiento solar. La Imagen 2.3 muestra un diagrama de la operación de la óptica, que muestra la proyección de la imagen solar en la superficie curva (a), que representa los rayos solares en una en el eje de seguimiento (b), y en un seguimiento de fuera del eje.

Las pérdidas angulares de apertura son causadas por muchas razones como tolerancia de fabricación, la desalineación de montaje, y la deformación en la estructura en condiciones de servicio. A medida que la contribución de cada fuente de errores individuales no se conoce con precisión, el equipo elige $1/2$ de ángulo de aceptación de los módulos que se pierde por el desplazamiento estructural, causada por el arrastre del viento o el efecto de la gravedad.”

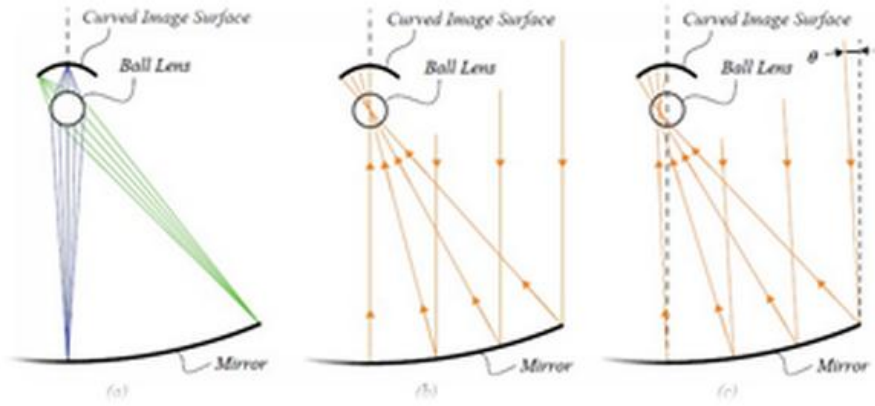


Imagen 2.3: diagrama de operación del arreglo óptico.

Una tercera parte en el arreglo óptico se encarga de homogenizar la luz es un arreglo de espejos doblados que sirven como colimadores para las celdas, las cuales se encuentran detrás de este arreglo de espejos (imagen 2.4)

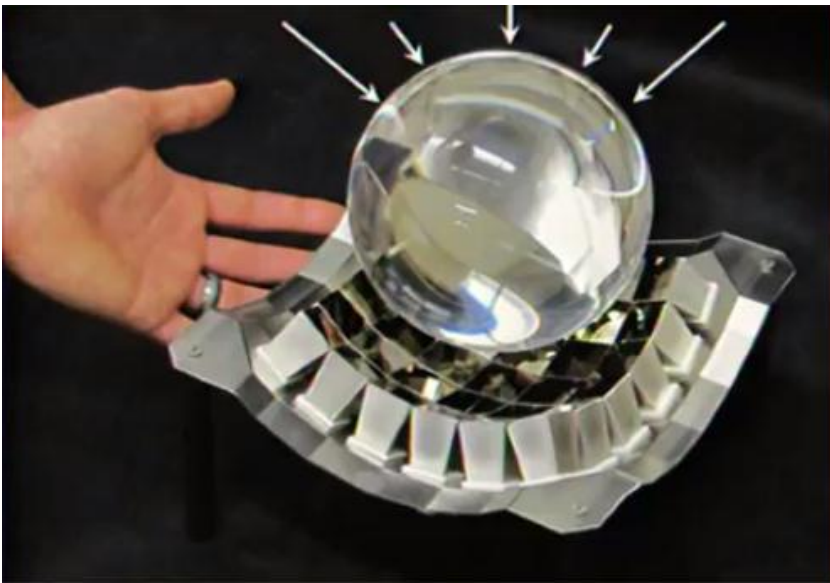


Imagen 2.4: arreglo óptico de redistribución de la luz

Utilizando una celda a escala, se puede saber el calor que se le va a sacar dependiendo de su tamaño, las condiciones a la cual se realizó este análisis fueron de una concentración de $C_g = 804x$, sombreado de SOE = 1%, suponiendo una reflectividad de 95%, la transmisión de la cubierta de 91%, y teniendo en cuenta las pérdidas de Fresnel de la SOE, la eficiencia óptica simulada resultante del concentrador es 80,97%. El sistema resultante tiene una relación de concentración de 804x, para lo cual se logra el ángulo de aceptación (90% de disminución) de $\pm 1,41$ grados.

El análisis, da una excelente uniformidad y la irradiación pico de 650 soles (Radiación normal directa @ 850 W / m²). La intensidad de irradiación en la celda está por debajo de 1500 soles que es suficientemente baja como para las células solares de alta eficiencia en tándem presentes. El resultado de la simulación de la distribución de la irradiancia en la celda cuando el concentrador se encuentra perfectamente dirigido al sol se puede ver la distribución de la irradiancia en la *imagen 2.5* Y bajo la situación de cuando la celda tiene un error de seguimiento de 0.7grados en la concentración, el aumento irradiación pico de hasta 1108 soles que también sigue siendo aceptable para el funcionamiento de la celda, como se puede ver en la *imagen 2.6.* (Maikel Hernandez and Beníteza, 2008)

Freeform Köhler XR. Irradiance distribution on the cell.
Perfect tracking

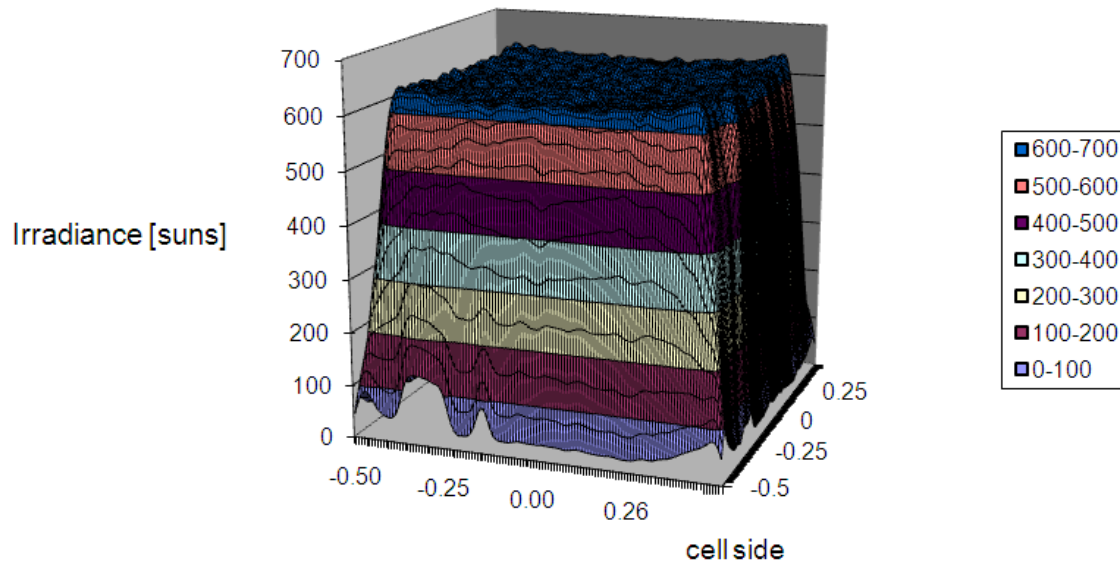


Imagen 2.5: Simulación computarizada de un concentrador kohler de 804x para una celda de multi-uni3n de 1 cm². Distribuci3n en la celda perfectamente alineada con el sol. (Radiaci3n directa normal = 850 w/m²)

Freeform Köhler XR. Irradiance distribution on the cell.
Tracking error = 0.7 deg

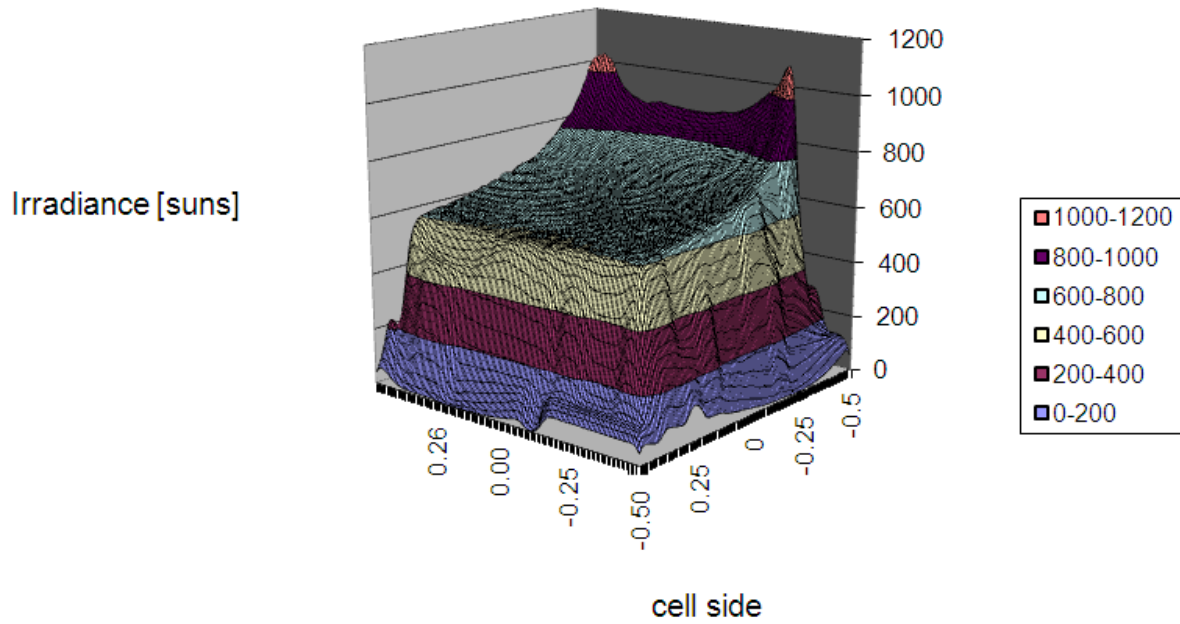


Imagen 2.6: Simulación computarizada de un concentrador kohler de 804x para una celda de multi-uni3n de 1 cm². Con un error de alineaci3n de 0.7 grados. (Radiaci3n directa normal = 850 w/m²)

CAPÍTULO 3

3.1 UNIDAD DE POTENCIA:

La unidad de potencia es un equipo diseñado para concentrar de mejor manera la energía solar que está siendo concentrada por las facetas paraboloideas, este equipo tiene una forma de cilindro de 152 mm de diámetro el cual converge con una esfera de cristal de 43 mm de diámetro, la función principal de la esfera es de disminuir el error de la desviación de la luz y llevarla a las celdas fotovoltaicas de multi-unión de la manera más efectiva posibles, evitando errores de alineación que puedan presentarse. En la parte trasera de la unidad de potencia están las entradas para el sistema de enfriamiento, el cual consiste en un flujo de agua destilada, la cual opera a razón de 10 litros por minuto, con una caída de presión de 1500 Pa, el sistema de enfriamiento retira 1200 W (opcional) a temperaturas $T \leq 80^{\circ}\text{C}$, y tiene un peso de 3kg (*imagen 3.1*)

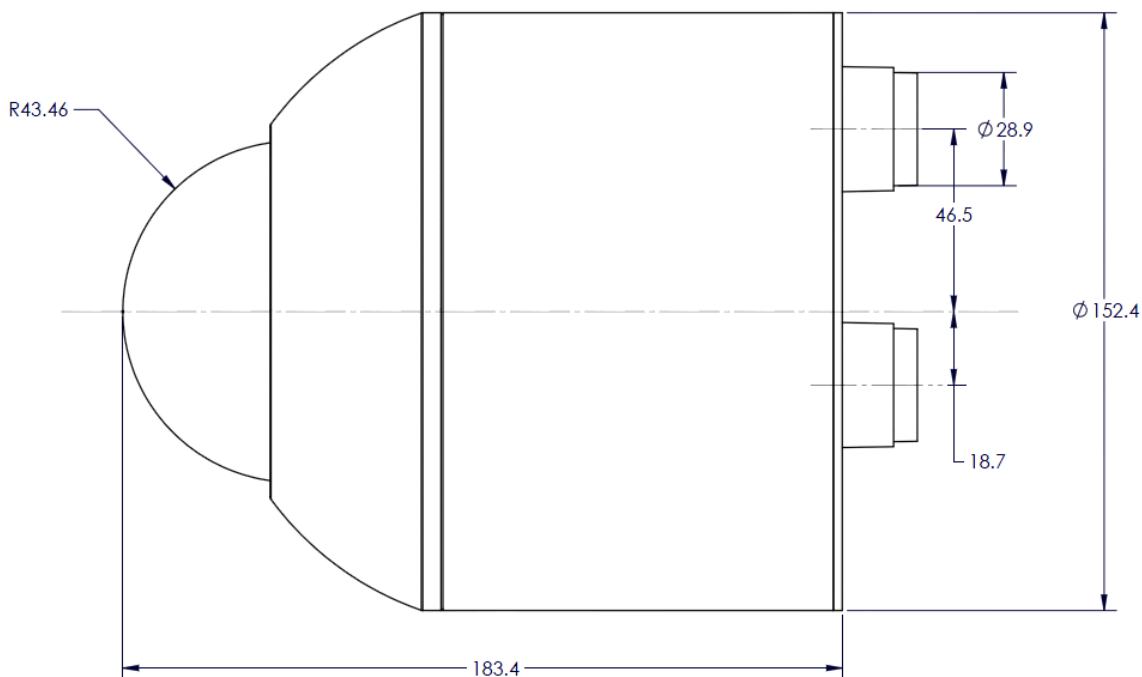


Imagen 3.1: diagrama de la unidad de potencia.(2014)

La unidad de potencia tiene en su interior las celdas fotovoltaicas de alta eficiencia de multi-unión, las cuales tienen la ventaja de ser intercambiables, esto es uno de las ventajas más grandes que posee el equipo en general, debido a que a medida de cómo va avanzando la tecnología año con año que se fabrican celdas cada vez más eficientes hace posible intercambiar una sola parte del equipo, mientras que el sistema de rastreo, el sistema de enfriamiento y el resto de la estructura sigue siendo el mismo.

Según la ficha de datos, la unidad de potencia cuenta con las siguientes especificaciones: $V_{p\ max}= 34V$, $I_{p\ max}= 23.5\ A$, Power Output= $800W_{DC}$, con un 32% de eficiencia del sistema.

3.2 SOBRE LAS CELDAS FOTOVOLTAICAS:

Existen muchos tipos de celdas fotovoltaicas, pero se pueden dividir en 4 principales categorías: las de silicio, que son las más comunes y las más comerciales actualmente, este tipo de celdas se utilizan en las calculadoras, en los paneles instalados en las viviendas y tienen una eficiencia de 25 % aproximadamente según NREL (laboratory, 2015) ; las celdas solares de película fina, las celdas solares de nueva tecnología en las que se incluyen las solares orgánicas; y las celdas solares de multi-unión, que son las que tienen mejor aprovechamiento por encima de prácticamente cualquier otra celda solar. *“En la actualidad, los mejores ejemplos de laboratorio de las células solares de silicio tradicionales tienen una eficiencia de alrededor de 25%, mientras que los ejemplos de laboratorio de células multi-unión han demostrado un rendimiento por encima del 40%.”* (laboratory, 2015)

Dentro de la unidad de potencia se encuentran las celdas de multi-unión, dichas celdas se encuentran en un arreglo especialmente diseñado para captar y absorber la luz de la manera más uniformemente posible.

Las celdas utilizadas en este quipo son celdas de triple unión, esto quiere decir que son tres celdas unidas tipo tándem (es decir, una encima de la otra: celda superior, media e inferior) (*Imagen 3.2*) cada una a su vez conformada de varias capas de diferentes materiales, las celdas se encuentran divididas entre sí mediante una capa de unión. La función de las celdas es la de absorber una porción diferente del espectro que les llega, al tener 3 celdas de diferentes elementos el propósito es precisamente aumentar el rango de absorción, con ello lograr obtener más eficiencia.

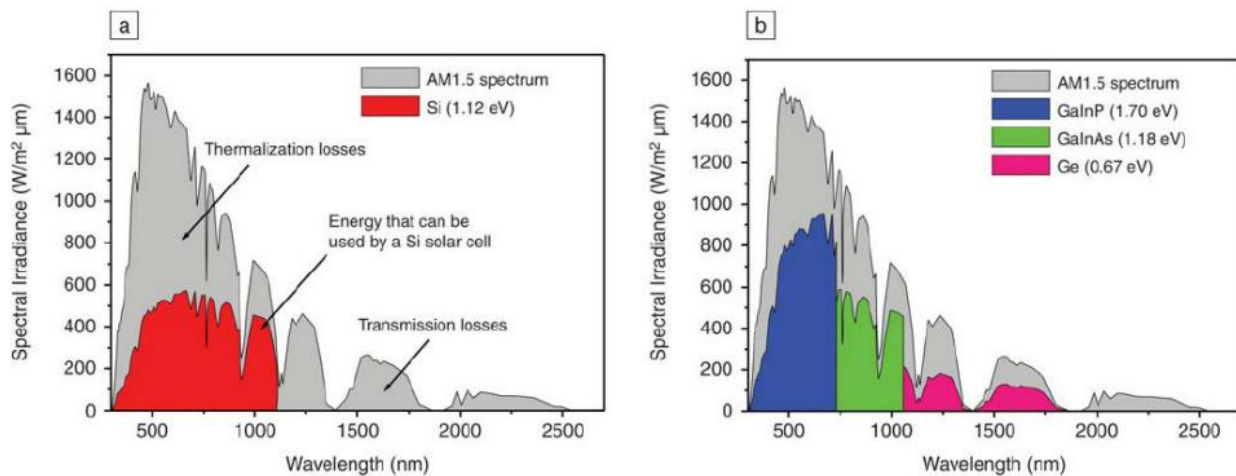


Imagen 3.2: (a) Rango de absorción de las celdas de silicio, (b) rango de absorción dentro del espectro total de emisión por tipo de celda.(potential, 2007)

Estas celdas están conformadas por distintas capas (alrededor de 15 capas) las cuales están conformadas por distintos tipos de materiales.

La celda multi-unión está constituida de la siguiente manera en orden descendente:

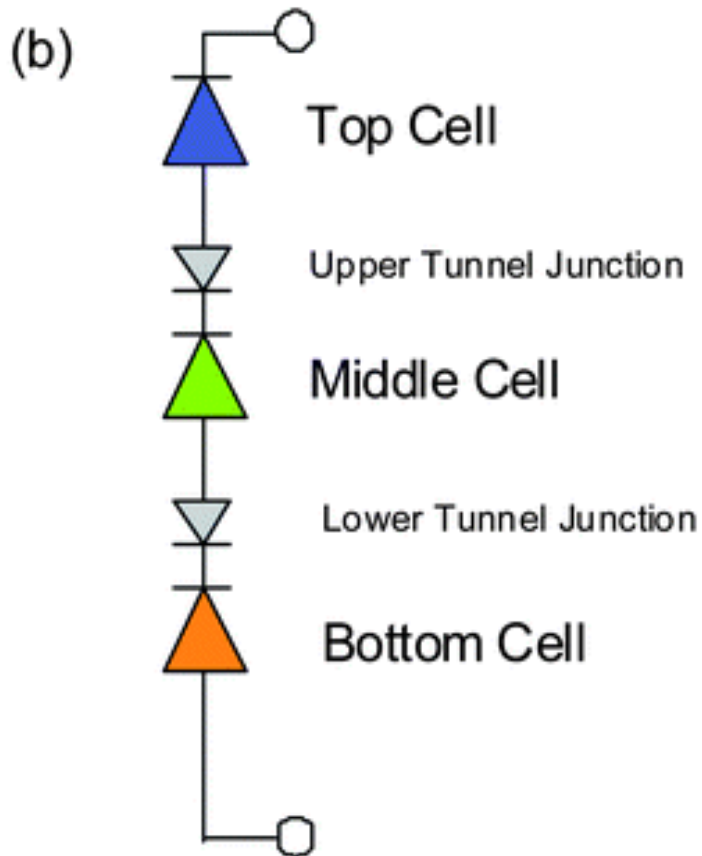
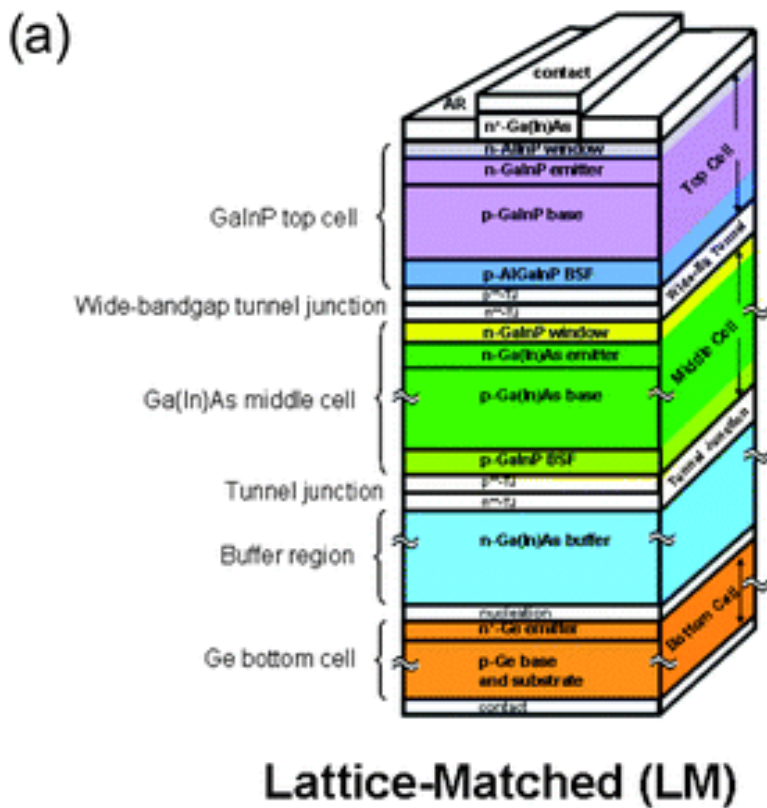


Imagen 3.3: Visualización arreglo de los materiales de las distintas capas que conforman cada celda. (Sherif, 2006)

Capa superior o ARC (*antireflecting coating* por sus siglas en inglés) es un recubrimiento anti reflejante; en conjunto con ésta se encuentra el contacto superior metálico (hecho de aluminio), el cual permite conectar dichas celdas entre si.

Celda superior. Está conformada por seis capas y de la combinación de 3 elementos que son Indio (In), Galio (Ga) Fósforo (P) de la siguiente manera:

Ventana: n'-AlInP (Aluminio, Indio y Fósforo)

Emisor: n-GaInP (Galio, Indio, Fósforo)

Base: p-GaInP (Galio, Indio, Fósforo)

Capa superficial posterior: p'-GAlnP (Galio, Indio, Fósforo)

Capa barrera: p'-AlGaInP (Aluminio, Galio, Indio, Fósforo)

Capa sin impurezas: GaInP (Galio, Indio, Fósforo)

Primera capa de unión. Su función es separar la celda superior de la intermedia y está compuesta de 2 capas:

p^{''}-AlGaAs (Aluminio, Galio, Arsénico)

n^{''}.GaAs(Galio, Arsénico)

Celda intermedia. Conformada en su totalidad de Aluminio (Al), Galio (Ga), Indio (In), Fósforo (P) y Arsénico (As), un elemento más que la celda superior y formada también de 6 capas:

Capa barrera: n[']AlGaInP (Aluminio, Galio, Indio, Fósforo) sir

Emisor: n-GaInAs (Galio, Indio, Arsénico)

Capa sin impurezas: GaInAs (Galio, Indio, Arsénico)

Base: p-GaInAs

Capa superficial posterior: p[']-AlGaAs (Aluminio, Galio, Arsénico)

Capa Barrera: p[']-AlGaInP (Aluminio, Galio, Indio, Fósforo)

Segunda capa de unión. Separa la celda intermedia de la inferior, formada por 2 capas:

p^{''}-AlGaAs (Aluminio, Galio, Arsénico)

n^{''}-GaAs (Galio, Arsénico)

Celda inferior. Formada de 3 elementos que son Galio (Ga), Arsénico (As) principalmente Germanio (Ge) y 5 capas:

Capa amortiguadora: n[']GaAs (Galio, Asénico)

Capa de barrera y nucleación: n^{''}

Emisor: n[']-Ge (Germanio)...

Substrato (100): P-Ge (Germanio)

Contacto metálico inferior. Última capa que conforma la celda fotovoltaica.

Este tipo de celdas ha demostrado ser la mejor opción para este sistema de concentración solar, debido a sus altos potenciales de conversión por encima de cualquier otro tipo de celda. En la siguiente grafica se comparan los distintos tipos de celdas en cuanto a su eficiencia vs el año en el cual fueron fabricadas, aquí nos podemos dar cuenta de la ventaja que tienen las celdas de multi-unión las cuales llegan hasta un 46% de eficiencia, mientras que las que les siguen que son las celdas de silicio cristalino que llegan hasta un 27.6% de eficiencia, esto es casi un 20% más de eficiencia entre un tipo de celda y otro, lo que hace evidente la selección del uso de celdas de multi-unión por encima de cualquier otra celda.

Best Research-Cell Efficiencies

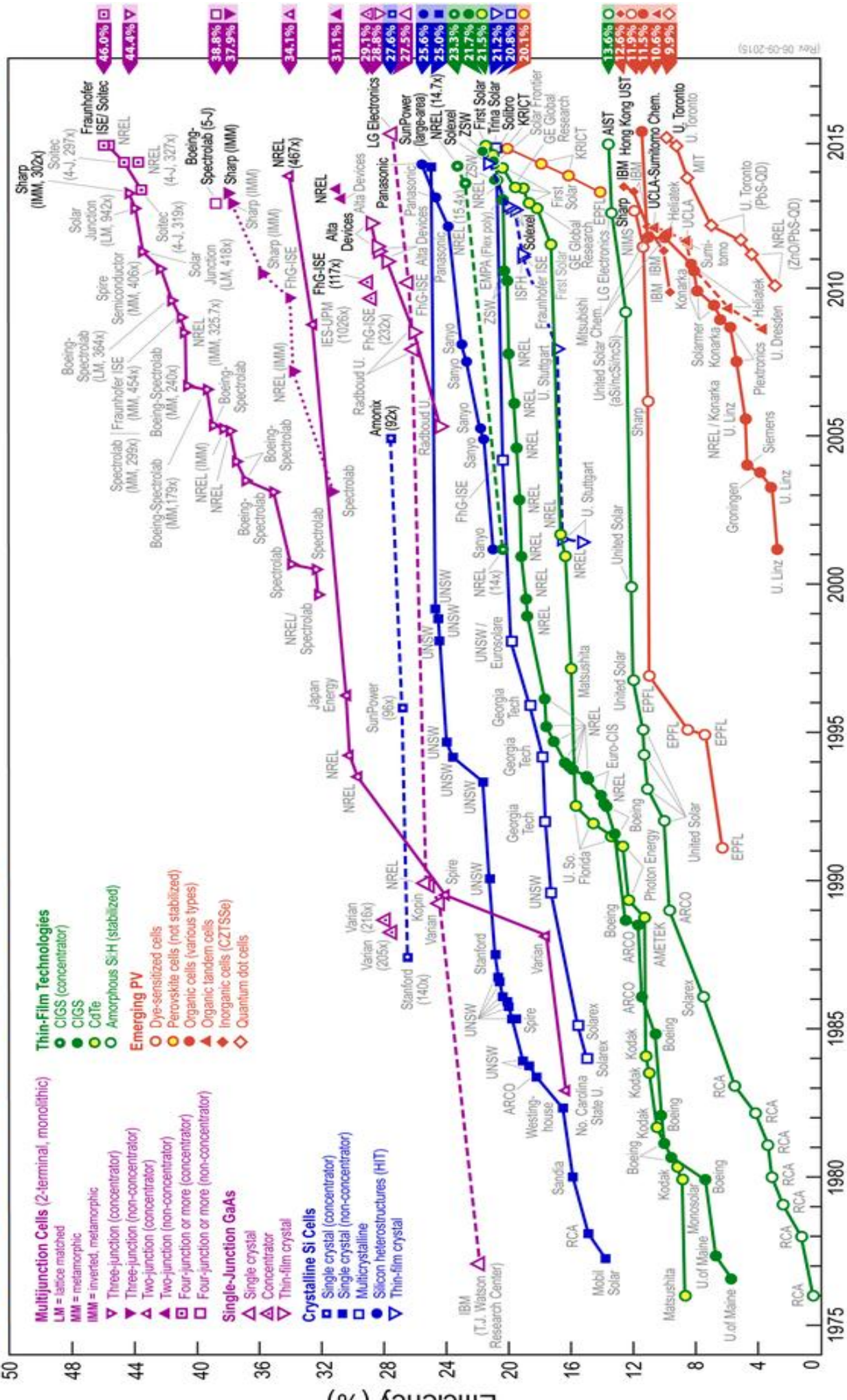


Imagen 3.4: En esta grafica se presentan las distintas eficiencias para cada tipo de celda solar contra el año que se fabricaron según el laboratorio de energías renovables NREL (National Renewable Energy Laboratory (laboratory, 2015))

CAPÍTULO 4

4.1 ENSAMBLADO DE TODO EL EQUIPO:

El equipo consta de 3 partes principales y cada una con su subsecuente cantidad de partes, las cuales son: Estructura metálica, estructura mecánica y los módulos.



Imagen 4.1: Equipo de concentración solar (estructura metálica, mecánica y facetas)

4.2 ESTRUCTURA METÁLICA:

La estructura metálica es la que sostiene todo el sistema, consta de una base que sostiene el cuerpo de la estructura fijamente en el suelo.

Este es un tubo central de 6 pulgadas de diámetro por 68 pulgadas de longitud. En el cual van montados los soportes para las facetas concentradoras que son un par de tubos cuadrangulares de 2 por 2 pulgadas por 115 pulgadas de longitud sujetos en sus extremos por dos PTR de 2 por 4 pulgadas por 34.5 pulgadas de longitud, y en el centro están sujetas a una base móvil accionada por dos motores, los soportes para los motores que mueven el equipo se encuentran unidos al cuerpo de la estructura , así como también un asta de 4 por 4 pulgadas por 1.5 metros de longitud, que lleva los soportes para la unidad de potencia.

4.3 ESTRUCTURA MECÁNICA:

La estructura mecánica consta de dos motores, los cuales se encargan de mover las facetas, esto lo logran con ayuda de un software de seguimiento solar que rastrea el movimiento del sol para poder enfocar de la manera más precisa posible la energía solar hacia la unidad de potencia.

Estos motores van acoplados a unos “rotores” los cuales se encargan de re direccionar las facetas en dos ejes, eje azimutal (*Imagen 4.2*) y en el eje de elevación. (*Imagen 4.3*)



Imagen 4.2: Motor y rotor encargados de girar el equipo en el eje azimutal.



Imagen 4.3: Motor encargado de mover el equipo en el eje de elevación.

4.4 MÓDULOS:

Se le denomina Módulo al conjunto de faceta con unidad de potencia.

Este equipo en particular consta de 2 módulos situados uno enseguida del otro, ambos módulos van montados en la misma estructura y son dirigidos por los mismos motores encargados de seguir al sol.



Imagen 4.4: Generador de 2 Módulos REhnu con montaje en eje dual. El generador está diseñado para su uso en la azotea de un edificio comercial, así como en el suelo. Para minimizar la carga del viento, el eje de elevación se compensa de manera que los espejos se acercan a la azotea en la posición de estiba (en el punto del cenit). Una ruptura de viento colocado alrededor de una serie de seguidores reduce aún más la carga de viento. Para máximo rendimiento energético para un área de terreno limitado, los dos módulos de espejos están montados juntos para minimizar el sombreado entre generadores.(2014)

Como se describió con anterioridad en el capítulo 3, la unidad de potencia es la parte del equipo que se encuentra en la parte superior a una altura de 1.5 metros de las facetas (en el punto focal), en ella van montadas las celdas de multi-uni3n y va acoplado el sistema de enfriamiento.



Imagen 4.5: Unidad de potencia utilizada en el equipo de concentración solar.

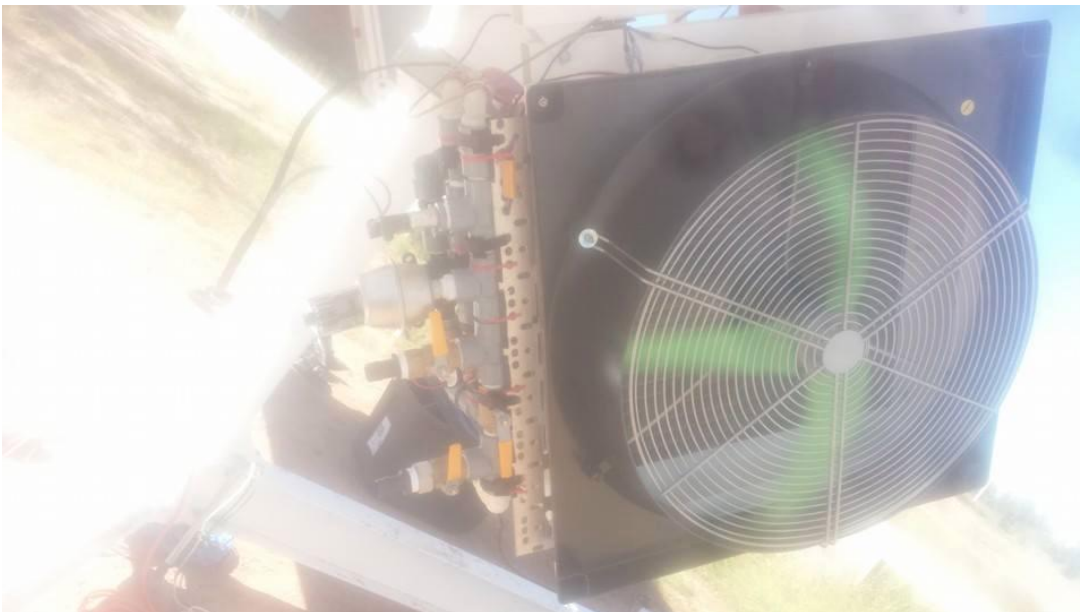


Imagen 4.6: visualización del sistema de enfriamiento montado en la estructura.

Una propuesta de diseño es poner 8 módulos por base en conjunto con sus 2 ejes móviles, esto es para disminuir costos de instalación y de operación, ya que es más viable trabajar con un sistema que tenga varios módulos y un solo sistema de seguimiento solar.

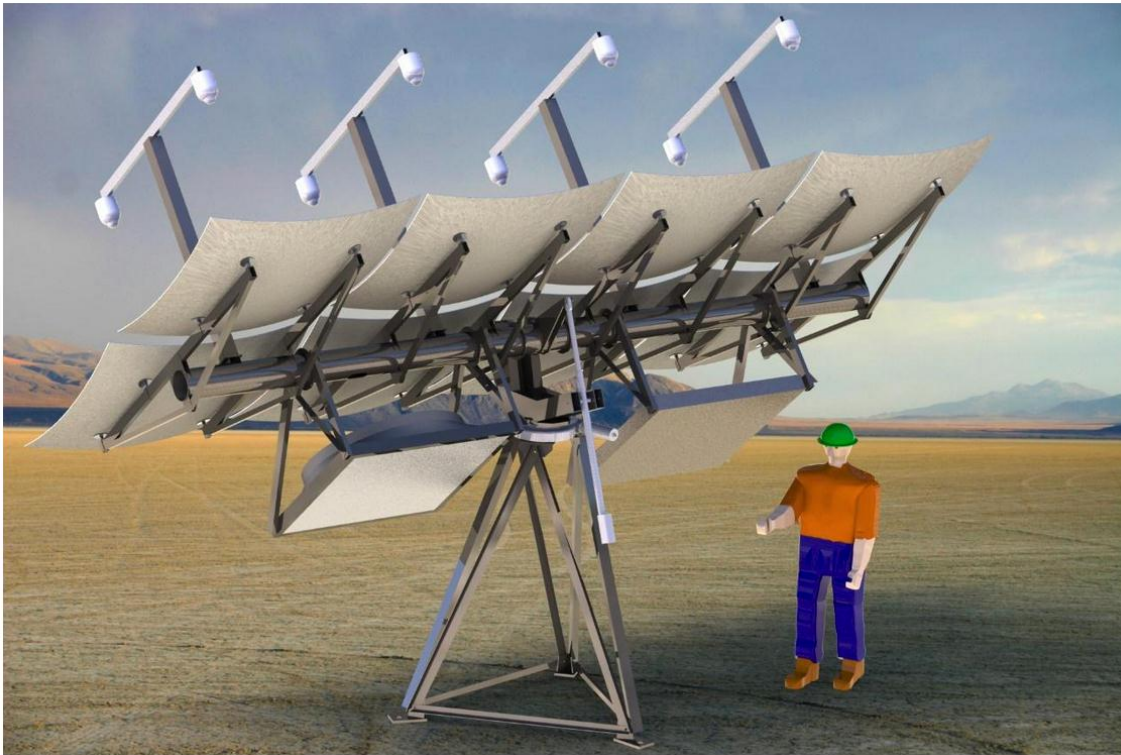


Imagen 4.7: La Unidad de REhnu de 8 Módulos está pensado tanto para las generaciones de electricidad a gran escala (empresas de servicios públicos) y para aplicaciones de menor escala donde la producción térmica también puede ser útil. Sólo para la generación de energía eléctrica, la eficiencia de conversión se demuestra actualmente en > 31 %, y se espera que alcance el 40 % en 2020, ya que se mejora la eficiencia de células multi-unión. En cuanto a la salida eléctrica y térmica combinada, la eficiencia de conversión de energía solar es de ~ 80 %.(2014)

CAPÍTULO 5

OPERACIÓN DEL EQUIPO:

Para utilizar el equipo es necesario conocer sus partes, es por eso que se ha descrito cada una de ellas, todas las partes están interconectadas y se operan automáticamente desde una computadora haciendo uso de un programa diseñado en un software llamado “*labview*”, en este preciso caso se utiliza la versión 2009, Dentro de este software encontramos distintas características y funciones, con las cuales nos permiten hacer un uso correcto del equipo y visualizar de manera más fácil los datos de interés, así como reposicionar el equipo en caso de cualquier falla o accidente como medio de seguridad. (Imagen 5.1)

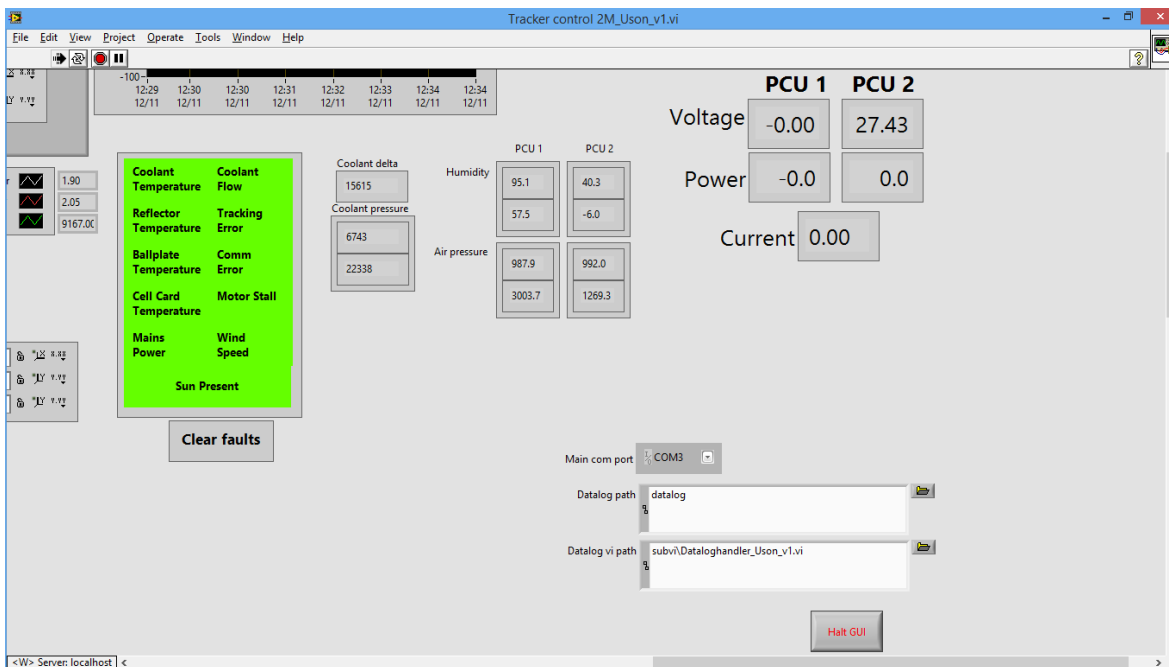


Imagen 5.1: Programa utilizado para operar el equipo de concentración solar haciendo uso del software de “*labview 2009*”.

Es necesario seguir una serie de pasos para encender el equipo, luego de esta serie de pasos el equipo debería funcionar de manera automática desde la computadora a la que está conectada haciendo uso del software antes mencionado.

Lo primero es correr el software para labview 2009 en el equipo de donde se va a operar, luego de correr el programa y realizar las conexiones apropiadas (los cables a los puertos COM y USB correspondientes se procede a encender el equipo de la siguiente manera:

1.- Primero se necesita prender ambos apagadores manualmente en la caja del equipo. (Imagen 5.2)

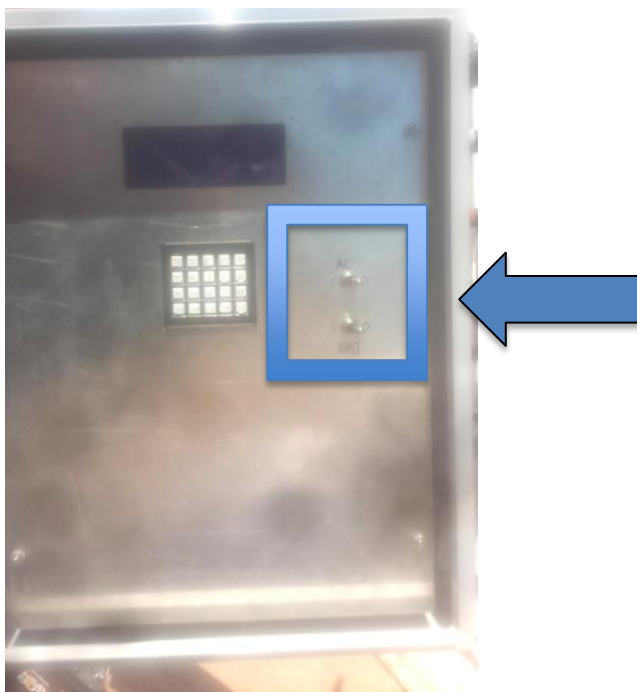


Imagen 5.2: Apagadores ubicados dentro de la caja del equipo.

2.- El seguidor deberá comenzar a moverse en contra de las manecillas del reloj en el eje azimutal, y hacia arriba en dirección de la elevación hasta conseguir llegar a un sensor de referencia que tiene el equipo. Esto es la rutina de calibración.

3.- Ya terminada la calibración el equipo se moverá hacia la posición de “parking” que son 45 grados en el eje azimutal y 45 grados en elevación. (Imagen 5.3)



Imagen 5.3: Equipo en posición de “parking”.

4.- En el programa de labview hay que asegurarse de establecer un numero de 2.0 en las dos casillas que se llaman “pointing offset”, esto es el error que hay que corregir manualmente, este dato es específico para cada módulo instalado, ya que es una corrección fina a los ejes que se le da de manera manual. (Imagen 5.4)

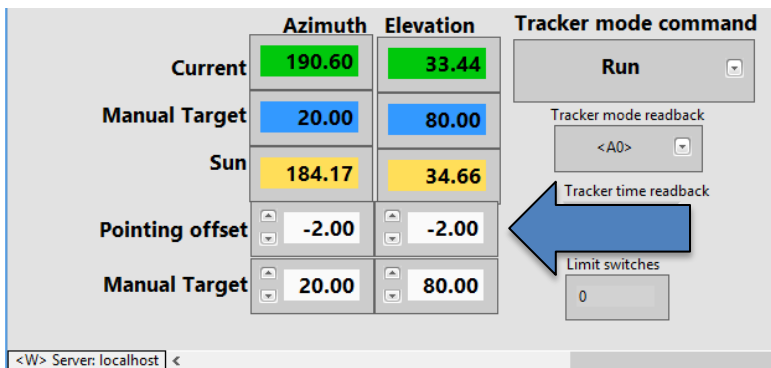


Imagen 5.4: Casillas de “pointing offset” que deben ser establecidas.

5.- Para comenzar el rastreo, se debe seleccionar la opción "Run" que se encuentra en la opción "Tracker mode command". (Imagen 5.5)

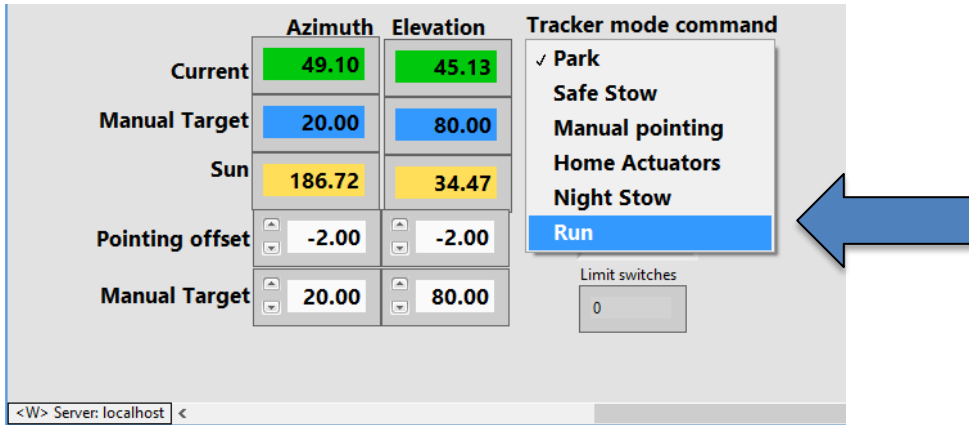


Imagen 5.5: Opción "Run" dentro del "Tracker mode command".

6.- La grafica superior izquierda muestra las temperaturas. La generación eléctrica de unidad de potencia se llama "PCU 2". Es muy importante estar al pendiente de esta temperatura. Se recomienda dejar de seguir el sol en caso de que cualquiera de estas lleguen a temperaturas superiores a los 90°C. (Imagen 5.6)

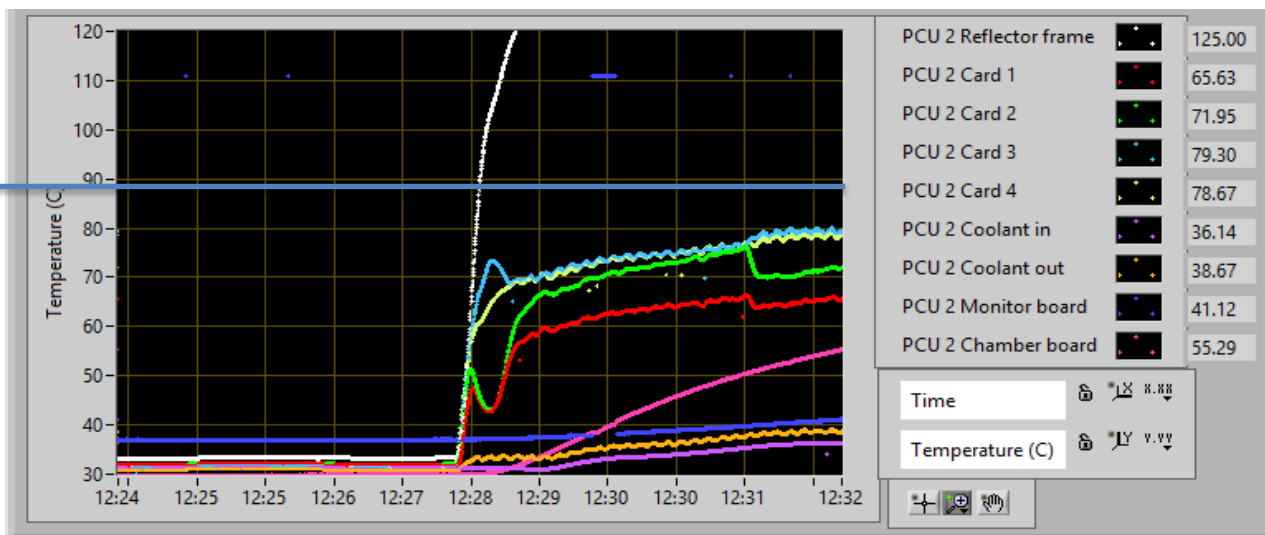


Imagen 5.6: Graficas en tiempo real de las temperaturas. Aquí se señala la temperatura a la cual se debe estar pendiente que no suba (90°C).

7.- La forma más rápida para dejar de seguir el sol el cambiar el rastreador de la posición "tracker mode" a la posición de "park". (Imagen 5.7)

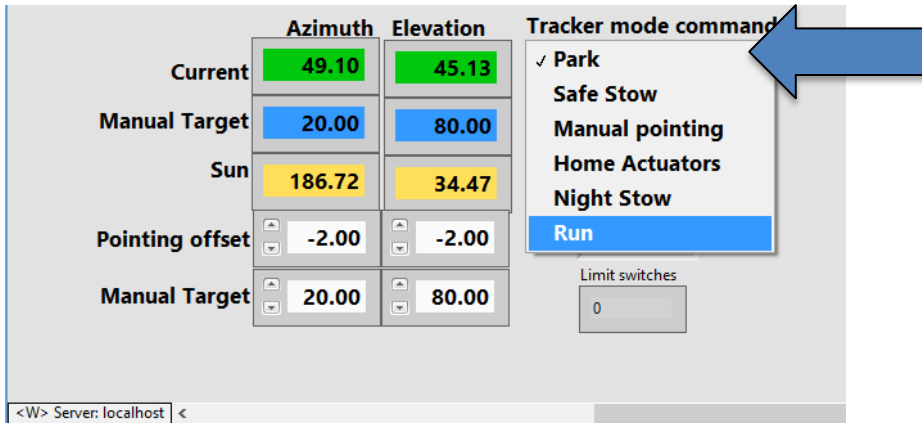


Imagen 5.7: Opción "Park" en el "Tracker mode command".

8.- Se puede especificar una posición de manera manual al cambiar la posición de "tracker mode" a la posición "Manual pointing" y programando las coordenadas en el eje azimutal y de elevación el "Manual Target". (Imagen 5.8)

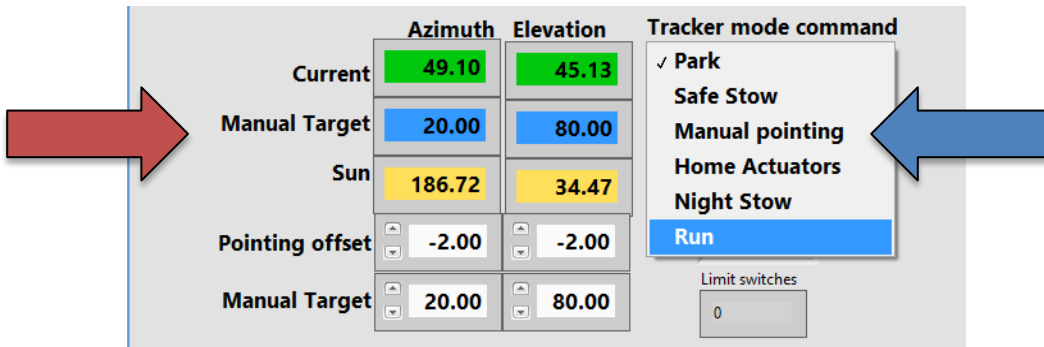


Imagen 5.8: Opción "Manual pointing" (azul) en "Tracker mode command" y la opción de "Manual target" (rojo).

Después de realizar este procedimiento el equipo estará en funcionamiento y de manera automática seguirá al sol y concentrará la energía en la unidad de potencia, la cual generará energía eléctrica, la cual es necesaria consumir o almacenar.

En este caso se realizó un circuito de la siguiente manera:

La unidad de potencia se conectó a un par de baterías para almacenar la energía (Imagen 5.9). A las cuales se les conectó un par de resistencias que sirven para consumir la energía almacenada en dichas baterías y evitar una sobrecarga de las mismas (Imagen 5.10)



Imagen 5.9: Conexión a un par de baterías para almacenar la energía producida por el equipo.



Imagen 5.10: Circuito completo de la unidad de potencia en conexión con las baterías y las resistencias.

Es necesario mencionar que es necesario consumir la energía que se está produciendo dentro de la unidad de potencia, ya que de lo contrario, la energía no utilizada se transforma en calor y si ese calor no es retirado el equipo puede sufrir daños. Es por esto que se realizó el arreglo de baterías para poder consumir la energía y de igual manera a las baterías se le conectaron las resistencias para evitar una sobrecarga de las baterías y poder drenar la energía para poder realizar nuevas corridas posteriormente.

Al comenzar a utilizar el equipo se puede notar en el software como las temperaturas comienzan a elevarse en la gráfica a medida que el error de alineación con el sol disminuye (Imagen 5.11) y de igual manera al apagar el equipo la temperatura disminuye mientras el error de alineación con el sol aumenta (Imagen 5.12)

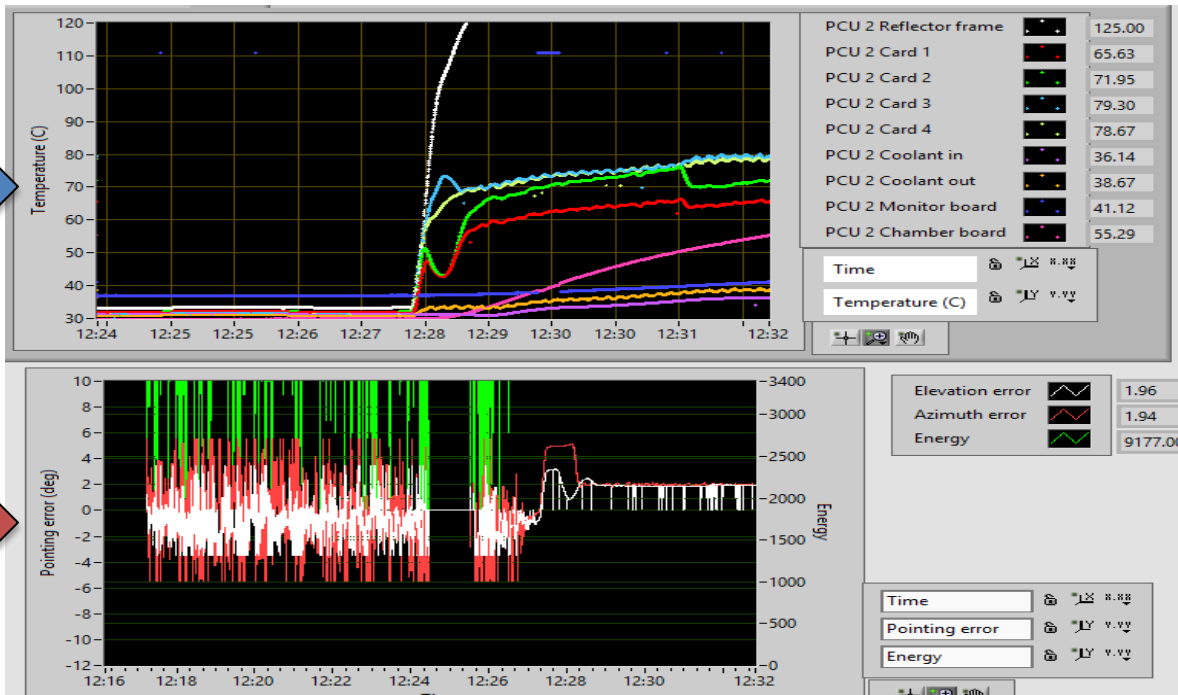


Imagen 5.11: Grafica de temperatura aumentando (azul) a medida que el error de alineación solar "Pointing error" disminuye (Rojo)

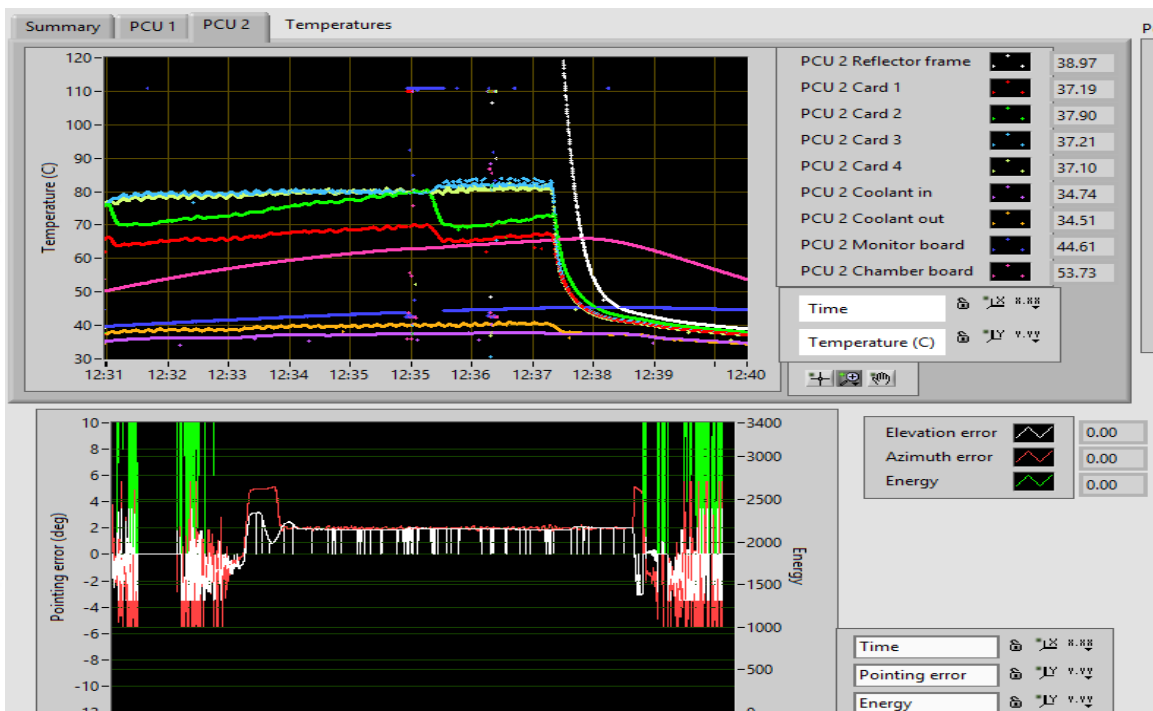


Imagen 5.12: Grafica de temperatura disminuyendo (azul) a medida que el error de alineación solar "Pointing error" aumenta (Rojo)

El método de rastreo funciona primero con un algoritmo computacional, el cual se encarga de mover el equipo y llevarlo a una posición lo más cercano posible a donde se desea llegar, de ahí un sensor en circuito cerrado es el que se encarga de realizar la calibración más fina y el rastreo del sol posteriormente.

Este software utilizado se encuentra en etapa experimental, por lo que tiene actualizaciones constantemente para mejorar su uso. La versión más nueva puede captar y guardar las variables.

CONCLUSIONES:

En este trabajo se presenta la descripción de un prototipo de generación de energía eléctrica a partir de la energía solar concentrada. El equipo contiene partes principales que fueron estudiadas, a saber; el arreglo óptico, las unidades de potencia eléctrica, la estructura de soporte y de seguimiento solar, el sistema de enfriamiento de las fotoceldas y el sistema de control de operación. Cada parte fue descrita a detalle en la sección correspondiente dentro de este trabajo.

En general se puede concluir que el equipo funciona bien pero se requiere hacer mayores desarrollos para salir al mercado.

Se detectaron problemas de alineación y de enfriamiento que deberán ser resueltas para asegurar su buen funcionamiento para largos periodos.

El software de control es sencillo de operar y contiene la mayoría de los parámetros importantes para optimizar su potencia eléctrica de salida.

Mayores esfuerzos se requieren en mejorar el sistema de enfriamiento ya que un riesgo grande es el que las celdas sean fundidas por las altas temperaturas si el retiro de calor no es suficiente.

REFERENCIAS:

2014. REhnu Mirror Module. *In*: REHNU (ed.).
- ANGEL, J. R. P. 2011. Concentrating photovoltaics inspired by telescope design. [Online] Available: <https://www.youtube.com/watch?v=xomiZtZHy5E>
- CHRISTIAN DÁVILA-PERALTA, R. C.-L., RAFAEL GARCÍA-GUTIÉRREZ AND RICARDO & RODRÍGUEZ-CARVAJAL 2015. Design of a Linear Actuator Driven Solar Tracker for High Concentration Photovoltaics Technologies. *Journal of Clean Energy Technologies*.
- COUGHENOUR, B. M., STALCUP, T., WHEELWRIGHT, B., GEARY, A., HAMMER, K. & ANGEL, R. 2014. Dish-based high concentration PV system with Köhler optics. *Optics Express*, 22, A211-A224.
- ELECTRICIDAD, C. F. E. 2014. Informe Anual 2014. Available: *mso-highlight:lightgrey">*<http://www.cfe.gob.mx/inversionistas/StyleLibrary/assets/pdf/InformeAnual.pdf>.
- LABORATORY, N. R. E. 2015. NREL [Online]. Available: <http://www.nrel.gov/> [Accessed noviembre-2015 2015].
- MAIKEL HERNANDEZ, A. C., PABLO & BENÍTEZA, J. C. M. 2008. *HIGH-PERFORMANCE KOHLER CONCENTRATORS WITH UNIFORM IRRADIANCE ON SOLAR CELL*. 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Valencia, Spain.
- Masafumi Yamaguchi, Tatsuya Takamoto, Kenji Araki, Nicholas Ekins-Daukes . 2007. High-efficiency multi-junction solar cells: current status and future potential.*
- SHERIF, R. A. E. A. 2006. *The multijunction solar cell: an enabler to lower cost electricity for concentrating photovoltaic systems* [Online]. Proc. Solar Power Conference. [Accessed].
- WHEELWRIGHT, BRIAN. 2011. Secondary Concentrators. [Online] Available: <https://www.youtube.com/watch?v=pmqeWy7L3Dg>