

MODELAMIENTO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO DE ALTA EFICIENCIA Y ANÁLISIS DE PRODUCCIÓN ENERGÉTICA BAJO DIFERENTES CONDICIONES CLIMÁTICAS ESTACIONARIAS

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
MODELAMIENTO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO DE ALTA
EFICIENCIA Y ANÁLISIS DE PRODUCCIÓN ENERGÉTICA BAJO
DIFERENTES CONDICIONES CLIMÁTICAS ESTACIONARIAS**

**AUTOR:
VÍCTOR FABRICIO AYALA VILLACIS**

**DIRECTOR:
CRISTIAN CRISTÓBAL CUJI CUJI**

Quito, febrero de 2018

Víctor Fabricio Ayala Villacis

MODELAMIENTO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO DE ALTA EFICIENCIA Y ANÁLISIS DE PRODUCCIÓN ENERGÉTICA BAJO DIFERENTES CONDICIONES CLIMÁTICAS ESTACIONARIAS

Universidad Politécnica Salesiana
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña historia e información de contacto:



Víctor Fabricio Ayala Villacis (Y'1991-M'03). Realizó sus estudios secundarios en el Instituto Tecnológico Sucre, se graduó de Técnico Industrial en Electrónica. Egresado de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en Modelamiento de un Sistema Fotovoltaico de Alta Eficiencia y Análisis de Producción Energética Bajo Diferentes Condiciones Climáticas Estacionarias
vayalav@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Cristian Cristóbal Cuji Cuji (Y'1986-SM'03). Se graduó de Ingeniero Electrónico en la Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador en 2014 y Master en Energía, Facultad de Ciencias Físicas en la Universidad Complutense de Madrid – España en 2015. Actualmente es profesor e investigador en la Universidad Politécnica Salesiana - Quito Ecuador.
ccuji@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

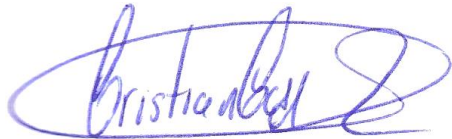
Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS
RESERVADOS
©2018
Universidad
Politécnica
Salesiana
QUITO-
ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo, Cristian Cristóbal Cuji Cuji declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación MODELAMIENTO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO DE ALTA EFICIENCIA Y ANÁLISIS DE PRODUCCIÓN ENERGÉTICA BAJO DIFERENTES CONDICIONES CLIMÁTICAS ESTACIONARIAS, realizado por Víctor Fabricio Ayala Villacis, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, 01 de febrero de 2018



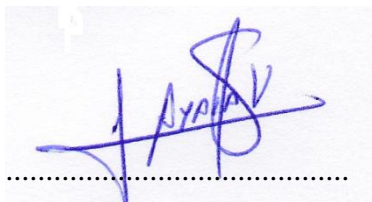
.....
Cristian Cristóbal Cuji Cuji

Cédula de identidad: 171800222-1

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Víctor Fabricio Ayala Villacis, con documento de identificación N° 171965761-9, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación titulado: “MODELAMIENTO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO DE ALTA EFICIENCIA Y ANÁLISIS DE PRODUCCIÓN ENERGÉTICA BAJO DIFERENTES CONDICIONES CLIMÁTICAS ESTACIONARIAS ”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Nombre: Víctor Fabricio Ayala Villacis

Cédula: 171965761-9

Fecha: febrero 2018

ÍNDICE GENERAL

Resumen.....	1
Abstract.....	1
1. Introducción	3
2. Sistemas Solares de Alta Concentración.....	4
2.1 Simulación de CSP	4
2.2 Mejora de la eficiencia de sistemas HCPV	5
2.3 Tiempo de retorno de la energía y evaluación del ciclo de vida.....	6
2.4 Producción energética en centrales de alta concentración y eficiencia	8
3. Datos de Laboratorio.....	9
4. Formulación del Problema	10
5. Análisis de Resultados	12
6. Conclusiones	16
7. Referencias.....	17
7.1 Estado del Arte.....	20

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Curva I-V condiciones generales	4
Figura 2: Curva I/V variación según temperatura.....	5
Figura 3: Sistema de celda, concentrador y enfriamiento para mejora de la eficiencia	6
Figura 4: Ciclo de vida de una central convencional y de alta concentración y sus efectos para EPBT.....	7
Figura 5: Comparativa producción paneles alta eficiencia vs convencional	7
Figura 6: Prototipo de laboratorio de HCPV con seguimiento solar	9
Figura 7: Diagrama equivalente adquisición de datos.	10
Figura 8: Corriente en función del tiempo	12
Figura 9: Tensión en función del tiempo	12
Figura 10: Temperatura en función del tiempo.....	13
Figura 11: Potencia en función del tiempo	13
Figura 12: Potencia sistema de alta concentración a baja temperatura.....	13
Figura 13: Corriente en sistema de alta concentración a baja temperatura.....	14
Figura 14: Potencia teórica diaria en condiciones NOC	14
Figura 15: Producción en función de condición climática estacionaria.....	14
Figura 16: Corriente en función de condición climática estacionaria.....	15
Figura 17: Ubicación, condición climática y producción por locación	15
Figura 18: Producción anual esperada en el mejor y peor caso	16

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características Técnicas Panel de alta eficiencia.....	11
Tabla 2: Producción mensual máxima esperada	15
Tabla 3: Matriz de estado del arte	21
Tabla 4: Resumen e indicadores del estado del arte	22

MODELAMIENTO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO DE ALTA EFICIENCIA Y ANÁLISIS DE PRODUCCIÓN ENERGÉTICA BAJO DIFERENTES CONDICIONES CLIMÁTICAS ESTACIONARIAS

Resumen

Este documento presenta los resultados de experimentaciones ejecutadas para determinar el comportamiento de una central fotovoltaica de alta concentración y alta eficiencia (HCPV). Se analizan las ventajas que supone el uso de esta tecnología que aprovecha recursos renovables y los mecanismos que permitirán incrementar la eficiencia y la potencia obtenida.

El modelo en estudio pretende tener un bajo tiempo de retorno de la energía (EPBT), una medida que además permite reconocer los efectos positivos y negativos medioambientales de la inclusión de un HCPV. El HCPV se considera con un sistema de enfriamiento natural y se esperan condiciones altamente favorables de irradiancia. Esto hace imprescindible el análisis de las condiciones climáticas estacionarias para poder tener una aproximación adecuada del aumento de la potencialidad del HCPV propuesto.

Se muestran los resultados de pruebas de laboratorio que fueron ejecutadas bajo diversas condiciones estacionarias, con ello se puede denotar las diferencias entre un panel convencional y otro de tipo HCPV.

El objetivo de tales pruebas corresponde al conocimiento de las condiciones más favorables para la implantación de un sistema de generación, según las condiciones

Abstract

This paper presents the results of executed tests that allow to understand the performance of a photovoltaic power plant. This research is focused on high-concentrated photovoltaic plants (HCPV). Firstly, they have analyzed the advantages of employing this renewable technology. Moreover, it has been studied the ways to improve the efficiency and power output of HCPV systems.

The proposed model is intended to have low energy payback time (EPBT). The EPBT allow to measure both positive and negative environmental effects of HCPV. The tested model has natural cooling. The most favorable irradiance conditions are expected. The analysis of stationary weather conditions became so important. This analysis will allow a fair approach of increased potential from proposed solar power system.

The researchers present the results of laboratory test. These tests were applied under different stationary weather conditions. The tests have shown the differences and improvements of an HCPV system versus a conventional PV system.

After all these tests, it is possible to find an acceptable location, after they understand the most favorable conditions for generation based on photovoltaic effect and concentration. The present study analyzes the variations of current and voltage when temperature varies. This is a

estacionarias y modelos típicos de comportamiento de una central fotovoltaica. Se analizan los efectos de las variaciones de corriente y tensión en función de variaciones de la temperatura, parámetro clave para el aumento de la potencia de salida. También se hace un análisis del recurso energético disponible, obteniendo estimaciones de producción diaria y anual. Se consideran ubicaciones tomadas aleatoriamente dentro de Ecuador.

Palabras Clave: Alta concentración fotovoltaica, enfriamiento natural, punto máxima potencia, medición de temperatura.

fundamental parameter to achieve raising on power output from HCPV. They also made an analysis of the power resources available on different locations. They have estimated production of HCPV both daily and annual basis. This analysis takes account of some random locations chosen within Ecuador.

Keywords: High concentrator photovoltaic, natural cooling, maximum power point, temperature measurement.

1. Introducción

La energía solar es una de las energías con mayor potencial para la generación de energía eléctrica, debido a ser renovable o inagotable, esto ha sido investigado y estudiado en todo el mundo. Su potencial es necesario para suplir la demanda de energía con el aumento de la población mundial. Otro punto a considerar es que la generación se produce a nivel residencial en forma de generación distribuida, así como en centrales que forman parte del sistema de potencia [1] [2] [3] [4].

Existen dos tipos de tecnología, aquellas que aprovechan la radiación directa y los que emplean la radiación difusa. La radiación directa además puede ser concentrada si se mejora su potencialidad, con diversos tipos de tecnología que aún se encuentran en estudio, y que se muestran en [5].

Las tecnologías de aprovechamiento de la energía solar se dividen en el uso de paneles solares (PV) que directamente convierten la energía solar en energía eléctrica, o las tecnologías de concentración de potencia solar (CSP), aquellas en que los paneles son empleados para reflejar la energía lumínica que permite una concentración del calor, que permite la generación de energía eléctrica, a través de un ciclo de potencia e.g ciclo Rankine [5] [6].

Los sistemas con PV de plato plano convierten la radiación solar global (directa y difusa), aprovechando el efecto fotovoltaico, siendo siempre necesaria la medición de la irradiancia directa normal (DNI), mientras que los de tecnologías CSP emplean la radiación directa, debiendo medirse la irradiancia global horizontal (GHI) [6] [7].

A su vez los sistemas CSP se dividen según el tipo de concentrador empleado, e.g. cilindros parabólicos, platos parabólicos, lentes de Fresnel y reflectores de Fresnel; la energía puede ser concentrada en un único punto focal o en forma de línea. Los sistemas de

concentración se dividen en los de pequeña, mediana y gran escala, así como si contienen sistemas de seguimiento de la energía solar.

También se utilizan concentradores de torre solar y de disco solar con motor Stirling, tales tecnologías se profundizan en [6], [8], [9].

Los sistemas de generación por concentración de energía solar son los más prometedores para suplir las necesidades energéticas alrededor del mundo, tanto residenciales como industriales. Esto, debido al constante avance que han tenido en los últimos años. Se establece que cuenta con un costo nivelado de la energía (LCOE) que las hace bastante atractivas en el aspecto económico; particularmente si la ubicación tiene una gran exposición a la irradiación solar directa [7] [10][11].

Los sistemas de concentración suponen un avance respecto a los sistemas PV ya que implican un aumento de la eficiencia, un incremento de la potencia entregada, reducción en los costos y la posibilidad de la implantación de diversas configuraciones, existiendo así mayor versatilidad [5].

Los sistemas de concentración solar aún requieren desarrollos profundos que permitan la reducción de costos de los materiales y los sistemas involucrados para la producción de energía. Se requiere un aumento considerable de la eficiencia general de los sistemas que en los mejores casos alcanzan el 25%, según los autores de [12] [13].

Han sido propuestas diversas soluciones que deben ser probadas en laboratorio, además de ser modeladas matemáticamente, en los que se deben considerar todos los aspectos que influyen en el funcionamiento general de los sistemas HCPV [12] [13].

La modelación debe incluir una forma de predecir el rendimiento termal de los sistemas solares, y tendrá mejores resultados si se realiza un constante monitoreo de la central o de los sistemas

que están en estudio, como se plantea en [10] [14].

En lo sucesivo este documento se divide de la siguiente forma, en la sección 2 se tratan todos los temas relacionados a los sistemas de alta concentración y eficiencia de energía solar, especialmente aspectos relacionados a la mejora de la eficiencia y a las formas de medir su potencial.

En la sección 3 se establecen las condiciones propias de la experiencia de laboratorio y del modelo específico propuesto.

La sección 4 propone el análisis de las expresiones matemáticas que permiten conocer el comportamiento teórico del sistema HCPV, así como las expresiones y restricciones relacionadas a la temperatura en las que el prototipo presenta una mejora de potencia de salida obtenida.

En tanto la sección 5 muestra los resultados obtenidos y propone los resultados que se podrían obtener en condiciones dadas para la producción de energía, utilizando técnicas estadísticas dependientes de los datos de laboratorio y de modelamiento matemático. Las conclusiones son presentadas en la sección 6.

2. Sistemas Solares de Alta Concentración

Un sistema HCPV puede componerse de un sistema concentrador solar que contiene componentes ópticos, que permiten que la irradiancia sea mejor aprovechada por las celdas de tipo fotovoltaico. Para poder llevar a cabo pruebas de laboratorio y simulaciones se debe analizar el comportamiento típico de estas celdas, así como las condiciones que afectan el rendimiento de tales elementos, incluyendo los cambios de irradiancia, presencia de sombra, nubosidad, condiciones de terreno y la curva I-V que corresponde a la fabricación de cada panel[6].

2.1 Simulación de CSP

La simulación de un sistema de generación de energía solar debe considerar muchas variables para obtener resultados que sean cercanos a la realidad, esto debido a que el funcionamiento de los sistemas se ve afectado por varios aspectos, incluyendo la temperatura ambiental, la temperatura de trabajo de las celdas solares, el nivel de irradiancia al que está sometido, todo esto se puede modelar en una primera aproximación por medio de la curva de corriente-voltaje (I-V), que deberá ser modelada en función de las diversas condiciones, se conoce que normalmente un fabricante incluye en las hojas de datos esta curva para ciertas condiciones nominales, pudiendo emplearse métodos de interpolación para obtenerse curvas para las diversas condiciones a las que puede estar sometido un panel [3], [14], [15].

Se puede observar la curva I/V típica comparando un panel de alta concentración respecto a la de un panel convencional en la Figura 1, es claro el aumento de la corriente de salida de un panel de alta concentración, lo que supondrá una mejora en la potencia de salida del panel HCPV.

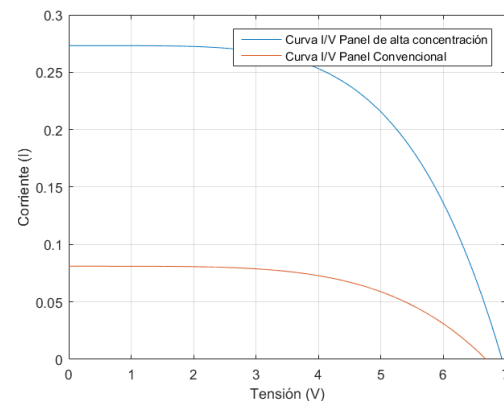


Figura 1: Curva I-V condiciones generales

Si se cuenta con una cantidad suficiente de datos del funcionamiento de una central, es posible obtener estas curvas de funcionamiento por métodos estadísticos y probabilísticos ya conocidos. En otros documentos también

se indica que se deben considerar aspectos como la existencia de sombreado, así también la reducción del rendimiento de los módulos cuando la temperatura de las celdas solares aumenta [10], [16] [17].

La afectación debida a las variaciones en la temperatura puede ser observada de mejor forma en la Figura 2, denotando decremento de corriente y tensión de salida en el panel HCPV cuando la temperatura aumenta.

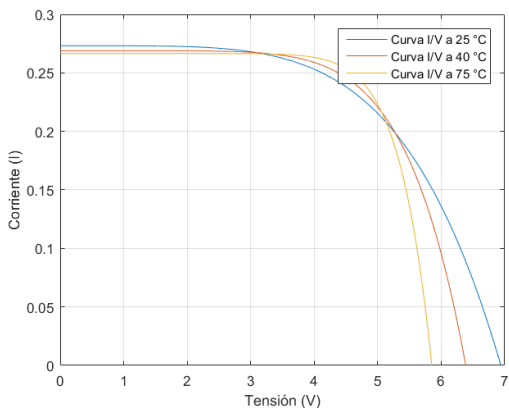


Figura 2: Curva I/V variación según temperatura

2.2 Mejora de la eficiencia de sistemas HCPV

Se debe considerar que en la actualidad los sistemas tipo HCPV son afectados por el aumento de la temperatura de trabajo de las celdas solares, dado que se comprobó que los aumentos de temperatura debido a la prolongada exposición a la radiación suponen una reducción de la eficiencia dado que el voltaje de circuito abierto de la celda se verá reducido, mientras que la corriente de cortocircuito aumenta, esto ocasiona un desplazamiento perjudicial de la máxima potencia que puede ser entregada por celda [2], [18].

Los autores de [17] y [19] han establecido además los efectos adversos y benignos que tiene la velocidad del viento, la elevación y condiciones de terreno, impurezas, polvo y suciedad, así también los índices de precipitación, por

nombrar otros, por lo cual será fundamental la elección adecuada de la ubicación de un sistema de alta concentración de energía solar, esperando se mejore la eficiencia del proceso de generación.

Dentro de las soluciones para la mejora de la eficiencia de un sistema de alta concentración se incluye el enfriamiento artificial de las celdas solares, de tal forma que la eficiencia de conversión de la celda no resulte afectada [20].

A este se le puede añadir un disipador de calor que este específicamente diseñado para mantener la temperatura de operación de las celdas. Por otro lado, los autores de [21] proponen el uso de aire y enfriamiento natural para el enfriamiento de las celdas. Otra posibilidad es la inclusión de un surco debajo de las celdas que permita la ventilación del sistema [17].

Debido a que los sistemas HCPV solo emplean la radiación directa será necesaria la colocación de un sistema de seguimiento del sol [4], para conservar una posición óptima; por medio de una variación de la elevación, así como el azimut de los elementos, a pesar de la elevación de costo de implantación que supone tal mejora [22] [23].

También se puede aumentar la eficiencia, según pruebas de laboratorio efectuadas si se hacen celdas con más capas de materiales semiconductores, con celdas solares de multi-juntura. Esto permite la absorción de un rango mayor de formas de onda de la energía solar, que minimiza las pérdidas termodinámicas y mejora la eficiencia teórica de la conversión de la energía del elemento, de acuerdo a se podría alcanzar eficiencia de 86.8% con un número infinito de capas [22].

Otra propuesta es la unión de dos tecnologías de concentración, esto es el uso de lentes Fresnel de Polimetilmetacrilato (PMMA) para la focalización de la radiación hacia celdas PV multi-juntura de alta eficiencia; un

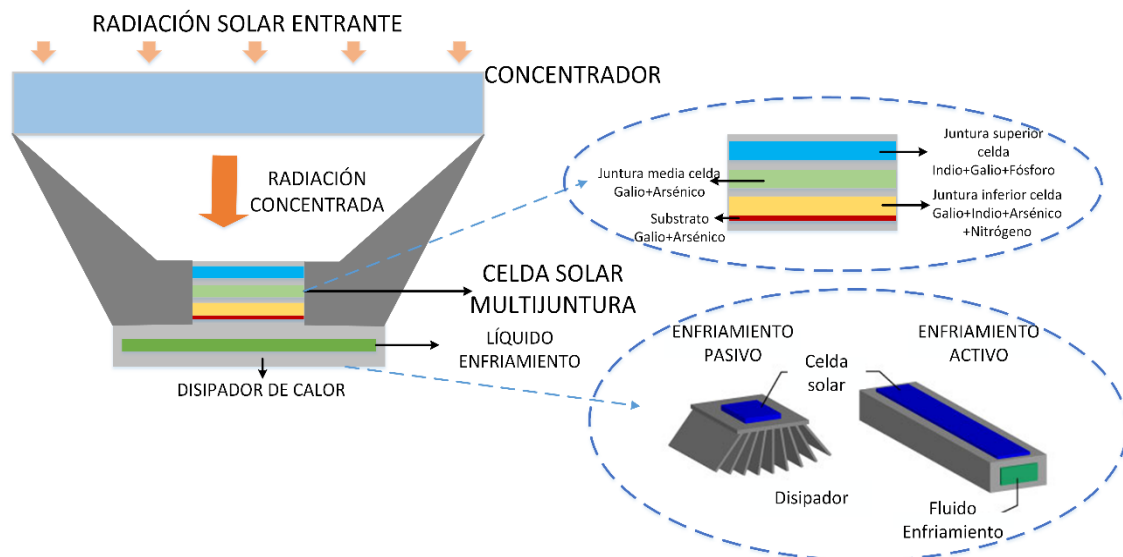


Figura 3: Sistema de celda, concentrador y enfriamiento para mejora de la eficiencia

sistema que permitirá la generación de energía eléctrica a gran escala. Los elevados costos de esta combinación son mitigados debido a que no se requieren grandes extensiones de terreno para su implantación como ocurre con centrales PV de baja eficiencia [8], [10].

En la Figura 3 se puede observar un sistema que combina un elemento concentrador y la celda multijuntura, así como el sistema de enfriamiento, el mismo que será la base para el modelo para las pruebas de laboratorio que se muestran en secciones posteriores.

2.3 Tiempo de retorno de la energía y evaluación del ciclo de vida

Se denomina tiempo de retorno de la energía (EPBT) a la cantidad de tiempo que será necesario que una central opere hasta que la energía que ha sido necesaria consumir para su etapa de construcción sea regenerada al ambiente [9].

El EPBT de las plantas de energía renovable pueden ser varios meses o años. En el caso de los sistemas solares, variará según aspectos como la eficiencia que tenga la planta generadora o el lugar en que instalará la planta. Según [9] se considera que este tiempo está por debajo de un año para sistemas

compuestos por tubos de Fresnel, sabiendo que los sistemas de alta concentración PV tienen un bajo impacto medioambiental, si se considera que muchos de sus elementos son fácilmente reciclables, por lo cual luego de cumplir con el tiempo de vida pueden ser desmontados y reusados.

El EPBT también puede ser considerado como el tiempo en que se complementen las necesidades de producción de entrada de energía requeridas durante el ciclo de vida de la planta. Tal indicador expresa la sostenibilidad energética de un proyecto. Se puede indicar además que está cercanamente relacionado con el potencial de mitigación de las emisiones de CO₂.

Se puede notar en la Figura 4 que hay una reducción de emisiones del sistema HCPV respecto a la generación convencional por efecto PV. La Figura 4 también muestra el ciclo de vida de una central de paneles convencionales PV respecto a una con paneles HCPV, esto incluye la extracción de materia prima, fabricación de paneles, deforestación de terreno para la implantación, la etapa de construcción, la generación y uso de la energía.

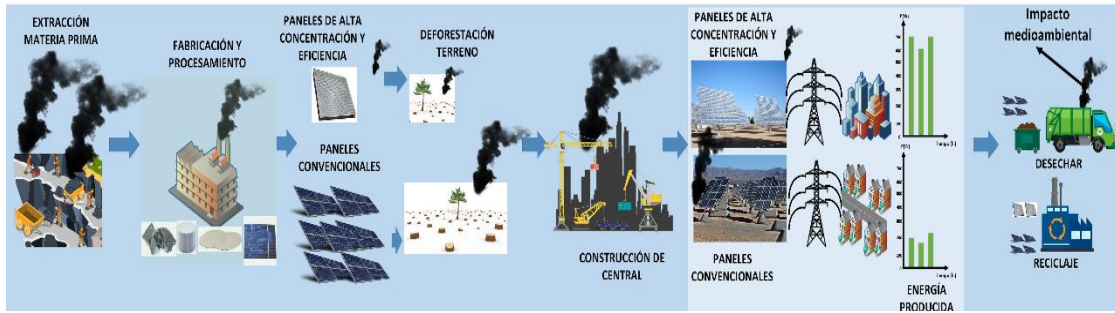


Figura 4: Ciclo de vida de una central convencional y de alta concentración y sus efectos para EPBT

El ciclo culmina con el desecho o reciclaje de los elementos de la central de generación.

Conocer el EPBT es fundamental para la evaluación del ciclo de vida (Life Cycle Assessment) (LCA) por sus siglas en inglés, de una planta [24]. El LCA es un método ampliamente aceptado para cuantificar los impactos medioambientales de procesos, servicios y sistemas de diversos productos. Estos estudios se llevan a cabo para hacer mejoras a los productos, para planeación estratégica y comparación con productos similares o reemplazos [8].

Se estudian los impactos en todo el ciclo de vida de un producto. Para obtener resultados cercanos a la realidad, todos los tipos de energías requeridas, las pérdidas y desperdicios, materiales y elementos auxiliares son tomados en consideración [9].

La conducción del LCA permite ubicar los potenciales puntos débiles de una tecnología en estudio como los sistemas de alta concentración y eficiencia solar, así como medidas que permitan su mejora y los beneficios que conlleva su uso son determinados. Debido a que los ciclos de vida están relacionados directamente los unos con otros, se establece que para estudiarlos no sean considerados los posibles cambios en las condiciones medioambientales durante toda la vida de un producto [8].

Matemáticamente el EPBT será el cociente entre E_{in} y E_{ahorro} , siendo E_{in} la energía de entrada necesaria durante el ciclo de vida para el equipo PV; mientras

que E_{ahorro} representa los ahorros anuales debido a la energía que sea producida por un sistema de alta concentración y eficiencia de tipo PV, ambas expresadas en unidades de energía primaria, es decir Joules. Los ahorros se expresan en función de la ventaja del HCPV respecto a una tecnología que ha sido reemplazada, normalmente no renovable [24].

La Figura 5 muestra las diferencias de producción entre una central de alta concentración y eficiencia respecto a aquella correspondiente a una central que cuenta con paneles convencionales, se denota el aumento considerable de la cantidad de potencia que puede producir la central HCPV. La cantidad de energía producida es referida a los datos de [11]

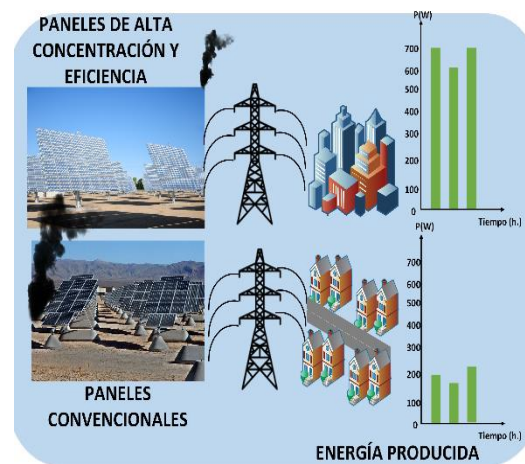


Figura 5: Comparativa producción paneles alta eficiencia vs convencional

2.4 Producción energética en centrales de alta concentración y eficiencia

Se estima que los sistemas en estudio en la presente investigación contarán con más de 250 GW de potencia instalada alrededor del mundo para el año 2030, en especial considerando las mejoras de eficiencia que se darán con los esquemas que se han mencionado previamente.

Esto también puede deberse a que se pueden sincronizar fácilmente a la frecuencia y fase del sistema de potencia, así como la posibilidad de obtener una alta calidad de la energía producida [6], [17].

Por otro lado, se espera que esta clase de sistemas provean flexibilidad y confiabilidad al despacho de energía de un sistema de potencia, estos sistemas además son capaces de cubrir la demanda de la carga en horas pico, pudiendo alcanzar altos niveles de potencia generada durante todas las horas hábiles para la generación aprovechando la energía solar [25] [26] [27].

De acuerdo con [26] la cantidad de potencia de sistemas de alta concentración será de 1 GWp en 2020, se debe establecer que contando con un sistema de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) se puede maximizar la producción de estos sistemas.

Se establece que la forma de medir la eficiencia en la producción energética anual es la relación entre la energía producida por los paneles de alta eficiencia y la energía solar total recibida por tales paneles medida en soles.

La experiencia establece que las máximas eficiencias alcanzadas para la generación son de 85.9% para máxima concentración, 75.3% para concentración de 1 sol (sun) y 77.9 para concentración de 500 soles (suns) [26].

De lo anterior, se podría entender que en lugar con altos niveles de irradiancia normal se podrá tener una alta

producción energética a partir de un sistema de alta concentración como el usado para experimentación con concentradores ópticos [28].

Otra característica relevante para los sistemas de alta eficiencia y alta concentración tiene que ver con un sistema efectivo de enfriamiento de las celdas sin importar si es pasivo o activo, en el caso específico de los sistemas pasivos de enfriamiento, la condición climática estacionaria que involucre bajas temperaturas permitirá un aumento de la producción energética.

A ello se debe añadir un análisis correspondiente a los niveles de contaminación del sitio escogido para la colocación de una planta de alta concentración y eficiencia ya que puede conllevar afectaciones a la producción general del sistema de generación.

Según los autores de [29], que cuantifican la afectación por contaminación del aire, el mayor agente que implica una reducción del rendimiento es el polvo que puede quedar en elementos ópticos y en paneles de alta concentración.

Los niveles de polución pueden aumentar por una alta industrialización o una alta densidad demográfica. Los agentes de contaminación son partículas de materia derivadas del uso de combustibles fósiles y de procesos industriales; así como una serie de componentes químicos resultado de diversas interacciones de elementos naturales [29].

Otro factor a tomar en consideración para el funcionamiento de una planta de alta eficiencia y concentración es la topografía de terreno, esto incluye una ubicación que está rodeada de montañas y elevaciones, la velocidad del viento promedio, así como la temperatura en diversas estaciones del año pueden ser determinantes para conseguir una producción energética óptima que cubra la demanda del sistema eléctrico.

Por otro lado, se considera la existencia de un sistema de enfriamiento para la mejora de la eficiencia, este puede ser activo o pasivo. Una de las desventajas de un sistema activo es que requerirá el uso de una cantidad de la energía generada para su correcto funcionamiento, si tal energía no está disponible el sistema de enfriamiento deja de funcionar, aunque también es posible realizar de mejor forma el control de temperatura de las celdas [30].

Así mismo el calor podría ser usado para calentamiento de agua y otras aplicaciones. Lo anterior puede indicar que el sistema de enfriamiento puede tomar un papel preponderante en el costo general del sistema y por tanto la competitividad del sistema en el mercado, en [30] y [31] se indica que el costo nivelado de la energía de un sistema con refrigeración pasiva puede alcanzar los 0.14 \$/kWh y un costo de instalación de 3.05 \$/W para este tipo de sistemas, mientras que uno de tipo activo puede alcanzar un LCOE de 0.24 \$/kWh y de instalación de 3.05 \$/W.

3. Datos de Laboratorio

Para comprobar la efectividad del sistema solar de alta concentración por PV, sometido a diversas condiciones ambientales, se ejecutaron pruebas con paneles solares con características nominales, para determinar la corriente de cortocircuito máxima I_{sc} y la tensión máxima de circuito abierto V_{oc} que permita la construcción de su curva característica I-V mostrada en la Figura 1.

Estas pruebas se ejecutaron durante 11 horas aproximadamente, realizando un seguimiento solar manual. El panel convencional empleado para las pruebas tiene como tensión nominal 5 voltios y una corriente nominal de 200 miliamperios. Se empleó una resistencia variable de carga con la que se ajustó el valor de carga conectado hasta alcanzar

el punto más cercano al de máxima potencia.

El arreglo de concentración se realiza mediante espejos establecidos con una inclinación de aproximadamente 75° , que fue ajustada experimentalmente para obtener los mejores resultados, tal prototipo se muestra en la Figura 6.

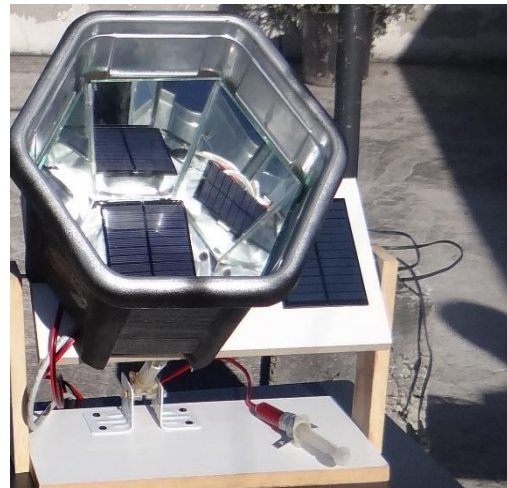


Figura 6: Prototipo de laboratorio de HCPV con seguimiento solar

Para la captura de datos de tensión, corriente y temperatura de un panel convencional y una con alta concentración se ha empleado una interfaz entre la tarjeta de adquisición Arduino Uno® y el software LabVIEW, por medio del módulo LabVIEW Interface for Arduino.

El funcionamiento para la captura de los datos es el siguiente, en primer lugar, se realiza una comunicación de envío-recepción de datos entre LabVIEW y Arduino de tipo serial, luego se envían los datos de lectura de los 6 puertos (A0, A1, A5) analógicos de una resolución de 10 bits con los que cuenta la tarjeta de adquisición, se reciben datos de tensión de 0 a 5 voltios directamente.

Para el caso de la tensión de panel de alta concentración y convencional se emplea un divisor de tensión resistivo.

La obtención de valores de corriente circulante en los circuitos de carga de cada panel se hace por medio de una

resistencia de derivación de 0.56 ohmios y la amplificación de la caída de tensión resultante.

La medición de temperatura se ejecuta por medio de sensores LM35 que entregan una señal de tensión directa en milivoltios. Los circuitos de adquisición de tensión, temperatura y corriente se encuentran en la Figura 7.

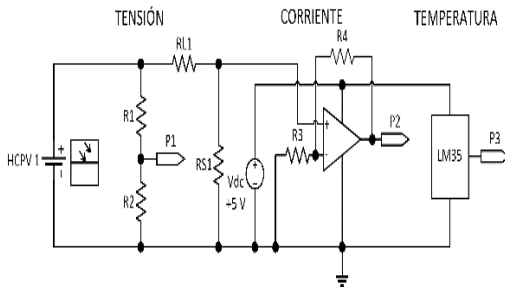


Figura 7: Diagrama equivalente adquisición de datos.

Donde R1 y R2 son resistencias del divisor de tensión, RL1 la resistencia de carga, RS1 resistencia de derivación, R3 y R4 resistencias de amplificador y P1, P2 y P3 puntos de conexión a la tarjeta de adquisición. Obtenidos los datos, con un lazo FOR, se capturan datos sucesivos para obtener la media de cada variable; mejorando la precisión de la adquisición.

Los datos capturados se almacenan en una base de datos para ejecutar los análisis pertinentes, se emplea Matlab Script, con lenguaje de programación de software matemático para la captura de datos. También se obtienen datos de fecha y hora para cada muestra de tensión, corriente y temperatura.

Los datos obtenidos se almacenan en archivos de Excel (.xlsx) y (.MAT) con una frecuencia de un minuto y ocho minutos según se requiera. También se muestran las gráficas de cada dato según la cantidad de muestras obtenidas.

Este proceso puede ser entendido de mejor forma mediante el siguiente pseudocódigo.

Algoritmo de captura datos Arduino-LabVIEW

Paso 1: Conexión serial Arduino – LabView

Paso 2: Lectura del bloque analógico

Paso 3: Para todo: $i \in$ Puerto Analógico

Haga: Tratamiento de datos con constantes según caso: *corriente (I) según ley de Ohm y división de corriente, tensión (V) por divisor de tensión y temperatura T según sensor LM35.*

Paso 4: Para: $j=1$ hasta 8 datos tomados

Haga: Almacenamiento de datos

Paso 5: Cálculo de la media de *Corriente, Tensión y Temperatura de panel concentrado y convencional.*

Paso 6: Almacenamiento de variables en MATLAB y Excel de *fecha, hora, tensión, corriente y temperatura.*

Paso 7: Graficar datos preliminares *tensión, corriente y temperatura* de panel concentrado y convencional en función del número de muestras.

Terminar

4. Formulación del Problema

Si se consideran los aspectos antes mencionados que influyen directamente en el rendimiento general de un sistema de alta eficiencia y concentración, se ha procedido a establecer los parámetros necesarios para un análisis del funcionamiento general de esta clase de sistema bajo condiciones normal de operación (NOC). Se ha considerado que un análisis adecuado de diversas condiciones climáticas estacionales requiere en primera instancia la obtención de la corriente de salida de los paneles solares, según la ecuación 1.

$$I = N_p \times \{ (I_L - I_0) \times [\exp(\frac{q_e (\frac{V}{N_s} + \frac{R_s}{N_p})}{m \cdot \sigma_B \cdot T}) - 1] - \frac{(\frac{V}{N_s} + \frac{R_s}{N_p})}{R_p} \} \quad (1)$$

Donde:

I: corriente de salida (A)

I_0 : Corriente de saturación del diodo (A)

I_L : Corriente fotogenerada (A)

N_s : Número de celdas en serie

N_p : Número de celdas en paralelo

R_s : Resistencia en serie

R_p : Resistencia en paralelo

m : Factor de idealidad de celda ($0 \leq m \leq 1$)

q_E : Carga del electrón equivalente a $1.602 \cdot 10^{-19} C$
 σ_B : Constante de Boltzmann equivalente a $1.381 \cdot 10^{-23} J / K$
 T : Temperatura ($^{\circ}K$)
 V : Tensión de panel (V)

Estableciendo condiciones NOC de $25^{\circ}C$ o $298^{\circ}K$, radiación de $1000 W/m^2$, y conociendo mediante pruebas la corriente de saturación de diodo, se obtiene la expresión simplificada (2).

$$I = N_p \times \{ (I_L - I_0) \cdot \left[\frac{q_E \cdot (V + I \cdot R_s)}{N_s \cdot A \cdot \sigma_B \cdot T} \right] \} \quad (2)$$

Donde:

A : Factor de idealidad de materiales solares ($1 \leq A \leq 5$).

Luego se obtiene con parámetros de radiación y corriente de cortocircuito (3).

$$I = I_{SC} + K_i \cdot (T - 298) \cdot \frac{\Phi}{1000} \quad (3)$$

Donde:

I_{SC} : Corriente de cortocircuito (A)

K_i : Corriente de cortocircuito de celda (A)

Φ : Radiación solar (W/m^2)

Para la obtención de datos de panel concentrado de tensión de circuito abierto y corriente de cortocircuito se usan las expresiones (4) y (5)

$$I_{SC}(X) = X \cdot I_{SC}(1) \quad (4)$$

$$V_{OC}(X) = V_{OC}(1) + \frac{\sigma_B \cdot T}{q_E} \cdot \ln(X) \quad (5)$$

Donde:

V_{OC} : Tensión de circuito abierto (V)

$I_{SC}(1)$: Corriente de cortocircuito a 1 Sol (A)

$V_{OC}(1)$: Tensión de circuito abierto a 1 Sol (V)

X : Número de soles

De esta forma se han podido obtener los datos de la Tabla 1, correspondientes a las características técnicas del panel de alta eficiencia y alta concentración en estudio, así como las constantes empleadas para los cálculos correspondientes.

Tabla 1: Características Técnicas Panel de alta eficiencia

Tensión Circuito Abierto Vdc	6.96
Corriente cortocircuito Adc	0.25
Variación corriente por temperatura A/ $^{\circ}C$	-0.01817
Variación tensión por temperatura V/ $^{\circ}C$	-0.34745
Número de paneles en serie	1
Número de paneles en paralelo	1
Número de soles (X)	1.8
Factor de idealidad de diodo (A)	1.3
Temperatura ideal $^{\circ}C$	25
Factor de idealidad celda (m)	1

Para obtener resultados cercanos a la idealidad, evitando la afectación al prototipo HCPV por altas temperaturas, supone el análisis de los cambios en la tensión y corriente de salida del panel según las variaciones de temperatura, hasta alcanzar una zona de temperaturas ideales de trabajo del sistema.

Por medio de métodos estocásticos, se obtienen valores de temperatura que se encuentran en la banda de trabajo ideal durante las 11 horas de generación por efecto fotovoltaico del prototipo en estudio.

Se utilizan (3) y (5) con las siguientes restricciones (6) y (7), además (8) y (9) para la obtención de valores equivalentes en forma de una heurística que se ha ajustado según los resultados obtenidos con este modelo y condiciones.

$$25^{\circ}\text{C} \geq T \geq 35^{\circ}\text{C} \quad (6)$$

$$I = 0.315 \text{ A si } T = 28^{\circ}\text{C} \quad (7)$$

$$I_2 = (T_2 - T_1) \Delta I + I_1 \quad (8)$$

$$V_2 = (T_2 - T_1) \Delta V + V_1 \quad (9)$$

Donde:

T_1 : Temperatura inicial ($^{\circ}\text{K}$)

T_2 : Temperatura final ($^{\circ}\text{K}$)

I_1 : Corriente inicial (A)

I_2 : Corriente final (A)

V_1 : Tensión inicial (A)

V_2 : Tensión final (A)

ΔI : Variación de la corriente en función de la temperatura ($\text{A}/^{\circ}\text{K}$)

ΔV : Variación de la tensión en función de la temperatura ($\text{V}/^{\circ}\text{K}$)

Con esta propuesta, se obtiene una curva de potencia más nivelada durante el día, aunque se requiere establecer las afectaciones que tendrá el prototipo en función de otras condiciones estacionales como la presencia de nubosidad, lluvia, polvo, humedad y otros que influyen directamente en la potencia que se puede obtener por efecto fotovoltaico.

5. Análisis de Resultados

De las pruebas de laboratorio ejecutadas, se ha determinado que en un panel de alta concentración las mejoras significativas de eficiencia se producen debido a un aumento de la corriente que son capaces de producir, notando además que las mejoras son mayores si el panel es colocado a un ángulo entre 15 a 45° .

La eficiencia del prototipo en estudio se afecta al colocar en forma perpendicular al sol en horas cercanas al mediodía.

La señal de corriente obtenida a lo largo del día para el panel convencional y el de alta concentración está en la Figura 8.

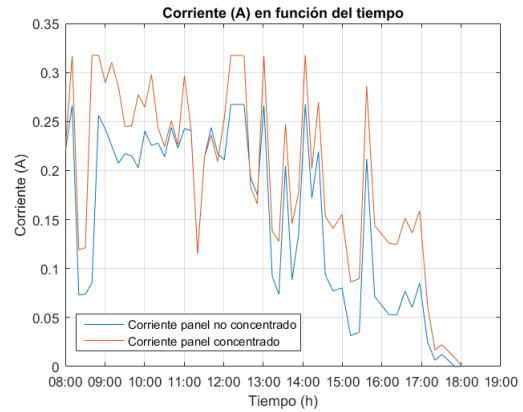


Figura 8: Corriente en función del tiempo

El aumento significativo de la corriente en el panel de alta concentración se contrasta con lo que ocurre con la tensión que puede ser obtenida, ya que casi durante toda la experiencia se ha notado que la tensión en el panel convencional ha superado la tensión obtenida en el panel de alta concentración, existiendo instantes en que la tensión de panel concentrado tiene una fuerte depresión, momentos que coinciden con aumentos de la corriente en los que el panel está trabajando en su zona no óptima, esto se puede notar en la Figura 9.

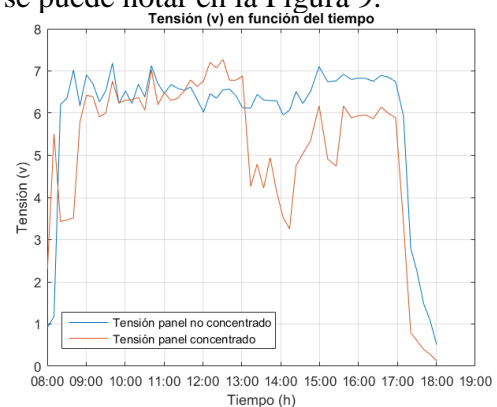


Figura 9: Tensión en función del tiempo

Se puntualiza que las muestras obtenidas han mostrado que durante la época del año en que se realizó la experimentación, el rendimiento de ambos tipos de paneles prácticamente ha tendido a cero a partir de las 5 pm, esto debido a que la radiación directa ya no incide en los paneles, únicamente la radiación indirecta ha permitido una

reducida generación de energía eléctrica, cercana a cero a partir de las 6 pm.

Se hace necesario ejecutar un análisis de la variación de la temperatura durante las horas en que hay radiación. Se nota claramente en la Figura 10 que la temperatura presenta aumentos significativos en el caso del panel de alta concentración, en los casos en los cuales la temperatura es extremadamente alta, es coincidente con los momentos en que los valores de tensión y corriente se reducen.

Se da énfasis a los eventos que se producen entre las 2 pm y 3 pm, en los que inclusive el panel de alta concentración está en los puntos de su curva característica en que la corriente se acerca a la I_{sc} mientras la tensión es tiende a cero, por lo cual la producción durante tal tiempo no es la mejor, pudiendo inclusive causar daños permanentes al HCPV.

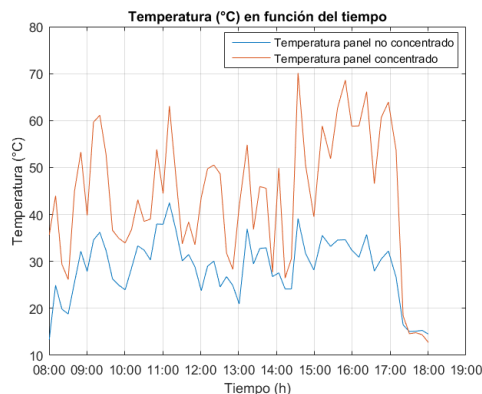


Figura 10: Temperatura en función del tiempo

Los contrastes entre la mejora de la corriente del panel con alta concentración y la tensión reducida respecto a un panel convencional hacen que la potencia resultante durante toda la experimentación tenga picos y valle, mejorando reducidamente respecto a la de un panel convencional, lo que hace suponer que se obtendrán mejores resultados si se cuenta con un clima que tenga temperaturas reducidas o con un sistema adecuado de enfriamiento, la curva de potencia en función del tiempo está en la Figura 11.

El sistema de alta concentración trabaja más efectivamente en instantes en que se ha tenido un cierto grado de inclinación, esto debido a que la concentración aumenta debido al sistema de espejos propuesto, estos instantes se notan a las 8:00, 13:00 y 15:00 como están resaltados en la figura que sigue.

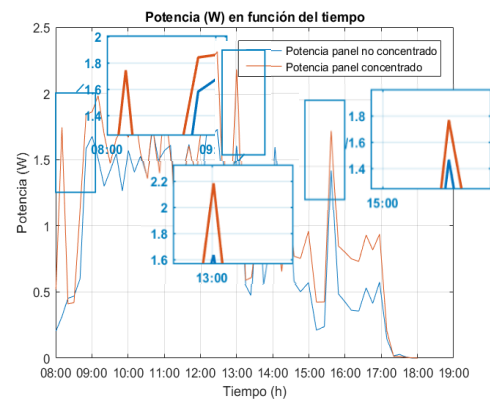


Figura 11: Potencia en función del tiempo

La mayor afectación al funcionamiento del sistema de alta concentración y eficiencia se debe a las altas temperaturas, mostradas en Figura 10. Se puede demostrar fácilmente que la producción del sistema mejora notablemente con temperaturas bajas.

La producción es equilibrada durante todo el ciclo en que existe radiación solar, así se obtiene la Figura 12, notando que la producción del sistema de alta concentración supera ampliamente a la de un sistema convencional.

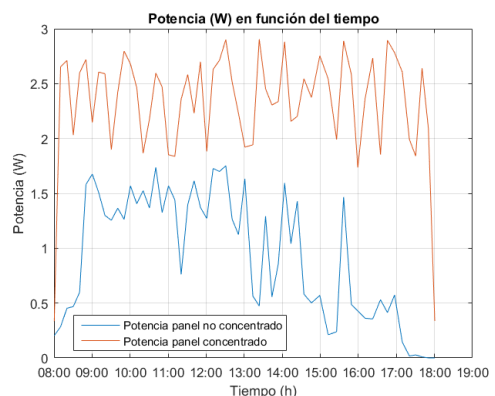


Figura 12: Potencia sistema de alta concentración a baja temperatura

Los cambios mostrados se deben primordialmente a la existencia de un

delta debido a la temperatura para la corriente y tensión, propio de la característica de paneles fotovoltaicos.

Estos datos se mostraron en la Tabla 1, los que son consistentes con la curva obtenida.

En la Figura 13 se puede notar el comportamiento de la corriente del panel de alta concentración cuando la temperatura se reduce. Existe una forma de onda sostenida durante el día, en este caso esto implica obtener una mejor producción de energía mientras la radiación sea adecuada.

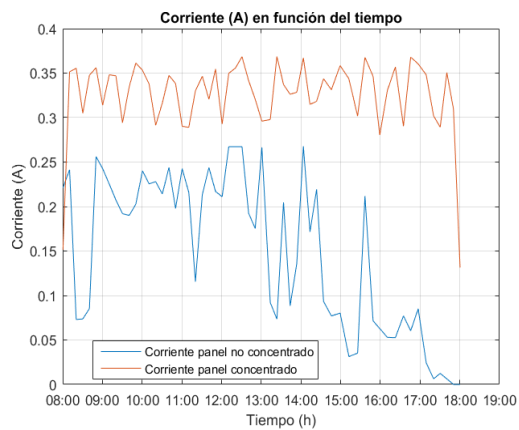


Figura 13: Corriente en sistema de alta concentración a baja temperatura

Se establece un análisis del comportamiento ideal del panel de alta eficiencia y concentración, y el panel convencional, respecto a la producción energética considerando sus características de condición normal de operación (NOC) durante 24 horas, empleando los datos de la Tabla 1 y las ecuaciones (1) (2) (3) (4) y (5) estableciendo las condiciones de irradiancia y temperatura ambiental existente durante los días en que se ejecutaron las pruebas de laboratorio, esto se muestra en la Figura 14.

Se puede notar que en la hora de mayor radiación la potencia aumenta, teniendo un crecimiento sostenido en la mañana hasta alcanzar un pico y decreciendo en la tarde hasta que la radiación tiende a cero.

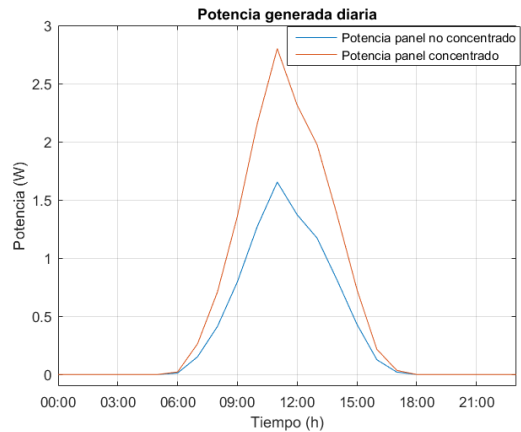


Figura 14: Potencia teórica diaria en condiciones NOC

Los parámetros que influyen directamente en la producción de un sistema de alta concentración y eficiencia es necesario establecer una ubicación adecuada para la colocación de esta clase de sistemas, en este caso se establece el estudio de diversas condiciones climáticas estacionarias a nivel del mar y en ubicaciones de altura, obteniendo randómicamente ubicaciones dentro de Ecuador, notando un comportamiento equilibrado donde las ubicaciones con una temperatura inferior posibilitan una producción mayor, tal como se puede denotar en la Figura 15, esto debido a la posibilidad de obtener una intensidad de corriente superior como se denota en la Figura 16.

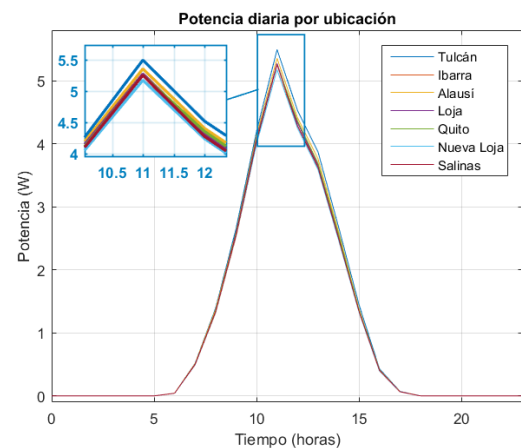


Figura 15: Producción en función de condición climática estacionaria

Se observa la existencia de un pico al mediodía, debido a que se considera que

existe el mismo patrón de radiación para todos los casos.

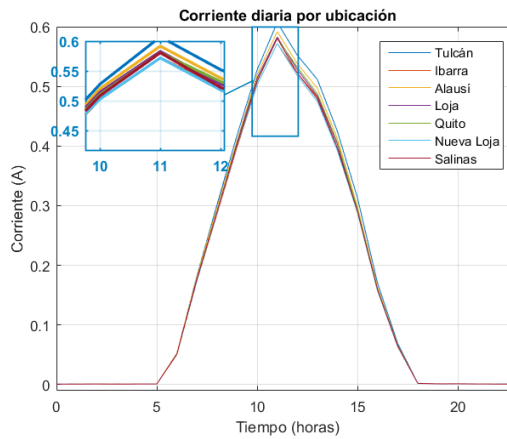


Figura 16: Corriente en función de condición climática estacionaria

Una ubicación con una temperatura alta reduce las posibilidades de obtención de una buena producción energética como es el caso de Nueva Loja o Salinas, por otro lado, en Tulcán o Alausí con temperatura promedio baja, la producción incrementa, esto se puede notar de mejor forma con la Figura 17 que representa la ubicación, temperatura promedio y producción máxima de cada una de las localidades en estudio, de acuerdo a los datos de las estaciones de Accuweather®.

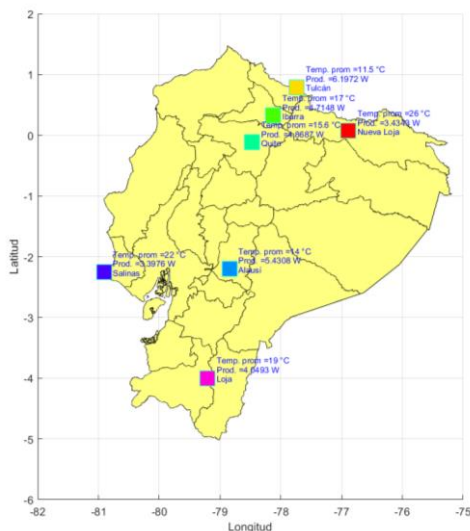


Figura 17: Ubicación, condición climática y producción por locación

Cuando se establecieron las condiciones ideales para que un sistema de alta concentración y alta eficiencia trabaje mejor, el análisis de la producción energética para un año según los datos de temperatura y de radiación promedio durante todos los meses de un período específico, en este caso entre octubre de 2016 y septiembre del 2017, en Quito una ubicación de temperatura media, una ubicación con temperaturas elevadas como Nueva Loja y una ubicación que tiene bajas temperaturas, que es Tulcán. Siempre se observa un pico de producción en julio de 2017. Se consideran los máximos por cada mes, de tal forma de conocer la producción teórica esperada en tal período.

La proyección de energía producida considerando los 31 días de julio con producción ininterrumpida durante 11 horas por día y una producción máxima durante todo el tiempo, además de considerar el costo de la energía 11.8 centavos/kWh por generación fotovoltaica planteado en [32] se encuentra en la Tabla 2.

Tabla 2: Producción mensual máxima esperada

Ubicación	Producción pico mensual (kW)	Producción Energética mensual (kWh)	Costo de energía (USD)
Tulcán	5.42	1848.22	218.09
Quito	5.20	1773.20	209.24
Nueva Loja	5.00	1705.00	201.19

Se puede obtener producción bastante sostenida bajo las diversas condiciones estacionarias que existen en las ciudades en estudio. Se nota una producción superior en Tulcán que es el mejor caso, hay potencia media en Quito y el peor caso es el de Nueva Loja, esto se muestra en la Figura 18.

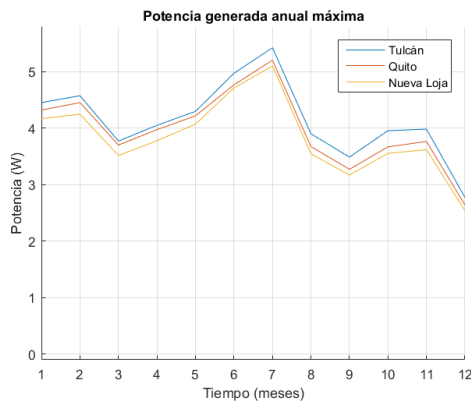


Figura 18: Producción anual esperada en el mejor y peor caso

6. Conclusiones

Los sistemas fotovoltaicos de alta concentración son una mejora de los sistemas solares tradicionales, mediante la combinación del uso de nuevas tecnologías incluyendo la celda multijuntura, que ha permitido mejorar la eficiencia de los sistemas hasta niveles aceptables.

Estos sistemas han sido estudiados alrededor del mundo, el enfriamiento natural como el empleado en las pruebas de laboratorio es eficaz para aumentar la producción, en especial en aquellas locaciones en que las condiciones climáticas estacionarias tienden a una temperatura baja.

El modelamiento de un HCPV adquiere cierta complejidad debido a que se deben modelar cada una de las condiciones externas, primordialmente climáticas; así como las internas por ejemplo la curva de funcionamiento I-V para obtener resultados cercanos a la realidad. El uso de pruebas de laboratorio también resultó de gran utilidad para ejecutar el análisis del funcionamiento general de un sistema solar de alta concentración.

El sistema de alta concentración y alta eficiencia puede ser aprovechado de mejor forma en locaciones con mayor número de horas de radiación y altos niveles de irradiancia normal, ya que posibilita la obtención de un nivel de potencia elevado durante todo el ciclo con la utilización de sistemas de

seguimiento del punto de máxima potencia y de seguimiento del sol.

El uso de técnicas estadísticas y de regresión alimentadas por los datos obtenidos por medio de laboratorio ha permitido ejecutar proyecciones de funcionamiento teóricas de un HCPV.

De esta forma se obtuvieron prometedores niveles de producción y por tanto competitividad para esta tecnología; en especial en las ubicaciones que concuerdan con las condiciones estacionarias favorables para la producción de energía fotovoltaica con alta concentración, escogidas randómicamente para reconocer los cambios en la producción de sistemas HCPV en función de la temperatura.

La experiencia en laboratorio ha demostrado que comparativamente un sistema de alta eficiencia y concentración, supera durante todo el ciclo de pruebas al sistema de panel solar convencional, probados en conjunto bajo las mismas condiciones, esto debido a los notables aumentos de la magnitud de corriente manteniendo niveles aceptables de tensión generada. Sin embargo, el sistema de alta concentración también se ve afectado por los cambios en la temperatura de celdas en su rendimiento, por lo cual se requiere sistemas de enfriamiento adecuados para una mejora de estos sistemas.

El trabajo futuro necesario para comprobar la efectividad del prototipo en estudio implica muestreos de comportamiento según los cambios en otras condiciones estacionarias, incluyendo lluvia, nubosidad, presencia de humedad, polvo y suciedad, y obtener un sistema de enfriamiento acorde que permita obtener las condiciones obtenidas estocásticamente en la realidad.

7. Referencias

- [1] Y. Du *et al.*, “Evaluation of photovoltaic panel temperature in realistic scenarios,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 108, pp. 60–67, 2016.
- [2] S. Chander, A. Purohit, A. Sharma, S. P. Nehra, and M. S. Dhaka, “A study on photovoltaic parameters of mono-crystalline silicon solar cell with cell temperature,” *Energy Reports*, vol. 1, pp. 104–109, 2015.
- [3] S. M. Shaahid and I. El-Amin, “Techno-economic evaluation of off-grid hybrid photovoltaic–diesel–battery power systems for rural electrification in Saudi Arabia—A way forward for sustainable development,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 3, pp. 625–633, Apr. 2009.
- [4] S. Rustemli, F. Dincer, E. Unal, M. Karaaslan, and C. Sabah, “The analysis on sun tracking and cooling systems for photovoltaic panels,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 22, pp. 598–603, 2013.
- [5] S. Nižetić, F. Grubišić- Čabo, I. Marinić-Kragić, and A. M. Papadopoulos, “Experimental and numerical investigation of a backside convective cooling mechanism on photovoltaic panels,” *Energy*, vol. 111, pp. 211–225, Sep. 2016.
- [6] X. Ju, C. Xu, Y. Hu, X. Han, G. Wei, and X. Du, “A review on the development of photovoltaic/concentrated solar power (PV-CSP) hybrid systems,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 161, no. July 2016, pp. 305–327, Mar. 2017.
- [7] C. Renno, F. Petito, G. Landi, and H. C. Neitzert, “Experimental characterization of a concentrating photovoltaic system varying the light concentration,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 138, pp. 119–130, 2017.
- [8] C. Lamnatou and D. Chemisana, “Concentrating solar systems : Life Cycle Assessment (LCA) and environmental issues,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 78, no. December 2016, pp. 916–932, 2017.
- [9] G. Peharz and F. Dimroth, “Energy payback time of the high-concentration PV system FLATCON®,” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 13, no. 7, pp. 627–634, Nov. 2005.
- [10] E. F. Fernández, D. L. Talavera, F. M. Almonacid, and G. P. Smestad, “Investigating the impact of weather variables on the energy yield and cost of energy of grid-connected solar concentrator systems,” *Energy*, vol. 106, pp. 790–801, Jul. 2016.
- [11] E. F. Fernández *et al.*, “Model for estimating the energy yield of a high concentrator photovoltaic system,” *Energy*, vol. 87, pp. 77–85, Jul. 2015.
- [12] D. R. Mattia, R. Giorgio, R. Cecilia, S. Federico, and A. Tagliafico Luca, “Dynamic Thermal Model for Hybrid Photovoltaic Panels,” *Energy Procedia*, vol. 81, pp. 345–353, Dec. 2015.
- [13] K. Kant, A. Shukla, A. Sharma, and P. Henry, “Thermal response of poly-crystalline silicon photovoltaic panels : Numerical simulation and experimental study,” *Sol. Energy*, vol. 134, pp. 147–155, 2016.
- [14] E. F. Fernández, P. Rodrigo, and F. Almonacid, “Solar Energy Materials & Solar Cells A

- method for estimating cell temperature at the maximum power point of a HCPV module under actual operating conditions,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 124, pp. 159–165, 2014.
- [15] B. García-Domingo, M. Piliougine, D. Elizondo, and J. Aguilera, “CPV module electric characterisation by artificial neural networks,” *Renew. Energy*, vol. 78, pp. 173–181, Jun. 2015.
- [16] M. Mussard, “Solar energy under cold climatic conditions: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 74, no. January, pp. 733–745, Jul. 2017.
- [17] Z. Wang, Y. Li, K. Wang, and Z. Huang, “Environment-adjusted operational performance evaluation of solar photovoltaic power plants: A three stage efficiency analysis,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 76, no. March, pp. 1153–1162, Sep. 2017.
- [18] E. Skoplaki and J. A. Palyvos, “On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency / power correlations,” *Sol. Energy*, vol. 83, no. 5, pp. 614–624, 2009.
- [19] S. Ghazi and K. Ip, “The effect of weather conditions on the efficiency of PV panels in the southeast of UK,” *Renew. Energy*, vol. 69, pp. 50–59, Sep. 2014.
- [20] C. G. Popovici, S. V. Hudişteanu, T. D. Mateescu, and N.-C. Cherecheş, “Efficiency Improvement of Photovoltaic Panels by Using Air Cooled Heat Sinks,” *Energy Procedia*, vol. 85, no. November 2015, pp. 425–432, Jan. 2016.
- [21] E. Cuce, T. Bali, and S. A. Sekucoglu, “Effects of passive cooling on performance of silicon photovoltaic cells,” *Int. J. Low-Carbon Technol.*, vol. 6, no. 4, pp. 299–308, Dec. 2011.
- [22] B. Corona, L. Escudero, G. Quéméré, I. Luque-heredia, and G. S. Miguel, “Energy and environmental life cycle assessment of a high concentration photovoltaic power plant in Morocco,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 2035, no. Eia 2014, 2016.
- [23] S. A. S. Eldin, M. S. Abdelhady, and H. A. Kandil, “Feasibility of solar tracking systems for PV panels in hot and cold regions,” *Renew. Energy*, vol. 85, pp. 228–233, 2016.
- [24] M. Held and R. Ilg, “Update of environmental indicators and energy payback time of CdTe PV systems in Europe,” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 19, no. 5, pp. 614–626, Aug. 2011.
- [25] N. Khuchua, R. Melkadze, A. Moseshvili, K. Chitaia, and G. Melikidze, “New-type solar concentrator concept - Approach to reduced-cost CPV module technology,” *2015 IEEE 42nd Photovolt. Spec. Conf. PVSC 2015*, 2015.
- [26] J. Villa and A. Marti, “Impact of the spectrum, location and interconnection between solar cells in the annual production of photovoltaic energies in photovoltaic concentration systems,” *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, vol. 2016–Novem, pp. 574–576, 2016.
- [27] Nathan S. Lewis, “Research opportunities to advance solar energy utilization,” *Science (80- .)*, vol. 351, no. 6271, p. aad1920-1-9, 2016.

- [28] M. Wiesenfarth, S. Gamisch, T. Dörsam, and A. W. Bett, "Challenges for thermal management and production technologies in concentrating photovoltaic (CPV) modules," *Proc. 5th Electron. Syst. Technol. Conf. ESTC 2014*, pp. 0–3, 2014.
- [29] J. K. Kaldellis and A. Kokala, "Quantifying the decrease of the photovoltaic panels' energy yield due to phenomena of natural air pollution disposal," *Energy*, vol. 35, no. 12, pp. 4862–4869, 2010.
- [30] L. Micheli, N. Sarmah, X. Luo, K. S. Reddy, and T. K. Mallick, "Opportunities and challenges in micro- and nano-technologies for concentrating photovoltaic cooling: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 20, pp. 595–610, Apr. 2013.
- [31] A. Mokri and M. Emziane, "Concentrator Photovoltaic Technologies and Market: A Critical Review," *World Renew. Energy Congr. – Sweden, 8–13 May, 2011, Linköping, Sweden*, pp. 2738–2742, 2011.
- [32] CONELEC, *Regulación No. CONELEC – 001/13*. Ecuador, 2013, pp. 1–23.

7.1 Estado del Arte

DATOS			TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA					
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REFERENCIA	IMPORTANCIA USO ENERGÍA SOLAR	PROBLEMAS EFICIENCIA	TIEMPO DE RETORNO DE LA ENERGÍA	TIPOS DE SISTEMAS DE ALTA CONCENTRACIÓN SOLAR	EVALUACIÓN DEL CICLO DE VIDA	CAMBIOS DE TEMPERATURA DIARIO	CAMBIOS ESTACIONALES	ALTURA Y TERRENO	RADIACIÓN SOLAR POR UBICACIÓN	TEMPERATURA CELDA	CURVA IV	SEGUIMIENTO PUNTO ÓPTIMO	SISTEMA DE ALTA CONCENTRACIÓN PV	PV+LENTE DE FRESNEL	CONCENTRACIÓN LINEAR FRESNEL	MANTENIMIENTO TEMPERATURA CELDA	CELDA MULTIENTURA	ANÁLISIS DATOS ESTADÍSTICOS	PROYECCIÓN DATOS FUTUROS	SIMULACIÓN CONDICIONES INTERNAS Y EXTERNAS	PRUEBAS DE LABORATORIO
1	2016	Evaluation of photovoltaic panel temperature in realistic scenarios	\cite{Du2016}	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>						<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>								
2	2015	A study on photovoltaic parameters of mono-crystalline silicon solar cell with cell temperature	\cite{Chander2015}	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>									<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3	2009	Techno-economic evaluation of off-grid hybrid photovoltaic–diesel–battery power systems for rural electrification in Saudi Arabia—A way forward for sustainable development	\cite{Shaadid2009}							<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>												<input checked="" type="checkbox"/>	
4	2013	The analysis on sun tracking and cooling systems for photovoltaic panels	\cite{Rustemi2013}	<input checked="" type="checkbox"/>											<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>						
5	2016	Experimental and numerical investigation of a backside convective cooling mechanism on photovoltaic panels	\cite{Nizetic2016}										<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
6	2017	A review on the development of photovoltaic/concentrated solar power (PV-CSP) hybrid systems	\cite{Ju2017}				<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>						<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>							
7	2017	Experimental characterization of a concentrating photovoltaic system varying the light concentration	\cite{Renno2017}											<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	
8	2017	Concentrating solar systems: Life Cycle Assessment (LCA) and environmental issues	\cite{Lamnatou2017}			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>								<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>							
9	2005	Energy payback time of the high-concentration PV system FLATCON@	\cite{Peharz2005}			<input checked="" type="checkbox"/>										<input checked="" type="checkbox"/>							<input checked="" type="checkbox"/>	
10	2016	Investigating the impact of weather variables on the energy yield and cost of energy of grid-connected solar concentrator systems	\cite{Fernandez2016}									<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>								<input checked="" type="checkbox"/>	
11	2015	Model for estimating the energy yield of a high concentrator photovoltaic system	\cite{Fernandez2015}				<input checked="" type="checkbox"/>									<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	

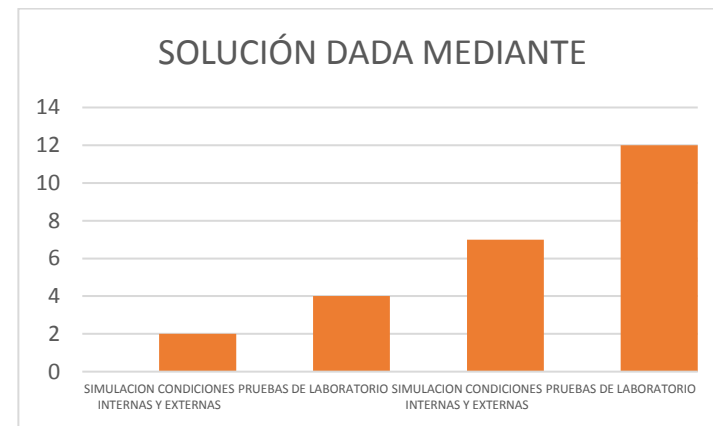
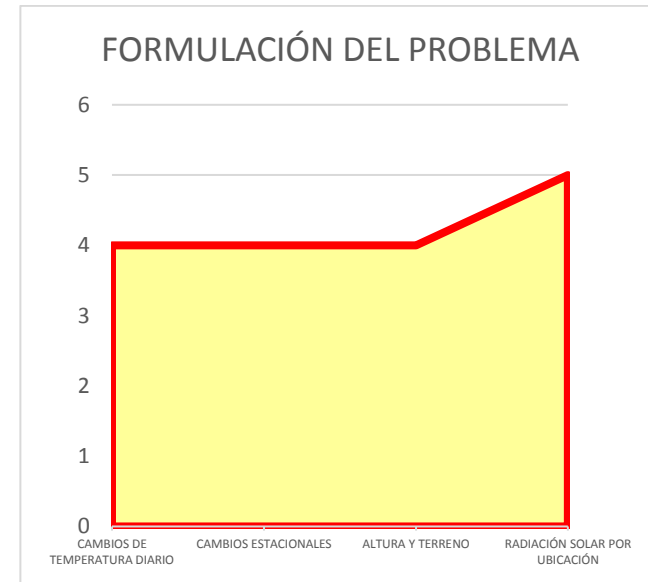
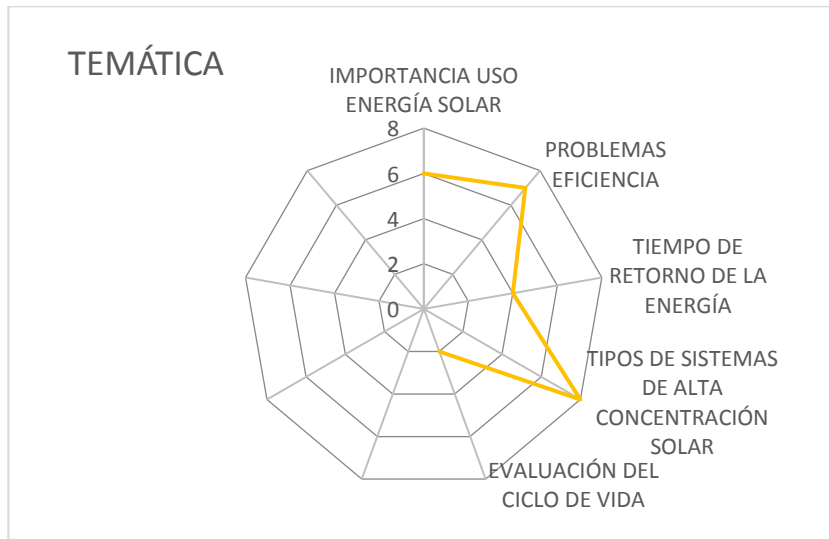


TABLA 4: RESUMEN E INDICADORES DEL ESTADO DEL ARTE

