

EVALUACIÓN DE *HEAT PIPE* PARA RECUPERACIÓN DE ENERGÍATÉRMICA EN
PANELES SOLARES

ALEX JOSÉ MARTÍNEZ CANTERO

GUILLERMO JOSÉ PÉREZ PÉREZ

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA (U.P.B)

ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

INGENIERÍA MECÁNICA

MONTERÍA-CÓRDOBA

2022

EVALUACIÓN DE *HEAT PIPE* PARA RECUPERACIÓN DE ENERGÍATÉRMICA EN
PANELES SOLARES

ALEX JOSÉ MARTÍNEZ CANTERO

GUILLERMO JOSÉ PÉREZ PÉREZ

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero
Mecánico

Asesor

Ph.D DIEGO ALEJANDRO CAMARGO TRILLOS

Doctor en Ingeniería

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA (U.P.B)

ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

INGENIERÍA MECÁNICA

MONTERÍA-CÓRDOBA

2022

DEDICATORIAS

A mi madre, quien, con su incasable esfuerzo por mi educación, ha hecho todo esto posible.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al PhD Diego Alejandro Camargo Trillos por su apoyo durante este proceso y el conocimiento compartido para la realización de este trabajo.

Agradecimientos a Jonathan León Rhenals, quien brindó su amistad y compañía durante el desarrollo de este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

1. RESUMEN.....	7
2. ABSTRACT	8
3. INTRODUCCIÓN.....	9
3.1. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA – (PERSPECTIVAS GENERALES)	10
4. JUSTIFICACIÓN.....	12
5. MARCO TEÓRICO/ ESTADO DEL ARTE	13
5.1. <i>HEAT PIPE</i>	14
5.2. <i>HEAT PIPE WICK</i>	15
5.3. COGENERACIÓN	15
5.4. CONDUCCIÓN.....	16
5.5. CONVECCIÓN	16
5.6. RADIACIÓN.....	16
6. ESTADO DEL ARTE	17
7. OBJETIVOS	19
7.1. OBJETIVO GENERAL.....	19
7.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19

8.	METODOLOGÍA.....	20
8.1.	PRIMERA ETAPA: ANÁLISIS TECNOLÓGICO DE <i>HEAT PIPES</i> Y PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO:.....	20
8.2.	SEGUNDA ETAPA ANÁLISIS TÉRMICO COMPUTACIONAL POR SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE <i>HEAT PIPE</i> Y PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO	24
8.3.	SIMULACIÓN DE PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO OPERATIVO CON DISIPACIÓN TÉRMICA CON <i>HEAT PIPE</i>	27
8.4.	TERCERA ETAPA VALORACIÓN DEL SISTEMA DE COGENERACIÓN:.....	28
9.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
9.1.	ANÁLISIS TECNOLÓGICO DE <i>HEAT PIPE</i>	33
9.2.	ANÁLISIS TECNOLÓGICO Y VALIDACIÓN ENERGÉTICA DEL PANEL SOLAR. 39	
9.3.	EVALUACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL <i>HEAT PIPE</i>	41
9.4.	SIMULACIÓN DE CONFIGURACIÓN <i>HEAT PIPE</i> - PANEL SOLAR	47
10.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:.....	54
11.	TRABAJO FUTURO.....	55
12.	REFERENCIAS.....	55

1. RESUMEN

A partir del auge del uso de las energías renovables en los últimos años, la energía fotovoltaica ha tomado un papel importante en la generación de energía eléctrica alrededor del mundo. Sin embargo, la eficiencia de transformación de energía en esta tecnología apenas alcanza un 20% para el 2020 en tecnologías comerciales, ocasionando que un 80% de la energía se transforme en energía térmica y se deseché al ambiente. Este trabajo evaluó el proceso de reciclado de *Heat pipe* (tubo disipador de calor) desde desechos tecnológicos cotidianos (Laptops) para su implementación en sistemas de recuperación de energía térmica desde los paneles fotovoltaicos. A partir de estudios fenomenológicos térmicos utilizando softwares comerciales (SolidWorks) se diseñó y evaluó diferentes dispositivos que permiten la concentración de energía térmica del panel y su disipación hacia una corriente de aire que permite su implementación en procesos cotidianos como el secado. Se seleccionará el dispositivo a partir de una evaluación multicriterio considerando la eficiencia en la recuperación de energía térmica, la calidad de la energía térmica recuperada y la temperatura operativa del panel fotovoltaico. Finalmente se desarrolló un diseño de detalle del dispositivo de recuperación de calor con *Heat pipe* y se validó su operación por medio de simulación computacional con validación experimental previa en la ciudad de Montería.

2. ABSTRACT

Since the boom in the use of renewable energies in recent years, photovoltaic energy has taken on an important role in the generation of electricity around the world. However, the efficiency of energy transformation in this technology barely reaches 20% by 2020 in commercial technologies, causing 80% of the energy to be transformed into thermal energy and discharged into the environment. This work evaluated the recycling process of *Heat pipe* (heat sink tube) from everyday technological waste (Laptops) for its implementation in thermal energy recovery systems from photovoltaic panels. From thermal phenomenological studies using commercial software (SolidWorks), different devices were designed and evaluated that allow the concentration of thermal energy from the panel and its dissipation into an air stream that allows its implementation in everyday processes such as drying. The device will be selected from a multi-criteria evaluation considering the efficiency in the recovery of thermal energy, the quality of the thermal energy recovered and the operating temperature of the photovoltaic panel. Finally, a detailed design of the heat recovery device with *Heat pipe* was developed and its operation was validated by means of computational simulation with previous experimental validation in the city of Montería.

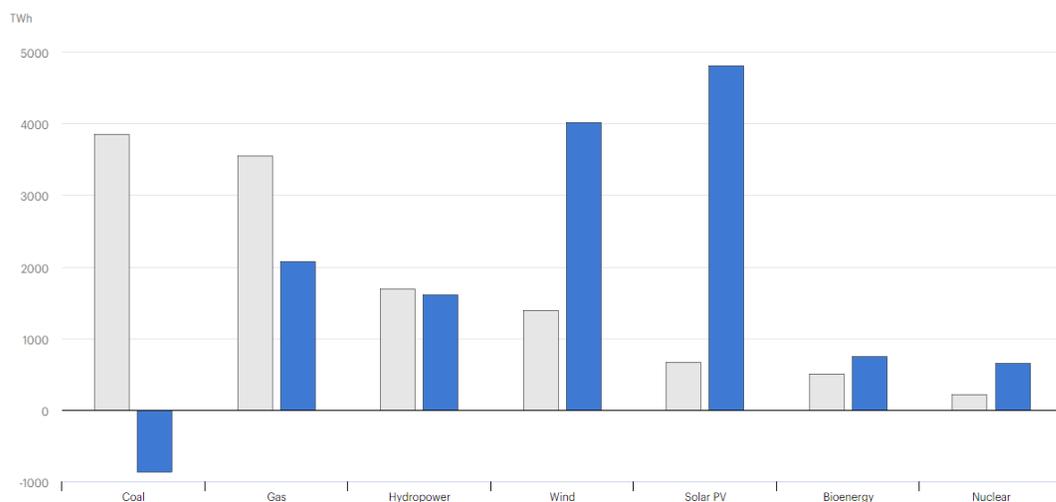
3. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de energías renovables al nivel mundial crece de manera exponencial con el pasar de los años. Dentro de este grupo de las energías renovables, encontramos la energía fotovoltaica, obtenida a partir de la transformación de energía solar en eléctrica.

Según la Agencia Internacional de la Energía (IEA) La energía solar fotovoltaica se convierte en el nuevo rey del suministro de electricidad y parece estar preparada para una expansión masiva. De 2020 a 2030, la energía solar fotovoltaica crece en un promedio del 13% por año, cubriendo casi un tercio del crecimiento de la demanda de electricidad durante el período (IEA, 2020). Por ello, la investigación de este tipo de tecnologías y su implementación forma parte de nuestra actualidad.

Figura 1

Cambio en la generación de electricidad mundial por fuente en el escenario de políticas declaradas, 2000-2040.

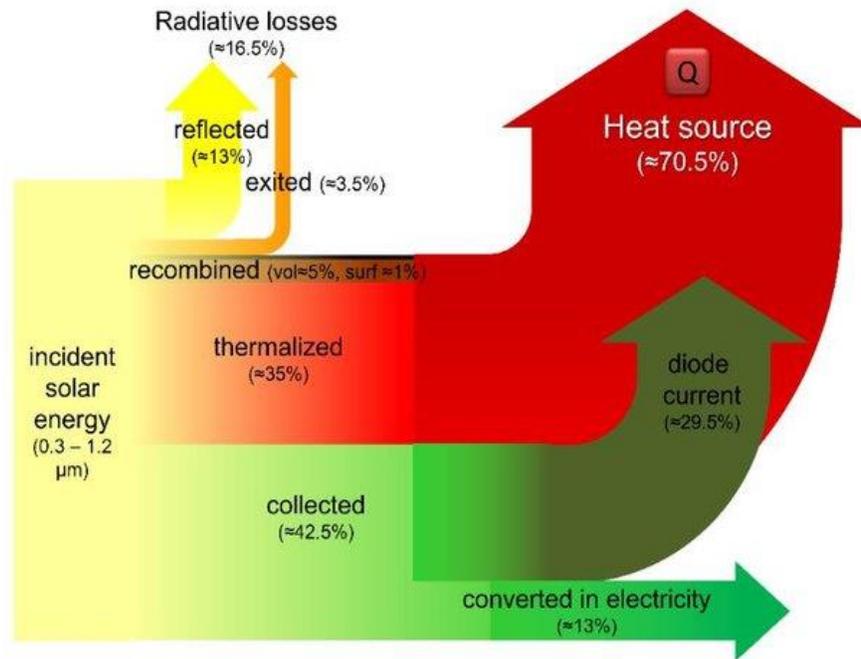


Nota: (IEA, 2020)

3.1. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA – (PERSPECTIVAS GENERALES)

Figura 2

Diagrama de Sankey de la distribución de la energía solar incidente sobre un dispositivo fotovoltaico.



Nota: Oliver Dupré

De acuerdo con la Figura 2, podemos observar que, en este caso, el 70.5% de la energía solar incidente, se convierte en calor. Y sólo el 13% logra convertirse en energía eléctrica. También se observa que las pérdidas por radiación y las recombinaciones, contribuyen a la fuente de calor, reduciendo así la eficiencia. Desde una perspectiva nacional, Colombia a pesar de encontrarse en una posición cercana al ecuador, condición favorable para el uso de esta tecnología, no representa ni el 1% de la capacidad instalada a nivel mundial. Cabe destacar que en Colombia el 57% de instalaciones se destinan para aplicaciones rurales y el 43% para torres de telecomunicaciones y señales de tránsito (SUNSUPPLY, n.d.). Pese

a que en Colombia el nivel de instalaciones en energía renovable es pobre en comparación con otros países que no cuentan con las mismas condiciones climáticas, en los últimos años el interés por el uso de energías fotovoltaicas ha dado un giro, de tan gran magnitud que la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) y el Ministerio de Minas y Energía estiman que para antes de 2030 cerca del 10% del consumo energético en Colombia va a provenir de proyectos fotovoltaicos o solares (CELSIA, n.d.). No obstante, el problema radica en el efecto de la temperatura en un panel solar pues sucede que según aumenta la temperatura ambiente, menor es la potencia de salida de un módulo fotovoltaico.

Hoy en día el uso de energías fotovoltaicas se ha visto limitado por los altos costos que ofrecen las celdas solares más eficientes, ya que, las celdas comerciales disminuyen su eficiencia, puesto que el aumento de temperatura causa que éstas acumulen calor y bajen su rendimiento los módulos fotovoltaicos presentan unas pérdidas de potencia del orden de un 4% por cada 10°C de aumento de su temperatura de operación (YUVA SOLAR, 2015)

Los *Heat pipes* son elementos cuyo principal uso es transportar calor de un componente hacia un disipador. Con frecuencia, estos son implementados en los sistemas de refrigeración de dispositivos electrónicos como computadores portátiles. Por otro lado, también se puede utilizar este elemento en sistemas de calefacción de agua. En Colombia, el mercado de computadores ha incrementado considerablemente en los últimos años. “. En el segmento de portátiles, que representan aproximadamente 85% del total mercado de consumo, el país llegó a más de 940.000 unidades de equipos vendidos en el último año, lo que representó un crecimiento de más de 20% respecto al año anterior.” (LORDUY, 2021).

Con base en esta información, se busca dar respuesta a la pregunta de: ¿Será posible diseñar un sistema de cogeneración que permita la recuperación de energía térmica en paneles solares comerciales a partir de *Heat pipes* reciclados?

Para resolver esta pregunta, fue necesario realizar un análisis tecnológico de los elementos (*Heat pipe* y panel solar), determinar un promedio de radiación de la ciudad de Montería, validar energéticamente el panel solar, diseñar por medio del Software computacional (*Solidworks*) el *Heat pipe* y el panel solar, evaluar la implementación del *Heat pipe* en el panel solar y también evaluar la configuración *Heat pipe* – panel solar. Con el sistema propuesto se pudo disminuir la temperatura del panel y recuperar esa energía térmica que afectaba de manera negativa al panel. Por otro lado, evaluando el sistema de cogeneración se obtuvo un balance de energía favorable en el cual la energía recuperada era utilizada para redireccionar el calor recuperado.

4. JUSTIFICACIÓN

El proyecto a realizar tiene como justificación que viendo el auge de las energías renovables alrededor del mundo y dentro de estas los sistemas de cogeneración que buscan la obtención de energía eléctrica y energía térmica. Trataremos de diseñar uno de estos sistemas dichos con anterioridad a partir de celdas fotovoltaicas, pero con la ayuda de *Heat pipes* reciclados ya que la idea es tomar esta alternativa y aplicarla a los módulos basados en celdas de silicio multicristalina, monocristalina y capa fina.

5. MARCO TEÓRICO/ ESTADO DEL ARTE

La eficiencia del panel solar es una medida de la cantidad de energía solar que cae sobre la superficie de un panel y se convierte en electricidad (Serrano & TRITEC INTERVENTO, 2020). La eficiencia de un panel solar se puede ver afectada por diversos factores como: la distancia entre celdas, el tipo de celda utilizada, interconexión de las celdas, incluso el color de la lámina posterior protectora puede influir en la eficiencia; Una lámina posterior negra absorbe más calor, lo que reduce la eficiencia de la celda.

Figura 3

Promedio de la eficiencia en distintos paneles solares.



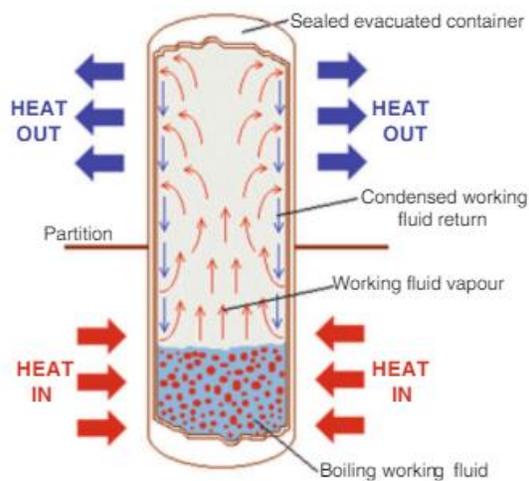
Nota: Clean energy reviews)

5.1. HEAT PIPE

También llamado tubo de calor, un *Heat pipe* es un conductor de calor muy eficiente. Un *Heat pipe* típico consiste en un recipiente en el que sus paredes internas están revestidas con una estructura de mecha. El recipiente del tubo de calor se aspira primero, luego se carga con un fluido de trabajo y se sella herméticamente. Cuando el tubo de calor se calienta en un extremo, el fluido de trabajo se evapora de líquido a vapor (cambio de fase). El vapor viaja a través del núcleo hueco del tubo de calor hasta el otro extremo del tubo de calor. Aquí, el vapor se vuelve a condensar a líquido y libera calor al mismo tiempo. Luego, el líquido regresa al extremo original del tubo de calor a través de la mecha por acción capilar. (Zohuri, 2016)

Figura 4

Representación esquemática del *Heat pipe*.



Nota: (Zohuri, 2016).

5.2. HEAT PIPE WICK

Es una estructura porosa hecha de materiales como acero, aluminio, níquel o cobre en varios rangos de tamaños de poros. El propósito principal de la mecha es generar presión capilar para transportar el fluido de trabajo desde el condensador al evaporador. También debe poder distribuir el líquido alrededor de la sección del evaporador a cualquier área donde es probable que el tubo de calor reciba calor (Zohuri, 2016).

Los tipos más comunes de mechas que se utilizan son los siguientes:

- (a) Tubo de ranura.
- (b) Malla de malla de alambre.
- (c) Polvo de metal sinterizado.

5.3. COGENERACIÓN

La cogeneración es una metodología a base de medios tecnológicos para generar electricidad y calor simultáneamente, incrementando la eficiencia del uso de la energía. También se le llama Combined Heat and Power (CHP) ya que la cogeneración produce calor y electricidad simultáneamente. (COGEN EUROPE, 2021). La cogeneración de energía ofrece varios beneficios entre los que se destacan:

- Incremento de la energía: La cogeneración es hasta un 40% más eficiente que la generación separada de calor y energía. (COGEN EUROPE, 2021)
- Emisiones más bajas: a cogeneración ahorra cada año 200 millones de toneladas de CO₂ en Europa gracias a su gran eficiencia (COGEN EUROPE, 2021)

- Reducción de costos energéticos: Los usuarios de la cogeneración se benefician de una mayor eficiencia y, por lo tanto, necesitan menos combustible para cubrir su demanda de calefacción y electricidad. (COGEN EUROPE, 2021)
- Apoya Energías renovables: La cogeneración puede funcionar con cualquier combustible renovable y es la forma más rentable de utilizar combustibles renovables. (COGEN EUROPE, 2021)

5.4. CONDUCCIÓN

La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes, menos energéticas, como resultado de la interacción entre ellas (Çengel)

5.5. CONVECCIÓN

La convección es el modo de transferencia de calor entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente que están en movimiento, y comprende los efectos combinados de la conducción y del movimiento del fluido. La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones), como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. Se cierra este capítulo con una discusión acerca de la transferencia simultánea de calor. (Çengel)

5.6. RADIACIÓN

La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones), como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. (Çengel)

6. ESTADO DEL ARTE

El uso de módulos fotovoltaicos significa un gran avance para la humanidad, sin embargo, aún existen distintas falencias en esta revolucionaria obtención de energía, dentro de ellos, es importante destacar la dependencia que existen entre la eficiencia con el aumento de temperatura, este factor ha sido motivo de investigaciones y modificaciones para mejorar el desempeño de un panel solar al momento de funcionar en condiciones reales.

A nivel mundial, podemos encontrar un panorama favorecedor, porque distintos especialistas han realizado estudios para mejorar la problemática anterior implementando un sistema que favorezca la disipación del calor en los módulos fotovoltaicos. En Chile, Sebastián Andrés Maggi Silva, realizó un trabajo de grado que busca determinar la distribución de temperatura al interior de un panel fotovoltaico para diseñar un disipador de calor que permita mejorar su rendimiento, donde se concluye que la temperatura máxima de la celda sin disipador sobrepasa los 40 [°C], mientras que con el disipador llega aproximadamente a casi los 26 [°C]. En términos de potencia, se concluyen un incremento hasta llegar casi a los 247 [W], con una eficiencia casi de 19[%], lo cual significa un aumento aproximado de 3 puntos porcentuales, lo cual es bastante. (MAGGI SILVA, 2013)

Otra investigación relacionada con el tema es la realizada en Perú por Wilder Efraín Eufracio Arias, Nathaly Ibeth Abregú Rodríguez y Dayana Rodríguez Espinoza en la cual se busca evaluar el comportamiento de la eficiencia en colector solar de tubos evacuados (CSTE) con y sin la implementación de *Heat pipes* y donde se concluyó luego de 46 experimentaciones durante 23 días que los resultados muestran una ligera superioridad de eficiencia del CSTE con tubo de calor (60,35%, 61,21% y 66,08%) comparado al sin tubo

de calor (57,17%, 57,29% y 59,56%), medidos en días soleados, parcialmente nublados y nublados, respectivamente. (Efraín Eufracio et al., 2019)

Adicional está el proyecto de grado en donde se estudia la relación de la temperatura de operación de un módulo fotovoltaico y su voltaje, es el realizado por Jorge Luis Pincay Lozada, en el cual se observó que los sistemas de refrigeración lograron con una temperatura máxima al inicio de 61,1°C para los paneles Monocristalinos disminuir ésta en un promedio de 16,61°C; de igual forma con una temperatura máxima inicial de 57,8°C para los paneles Policristalino se logró disminuir su temperatura superficial en un promedio de 14,68°C. (Lozada Pincay, 2017)

Daniel Eduardo Espinoza Polanco realizó una investigación que buscó modelar y analizar el fluido dinámico y la transferencia de calor de un disipador de aletas que permita disminuir las pérdidas por las altas temperaturas en el panel fotovoltaico, concluye que con el disipador de aletas si hubo una disminución de la temperatura y analizando también que el coste de la energía no fuera mayor lo cual fue algo que se alcanzó exitosamente. (ESPINOZA POLANCO, 2017)

Por otro lado, está el proyecto de Vicente Flores Lara, Jorge Bedolla Hernández, Marcos Bedolla Hernández, Ana Cristina Fernández Muñoz los cuales presentaron un sistema de aletas, las cuales fueron fabricadas y distribuidas con base a los números de Nusselt y Stanton. Comparan el sistema modificado con el sistema normal de paneles fotovoltaicos obteniendo mejoras en la eficiencia de hasta un 29%, la generación de energía aumento en un 1,4% con diferencias de temperaturas de hasta 20°C menor para el panel híbrido. (Hernández et al., 2019)

Por último, el trabajo de Juan Felipe Cardona Ospina y Gerson Alejandro Saavedra Molano en donde comparan los métodos más eficientes del control de la temperatura en módulos fotovoltaicos y su costo, llegando a una conclusión de que los sistemas híbridos (fotovoltaicos con refrigeración líquida, especialmente agua) los que alcanzaron una mayor eficiencia, logrando obtener mejoras de hasta el 40% en la generación de energía eléctrica, después de este se encuentra el método de enfriamiento geotérmico con un 25% pero siendo el doble de costoso que los sistemas híbridos. (OSPINA et al., 2019).

7. OBJETIVOS

7.1. OBJETIVO GENERAL

- Diseñar de elementos térmicos y mecánicos que permita la recuperación de energía térmica solares comerciales a partir de *Heat pipes* reciclados.

7.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los *Heat pipes* reciclados obtenidos de computadoras portátiles y la eficiencia energética global de un panel fotovoltaico en condiciones reales de operación como punto de partida para delimitar la capacidad de cogeneración de energía (validación de panel fotovoltaico).
- Evaluar el efecto térmico de la implementación de *Heat pipes* en un panel fotovoltaico a partir de herramienta de simulación computacional (análisis tecnológico de *Heat pipes* teórica hasta simulaciones de *Heat pipes* térmicas)

- Valorar a través de técnicas computacionales el diseño propuesto para la cogeneración de energía a partir de la implementación de *Heat pipes* en paneles fotovoltaicos.

8. METODOLOGÍA

La metodología aplicada en este proyecto es, en base a su grado de investigación exploratoria y descriptiva, por lo que los resultados que se obtendrán generarán una visión aproximada del alcance con el desarrollo propuesto. Así mismo, se clasifica en el tipo de investigación descriptiva puesto que la investigación consiste en el análisis de de la transferencia de calor que se da entre el *Heat pipe* y el panel solar, con el fin de establecer su comportamiento. Por otro lado, teniendo en cuenta la estrategia que se utilizará para responder al problema planteado la investigación entra en la clasificación de experimental.

Se proponen 3 etapas para el desarrollo del proyecto: Análisis tecnológico de componentes (*Heat pipe* y panel solar), evaluación de la implementación del *Heat pipe* al panel solar y por último valoración del sistema de cogeneración.

8.1. PRIMERA ETAPA: ANÁLISIS TECNOLÓGICO DE *HEAT PIPES* Y PANEL SOLAR

FOTOVOLTAICO:

Se adquirieron los materiales necesarios para el análisis. Se obtuvieron los *Heat pipes*, posteriormente se verificó su estado operativo y se procedió al análisis de estos con el fin de definir su potencia térmica y así obtener las variables de calor específico, conductividad térmica y densidad que se utilizaron en la simulación de los tubos. Para ello se usó una calculadora técnica de *Heat pipe* para determinar la potencia máxima de un *Heat pipe* en

función de su temperatura de operación, ésta fue proporcionada por la empresa ADVANCE COOLING TECHNOLOGY.

La conductividad térmica de un material es una propiedad que mide la capacidad de estos para conducir el calor. Para la obtención de esta fue necesario aplicar la Ec.1 estableciendo la potencia máxima Q_{max} de calor transportado.

$$Q_{max} = -K \cdot A_s \cdot \frac{dT}{dx} \quad \text{Ec.1}$$

Donde:

K: Conductividad

A_s : Área transversal

X: El eje axial

T: La temperatura.

Despejando la conductividad de la Ec. 1 podremos estimar su valor teórico desde el análisis térmico como se presenta la Conductividad térmica en la Ec.2

$$K = \frac{Q_{max}}{A_s} \cdot \frac{dx}{dT} \quad \text{Ec.2}$$

Se remplazaron los valores obteniendo los resultados expuestos en la tabla (Tabla 3). Adicional a las variables de la Ec.1 y Ec.2, también se calculó el calor específico ponderado y la densidad ponderada, para el cálculo de estas, fue necesario hallar la fracción másica de cada material (cobre, agua y otros) que conforman cada *Heat pipe*, para ello, se utilizó la Ec.3 Fracción másica.

$$X = \frac{m_{material}}{m_{TOTAL}} \quad \text{Ec.3}$$

Donde:

X: Fracción Volumétrica del material.

$m_{material}$: Masa de material contenida en el *Heat pipe*

m_{TOTAL} : Suma de todas las masas.

En base a los resultados obtenidos, se aplicó la Ec.4 para obtener el calor específico ponderado y la densidad ponderada.

$$Cp - p = X \cdot Cp \quad \text{Ec.4}$$

Donde:

Cp-p: Calor específico ponderado del material.

X: Fracción másica del material.

Cp: Calor específico del material.

Se tomó como referente el panel solar de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Montería. Se realizaron las medidas correspondientes al panel como se presenta en la Tabla 1 para poder evaluar las condiciones operativas, simular el panel en SolidWorks y ver su comportamiento.

Tabla 1

Tabla de dimensiones y propiedades del panel solar

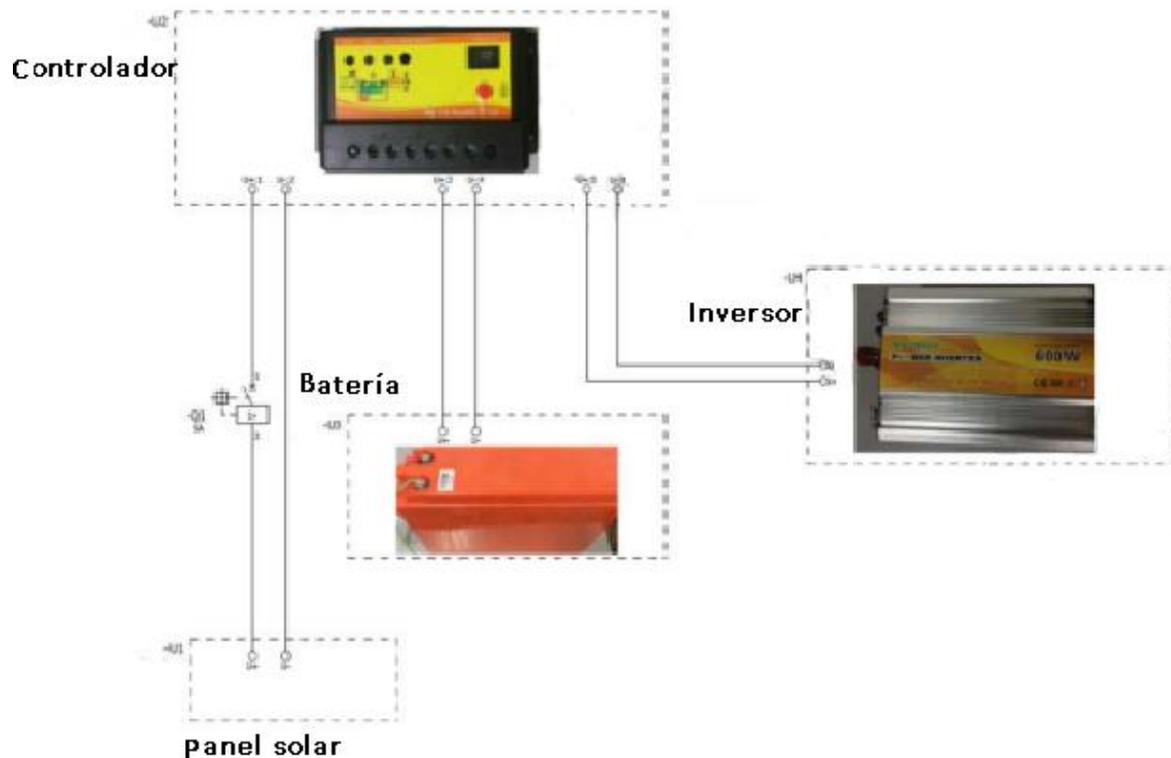
	Ancho (cm)	Potencia máxima (W)	
	80	200	
	Alto(cm)	Tensión máxima del sistema (V)	
	150	1000	
	Espesor (cm)	Tipos Célula	
	1	Monocristalino	
Material	Número de Células		
Silicio	72		

Con el fin de validar el comportamiento de los paneles solares y el efecto que produce el aumento de temperatura en la generación de energía de estos. Se evaluaron las características técnicas operacionales por medio de mediciones de las condiciones operativas reales: La radiación, temperatura ambiente, velocidad de viento y presión atmosférica fueron monitoreadas por una estación Davis Instruments 6163 Vantage Pro2 Plus Tiempo Inalámbrico. El seguimiento de temperatura en distintos puntos del panel se realizó con termocuplas de superficie y un Datalogger de temperatura Extech SDL200 de cuatro canales y un panel solar.

Para la toma de datos se utilizó la siguiente configuración electrónica, ver (Figura 10) que consta de: un controlador, un inversor, una batería, un panel solar. y para la medición de estos fue necesaria la ayuda de un multímetro, resistencias eléctricas, suministros eléctricos, sensor de temperatura y humedad del aire, piranómetro y un anemómetro.

Figura 5

Configuración utilizada para la toma de datos.



El voltaje y amperaje fue medido en la salida del panel por medio de un multímetro y sus termocuplas.

8.2. SEGUNDA ETAPA ANÁLISIS TÉRMICO COMPUTACIONAL POR SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE *HEAT PIPE* Y PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO

Se realizó un estudio térmico por medio de SolidWorks, donde se evaluó el efecto sobre la eficiencia del panel por de la implementa un ensamble *Heat pipe* con el fin de analizar el efecto térmico que este genera en dicho dispositivo, con el propósito de obtener información de condiciones de simulación computacional y valores previos de temperaturas de

operación que sirvieran como guía para evaluar la viabilidad del sistema. Validación de simulación de panel solar fotovoltaico operativo

Conociendo las dimensiones del panel se construyó diseño asistido por computador a simularlo y realizarle un análisis térmico. Para este análisis se tuvo en cuenta el material del que están fabricadas las celdas del panel (silicio) y las siguientes consideraciones de acuerdo con un estudio térmico realizado en la universidad. Ver Tabla 2

Tabla 2

Consideraciones térmicas y propiedades del panel solar utilizadas para simulación.

Coeficiente de convección (W/m ² .K)	Promedio de radiación(W/m ²)	Cp(J/Kg°k)	ρ (m) kg/m ³	K(W/m.K)
7.98	685	700	2330	124

Figura 6

Simulación del panel solar



Figura 7

C.F. 1 Potencia unidad de Área superficie superior (W/m²)

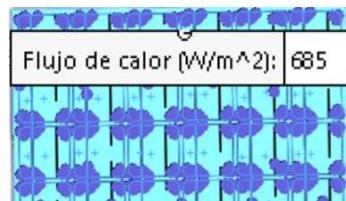


Figura 8

C.F. 2 Convección hacia medio ambiente

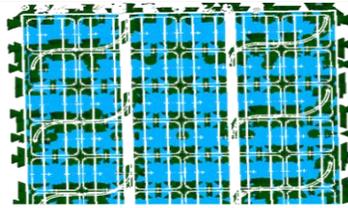
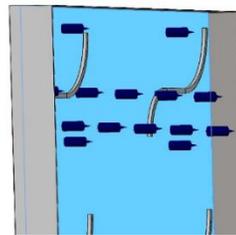


Figura 9.

C.F. 3 generación trabajo eléctrico



Para simular esta configuración, fue necesario implementar 3 distintas condiciones de frontera (C.F) que contribuyeran a acercar la simulación a condiciones reales, en primer lugar, C.F.1. Ver (Figura 7) se impuso una condición de contorno Potencia unidad de área equivalente 685 W/m^2 para simular la radiación. Por otro lado, la C.F. 2, se empleó una condición de convección de $7.98 \text{ W/ (m}^2\text{.K)}$. y una temperatura ambiente de 303 K en todas las superficies expuestas al ambiente, coeficiente convectivo estimado para la velocidad de viento promedio en el panel. Ver (Figura 8). Por último, la C.F. 3 se consideró un flujo de potencia equivalente al trabajo eléctrico producido según la eficiencia promedio del panel equivalente a 80 . Ver (Figura 9).

8.3. SIMULACIÓN DE PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO OPERATIVO CON DISIPACIÓN TÉRMICA CON *HEAT PIPE*.

Se simuló la implementación del *Heat Pipe* al panel solar como herramienta para evaluar los potenciales diseños del dispositivo. A continuación, se realiza una descripción detallada de las condiciones de frontera adicionales a las expuestas anteriormente para evaluación térmica de panel solar con disipación por *Heat pipes*.

Figura 10

C.F. 4 Unión rígida entre panel y *Heat pipe*

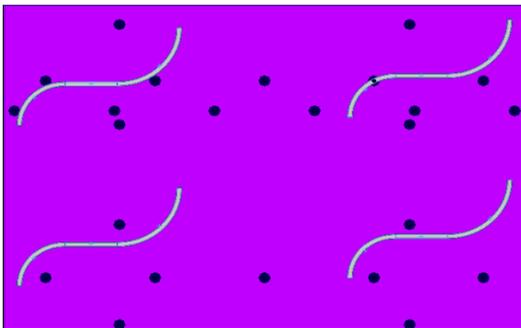
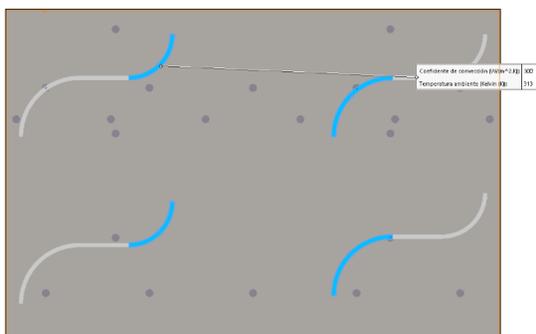


Figura 11

C.F. 5 Convección forzada entre sección de *Heat pipe* y aire dentro del tubo a la literatura.



En la C.F. 4 se supone un contacto con gel térmico de alta calidad, lo que ofrece una condición de contorno aproximada a Unión rígida contacto perfecto. Ver (Figura 10). En la C.F. 5 Se impuso una convección forzada en la sección del *Heat pipe* que está en contacto con el ducto por donde fluirá el aire que direccionará el calor recuperado. Para definir cuál sería el flujo que se inducirá en los ductos, nos apoyamos en la literatura (Transferencia de Calor y masa Yunus A Çengel). Se escogió el valor de convección forzada de gases de $250 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ puesto que, lo que recorrerá por el ducto sería aire caliente. Ver (Figura 11). Adicional a las cargas térmicas, también fue necesario definir condiciones de contacto entre componentes para crear condiciones reales. Para crear los contactos entre componentes fue necesario antes realizar algunas configuraciones como: unión rígida y contacto global.

8.4. TERCERA ETAPA VALORACIÓN DEL SISTEMA DE COGENERACIÓN:

En esta última etapa se evaluó un diseño conceptual del sistema de cogeneración para validar teóricamente la viabilidad técnica de su implementación. El sistema inicial propuesto consta de la implementación de los 2 ventiladores que son los que redireccionarán el aire caliente, 2 canales semiesféricos para transferencia de calor entre *Heat pipe* - aire, la implementación de 12 *Heat pipes*. Con este sistema se espera inducir un flujo de aire que permita la transferencia de calor entre el *Heat pipe* - aire por convección forzada y el calentamiento del aire a temperatura ambiente hasta la condición de térmica del panel.

A continuación, se muestra el análisis realizado con el fin de determinar el caudal de aire necesario para lograr el flujo de aire requerido para un coeficiente convectivo de $250 \text{ (W/m}^2 \text{ K)}$. La Ec.5 muestra la relación de flujo másico y densidad necesarios para estimar el caudal de aire.

$$Caudal = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad \text{Ec.5}$$

En primer lugar, se definen valores de propiedades del aire necesarias para el cálculo del número de Reynolds, Nusselt y con ellos, posteriormente, calcular la velocidad y el flujo másico. La Tabla 3 muestra las propiedades del aire necesarias para realizar el cálculo estimado a una temperatura promedio de 313K. Estas propiedades se obtuvieron mediante el Software Computacional Engineering Equation Solver (EES).

Tabla 3

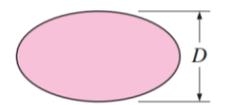
Propiedades del aire

Parámetro	Valor	Unidades
Densidad	1.0291	kg/m ³
Conductividad	0.029507	W/m -K
Prandtl	0.70248	N/A
Viscosidad	0.00002055	Pa-s

Con las propiedades anteriores definidas, se procede a calcular el número de Reynolds y Nusselt, estos, se obtuvieron mediante las correlaciones empíricas para convección forzada sobre cilindros elípticos. Ver (Ilustración 1)

Ilustración 1

Correlaciones empíricas para el número de Nusselt promedio, para convección forzada sobre cilindros circulares y no circulares en flujo cruzado

Elipse 	Gas	2 500-15 000	$Nu = 0.248Re^{0.612} Pr^{1/3}$
---	-----	--------------	---------------------------------

Nota: (Zukauskas, Ref. 14, y Jakob, 1949)

El número de Nusselt, se estimó teniendo en cuenta la relación entre el coeficiente de convección, la longitud corregida y la conductividad como:

$$Nu = \frac{h \times L_c}{K} \quad \text{Ec.6}$$

h es el flujo de calor requerido para coeficiente convectivo, L_c es la longitud característica y K la conductividad.

Con respecto al número de Reynolds, la Ec.7 Muestra el cálculo de este.

$$Re = \left(\frac{Nu}{0.248 \times Pr^{\frac{1}{3}}} \right)^{1/0.62} \quad \text{Ec.7}$$

Pr es Prandtl, Nu es el número de Nusselt.

La Ec. 8 muestra el cálculo de la velocidad del aire que recorrerá el ducto como:

$$V = \left(\frac{Re \times \mu}{\rho \times L_c} \right) \quad \text{Ec.8}$$

Re es el número de Reynolds, μ Viscosidad, ρ Densidad y L_c Longitud característica.

Por último, se calculó el flujo másico como el producto de la densidad, la velocidad y el área del ducto por donde circularía el aire como

$$\dot{m} = \rho \times V \times A \quad \text{Ec.9}$$

ρ es la Densidad, V corresponde a la Velocidad y A es el área del ducto.

Finalmente, con las variables anteriores, se realizó el cálculo del caudal, con la ecuación 5, que muestra el caudal como la relación entre \dot{m} que es el flujo másico y ρ que es la densidad.

La Tabla 4 muestra los resultados del análisis para el cálculo del Caudal.

Tabla 4

Resultado de los valores utilizados para el cálculo de caudal

Parámetro	Valor	Unidad
Nu Nusselt	25.4176975	N/A
Re Reynolds	2338.64	N/A
V Velocidad	15.566749	m/s
\dot{m} Flujo másico	0.02264738	kg/s
Caudal	0.02200697	m ³ /s

Para efectos de elección del equipo que generaría el caudal necesario, fue necesario convertir el valor de Caudal a CFM obteniendo un valor de 46.63135 CFM. Con esto se buscó un ventilador que cumpliera con los requisitos de este CFM.

Luego con la información suministrada por el fabricante del panel con el que se trabajó, dice que la potencia del panel disminuye 0.44%/°C (CAMBIO ENERGÉTICO, 2022) una vez superados los 25°C temperatura de referencia para la que se caracteriza la potencia máxima de la celda fotovoltaica. En base a esta información se calculó cuánto porcentaje de potencia se está perdiendo en el panel por el aumento de la temperatura con y sin la implementación del *Heat pipe* mediante la siguiente ecuación

$$-0.44 \frac{\%}{^{\circ}\text{C}} \times (T_{op} - 25) = \%P_p \quad \text{Ec.10}$$

Donde

T_{op} : Temperatura operación alcanzada por el panel fotovoltaico

$\%P_p$: Porcentaje de potencia perdido.

Con el porcentaje de potencia perdida, se habla el porcentaje de potencia real que producirá el panel, por medio de la Ec.11 En primer lugar, hallamos el porcentaje de potencia real.

$$100 - \%P_p = \%P_r \quad \text{Ec.11}$$

Donde

$\%P_r$: Porcentaje de potencia real.

Dado que la potencia máxima del panel es de 200 W, hallamos la potencia real producida por el panel por medio de la Ec.12.

$$200W * \left(\frac{\%P_r}{100}\right) = P_r \quad \text{Ec.12}$$

Adicional a ello, se realizó un análisis de los resultados para determinar cuánto aumento la eficiencia del panel a través de la siguiente ecuación.

$$\text{Eficiencia Panel FV (\%)} = \frac{P_m}{L \times A \times 1000 \frac{W}{m^2}} 100\% \quad \text{Ec.13}$$

Donde

P_m : Potencia máxima obtenida por la operación del panel

L : Longitud del panel

A : Ancho del panel

La potencia máxima se tomó como la potencia real producida por el panel con y sin *Heat pipe*, luego se realizó la diferencia entre estas dos eficiencias y se obtiene el aumento en la eficiencia global.

9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

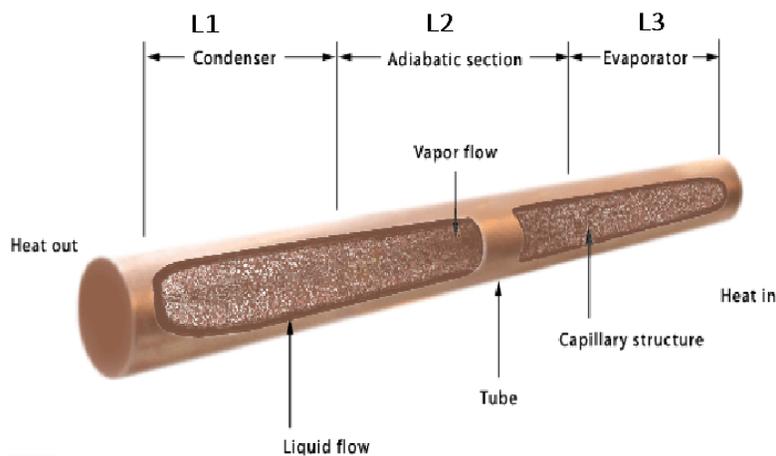
A continuación, se presentan los resultados obtenidos con la implementación metodológica anteriormente descrita.

9.1. ANÁLISIS TECNOLÓGICO DE *HEAT PIPE*

Para poder utilizar la calculadora fue necesario definir las dimensiones del *Heat pipe* y sus zonas de operación (zona de evaporación, condensación y adiabática). Ver Figura 12

Figura 12

Zonas de trabajo del *Heat pipe*.



Donde:

L1: Zona de condensación.

L2: Zona adiabática.

L3: Zona de evaporación.

Luego de definir las dimensiones se procedió a calcular la potencia máxima obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 5

Dimensiones de *Heat pipe*

Modelo	L1 (cm)	L2(cm)	L3(cm)	As(m2)
 A1	6	4	19	0.00043937
 A2	7	9,5	24,5	0.00104458
 A3	6	7.5	24	0.00082467

Donde:

L1: Longitud del evaporador.

L2: Longitud del condensador.

L3: Longitud total del *Heat pipe*.

Figura 13

Gráfica temperatura de operación vs potencia máxima (Q máx). Heat pipe A1

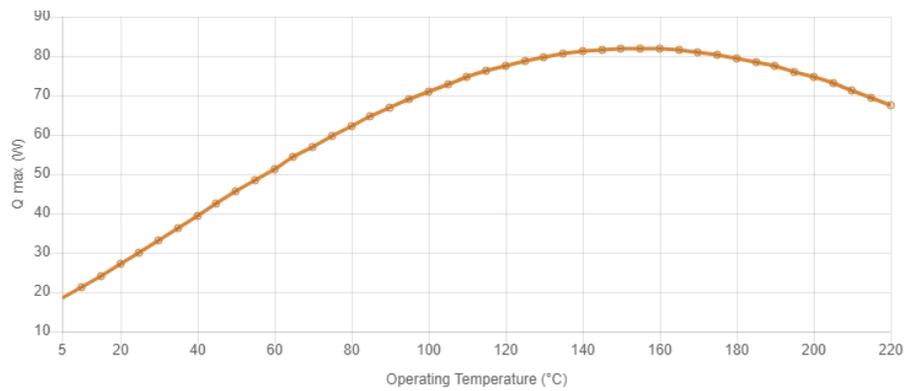


Figura 14

Gráfica temperatura de operación vs potencia máxima (Q máx). Heat pipe A2

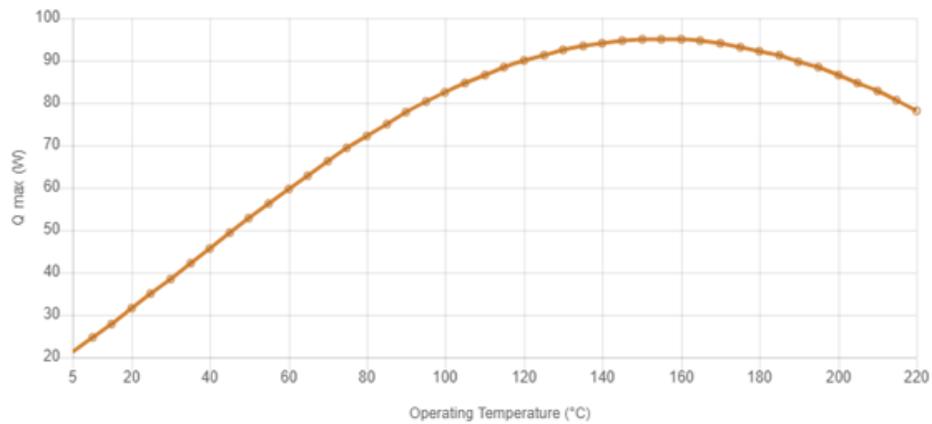
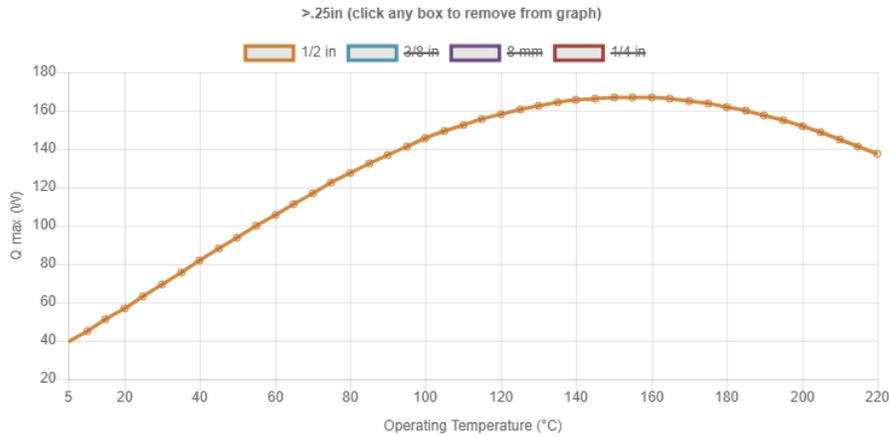


Figura 15

Gráfica temperatura de operación vs potencia máxima (Q máx). Heat pipe A3



Se definieron las temperaturas de trabajo del panel solar (60°C y 80°C), y así poder definir la temperatura máxima de operación y la potencia correspondiente para esta temperatura.

La temperatura de operación más alta fue de 80°C y en base a esta, se definió el Q max para cada caso. Ver (Tabla 6).

Tabla 6

Potencia máxima correspondiente a temperaturas de operación de Heat pipe A1, A2 y A3

Temperatura de operación. (°C)	Qmax (W)
<i>Heat pipe A1</i>	
60	51.2
65	54.5
70	57.2
75	59.6
80	62.4
<i>Heat pipe A2</i>	
60	60.4
65	63.6
70	66.7
75	70
80	72.7
<i>Heat pipe A3</i>	

60	109
65	114
70	121
75	126
80	131

Se determinaron las propiedades térmicas de cada *Heat pipe* que se tuvieron en cuenta al momento de la simulación. Ver (Tabla 7)

Tabla 7

Propiedades térmicas de Heat pipe A1, A2 y A3

Modelo	Q(W)	Cp(J/Kg°k)	ρ (m) g/cm ³	K(W/m.K)
A1	62.4	386.45	8.957001195	92.04
A2	72.7	386.17	8.957674231	138.29
A3	131	386.43	8.959406328	233.48

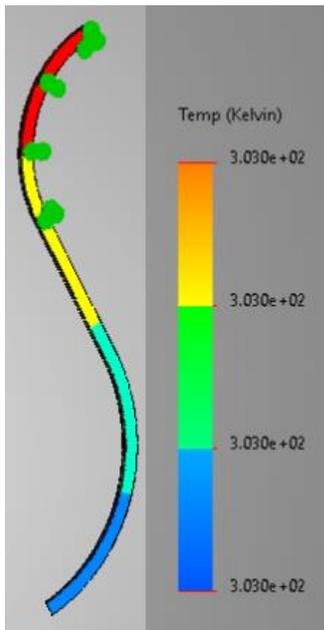
Trabajando con los *Heat pipes* se apreció cómo a pesar de ser un producto reciclado, este mantiene su estado operativo, lo que refleja que tiene una larga vida útil.

Con la simulación ver (Figura 16) también se logró corroborar la condición de súper conductor del *Heat pipe* induciéndole calor sólo en la zona de evaporación y viendo cómo

este se distribuía uniformemente a través de la zona adiabática y de condensación.

Figura 16

Simulación *Heat pipe*



Por otro lado, la conductividad de los *Heat pipes* varió dependiendo de la potencia de cada modelo, lo cual está ligado a las dimensiones de cada uno.

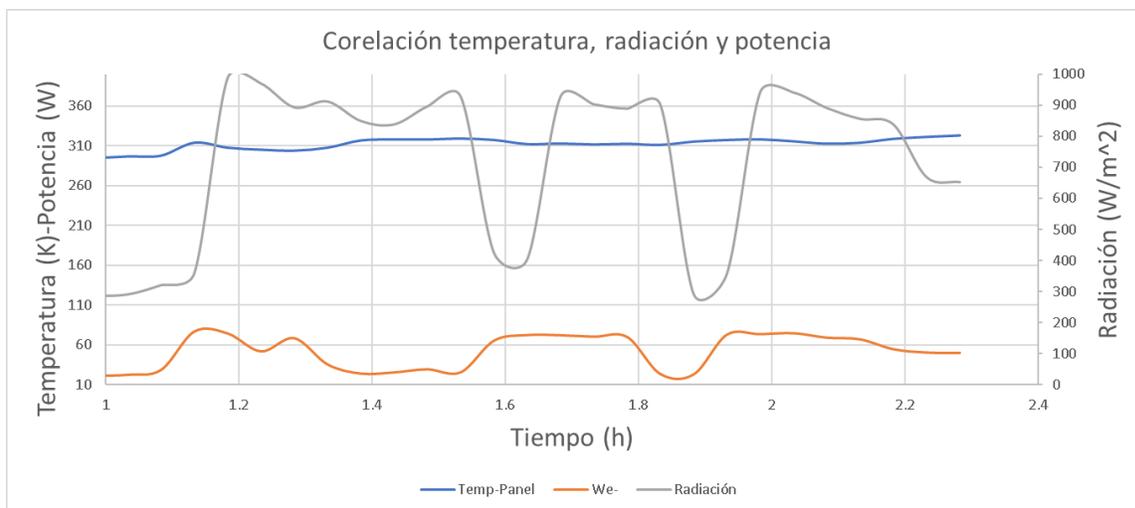
Se observa que es positivo el resultado, la hipótesis es validada positivamente, sin embargo, es posible optimizar el sistema de cogeneración implementando una configuración distinta de los *Heat pipes* donde varíe su ubicación, cantidad por unidad de área y que tipo de *Heat pipe* se recupere, también modificando variables térmicas y físicas como el coeficiente convectivo o el fluido de trabajo.

9.2. ANÁLISIS TECNOLÓGICO Y VALIDACIÓN ENERGÉTICA DEL PANEL SOLAR.

Se recolectaron datos del panel, expuesto a condiciones reales en horas donde la radiación alcanza sus puntos máximos, con el fin de aprovechar estas horas los datos se recolectaron cada 5 minutos. Se obtuvieron variables como: Velocidad del viento, radiación solar, las temperaturas de las superficies del panel solar (Parte delantera y trasera), voltaje y el amperaje, estas variables también se utilizaron para realizar una simulación del panel solar con condiciones lo más reales posibles. Con las variables recolectadas se calculó y graficó la eficiencia junto con los datos de radiación y temperatura con respecto al tiempo. Ver (Figura 17)

Figura 17

Correlación temperatura, radiación y potencia.



Se puede observar que, al inicio, cuando el panel se está calentando, aumenta la temperatura por efecto de la radiación, esto hasta llegar al pico de radiación, luego la temperatura se mantiene constante y la radiación varía, dado que el panel ha absorbido la mayor radiación en un lapso de tiempo, esta temperatura provoca que al panel se le dificulte

producir más energía, lo que se traduce como una disminución en la eficiencia. Este fenómeno de absorción de radiación que, posteriormente se convierta en calor (aumento de la temperatura en el panel) se evidencia al momento de la toma de datos que cuando había nubes y no llegaban al panel los rayos solares directamente, la eficiencia y radiación disminuían, pero la temperatura se mantenía considerablemente constante.

Estos fueron los promedios de las variables que se recolectaron. Ver (Tabla 8)

Tabla 8

Promedios de variables recolectadas

	Velocidad del viento (m/s)	Radiación solar	Temperatura PV (K)	Temperatura ambiente (K)	Voltaje (V)	Amperaje (A)	Potencia (W)
Promedio	0,51	795,84	325,97	306,7	12,28	3,92	50,74

Los resultados de estas variables se ven reflejados en la Figura 17, ya que muestran como la temperatura y el trabajo eléctrico varían de acuerdo con las condiciones ambientales que se estén dando en determinado tiempo, como: El viento, temperatura ambiente y radiación.

De acuerdo con los datos recolectados, se realizó una simulación térmica del panel solar, donde se obtuvieron los siguientes resultados:

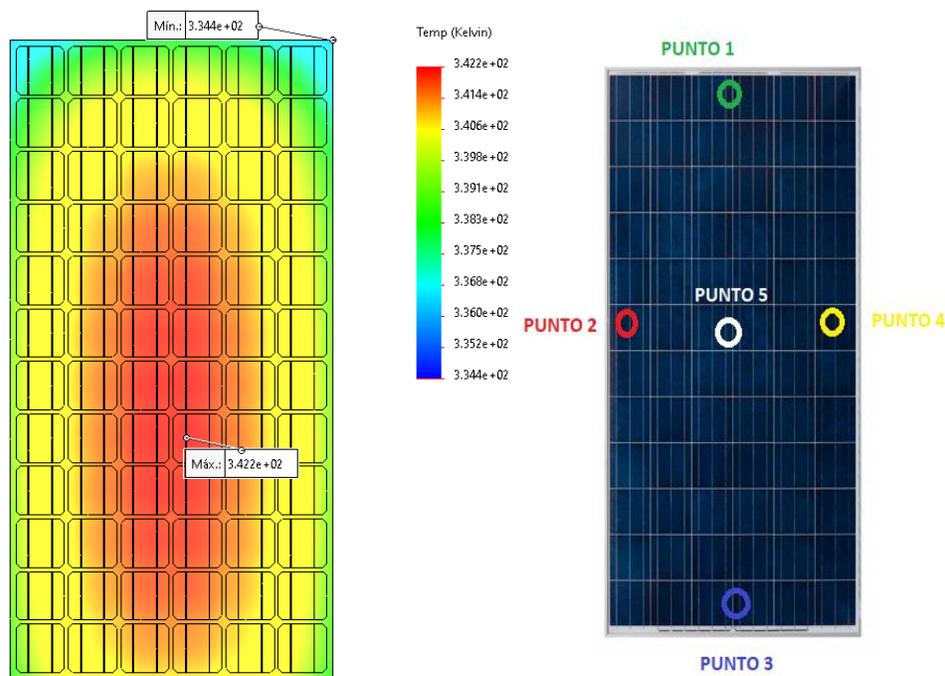
Tabla 9

Distribución de temperaturas en el panel solar

Temperaturas en superficies de panel solar				
Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
338,56	338,76	335,02	337,92	339,78

Figura 18

Resultados estudio térmico



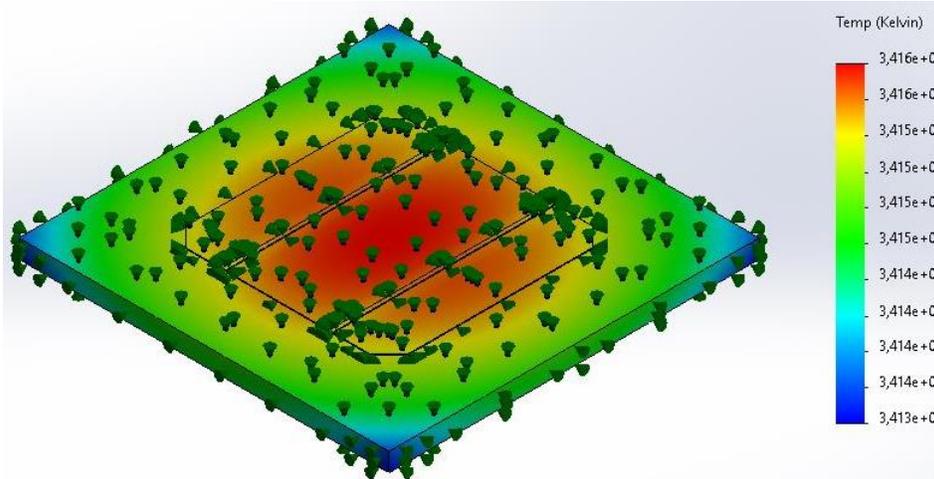
Luego de realizado el análisis térmico del panel solar se puede evidenciar que la temperatura más alta que este experimenta es de aproximadamente 342.2°K debido a la radiación que hay en la ciudad de Montería.

9.3. EVALUACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL *HEAT PIPE*

En este estudio se implementaron los *Heat pipes* obtenidos y analizados anteriormente, además, la celda que se utilizó tiene las mismas consideraciones térmicas del panel solar analizado.

Figura 19

Celda solar sin Heat pipe.



El primer estudio fue realizado a la celda individual, en condiciones operativas normales, a fin de obtener la temperatura máxima que alcanzaría esta sin la implementación de ningún disipador de calor, obteniendo una temperatura máxima de: 341.6 °K, este resultado se contrastó con las temperaturas del panel solar real y el panel simulado. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 10

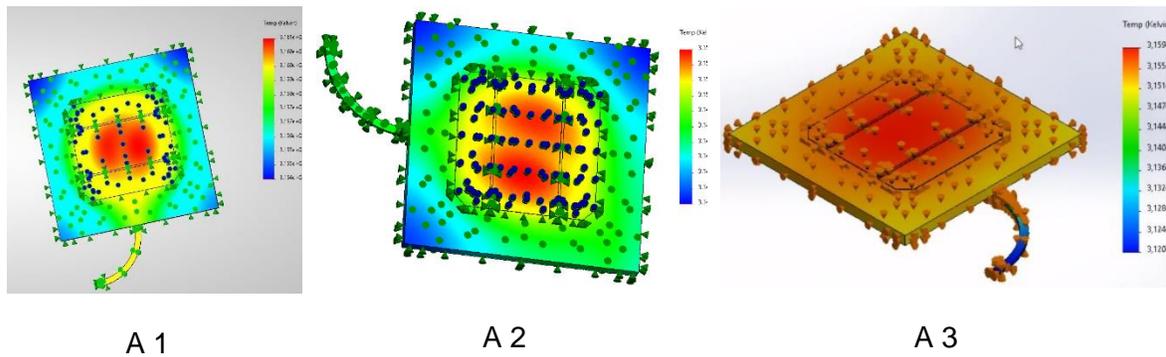
Comparativa de temperaturas simulación, experimental y celda individual simulada

	Experimental	Panel Simulado	Celda Individual
Temp PV –Max (K)	342.15	342.2	341.6
Temp PV-prom (K)	325.97	338.3	341.4

Se puede observar que las temperaturas máximas y promedio son más bajas para la prueba experimental porque a pesar de que los datos se tomaron en horas pico influía la velocidad del viento, además en contraste con radiaciones de 900 y hasta 1000 W/m² había radiaciones de 200 W/m² por la aparición de nubes. Estos aspectos en la simulación no

son considerados puesto que es una prueba en estado estacionario lo cual mantiene valores constantes.

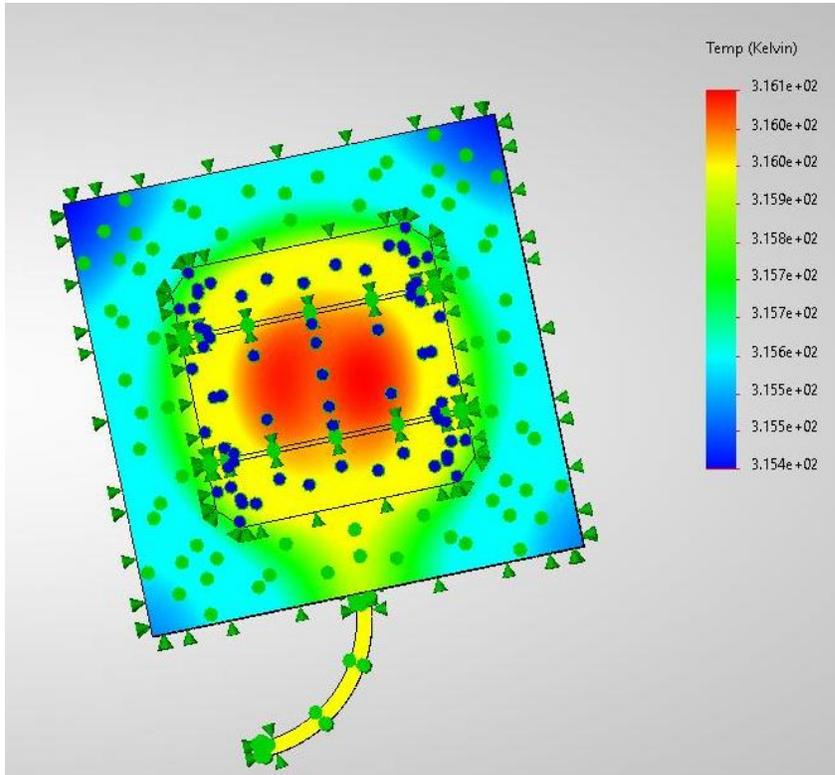
Luego se realizó el mismo estudio en la celda, pero esta vez implementando los 3 tipos de *Heat pipes* antes analizados (A1, A2 y A3), una vez ejecutado el estudio se extrajeron los siguientes resultados. Ver (Figura 20,21,22)



En primer lugar, se impuso el *Heat pipe* A1 obteniendo el siguiente resultado.

Figura 20

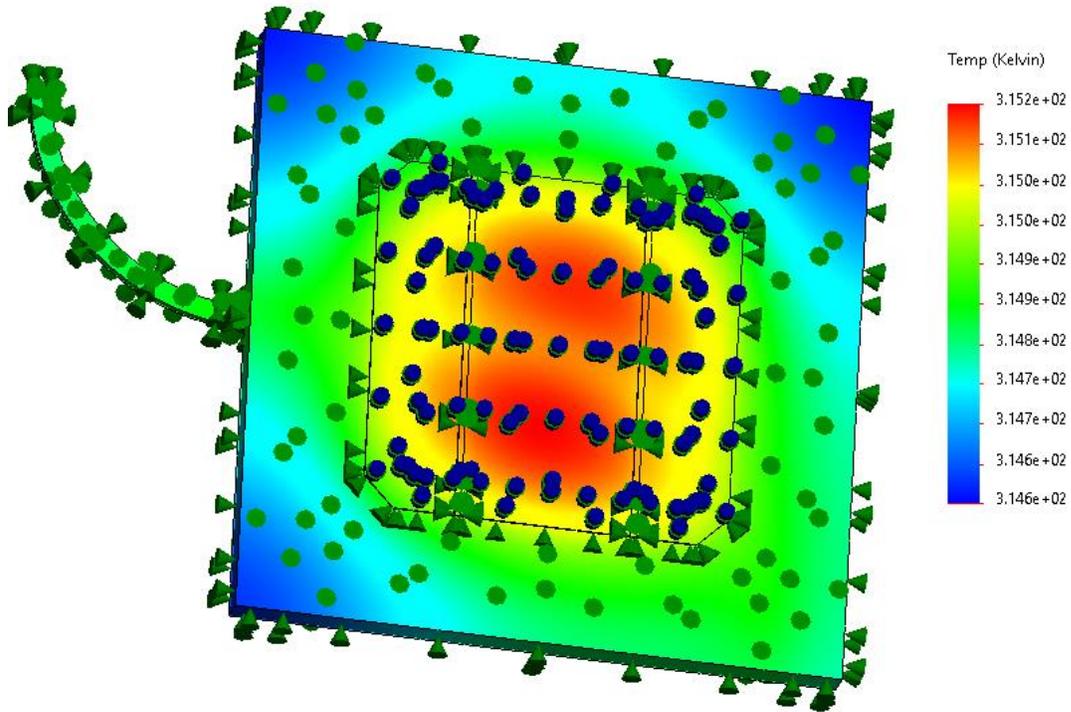
Efecto térmico *Heat pipe* A1.



En segundo lugar, se realizó el estudio térmico, esta vez ensamblando el *Heat pipe* A2 a la celda solar. Los resultados se muestran en Figura 21

Figura 21

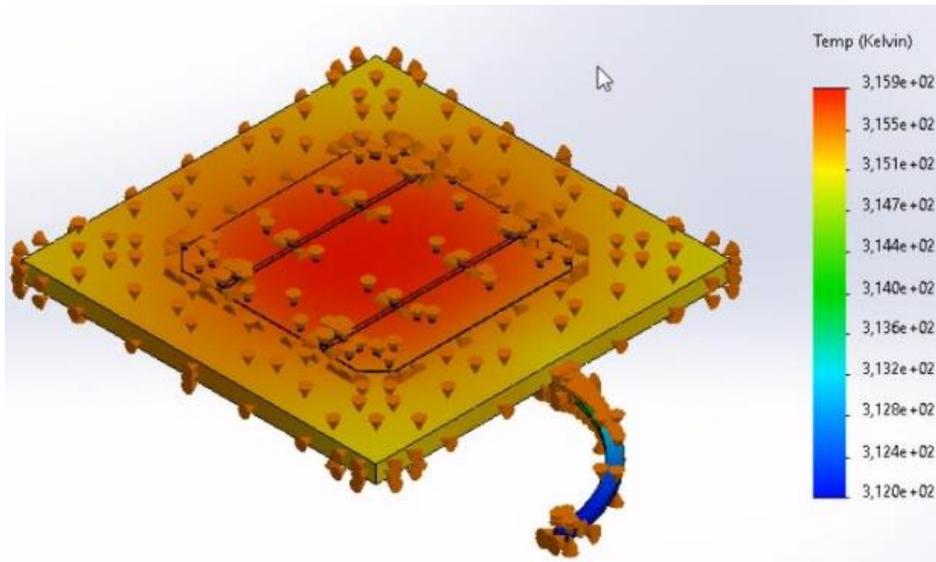
Efecto térmico Heat pipe A2.



Por último, se realizó el estudio térmico con el *Heat pipe* A3. Obteniendo el siguiente resultado

Figura 22

Efecto térmico *Heat pipe* A3.



Con este estudio, se evidenció el efecto de disipación que genera el *Heat pipe* en la celda, puesto que hubo una disminución de la temperatura máxima de hasta 26 grados, para el *Heat pipe* A2 y A3, y una disminución de 25 grados para el *Heat pipe* A1. Dado que, por términos de practicidad, se realizará la simulación con un solo modelo de *Heat pipe* se escogió el A3 dadas sus propiedades térmicas, para obtener una mejor simulación.

Tabla 11

Comparativo temperaturas de módulo con *Heat pipes*

	Celda Individual-Heat-A1	Celda Individual-Heat-A2	Celda Individual-Heat-A3
Temp PV – Max(K)	316.1	315.2	315.9
Temp PV-prom(k)	315.74	314.8	313.8

Con las simulaciones de la configuración *Heat pipe* - panel solar, se pudo observar que si una parte del *Heat pipe* está expuesta al ambiente el calor disipado será entregado a este mismo, además que un *Heat pipe* puede abarcar varias celdas siempre y cuando tenga donde entregar ese calor disipado.

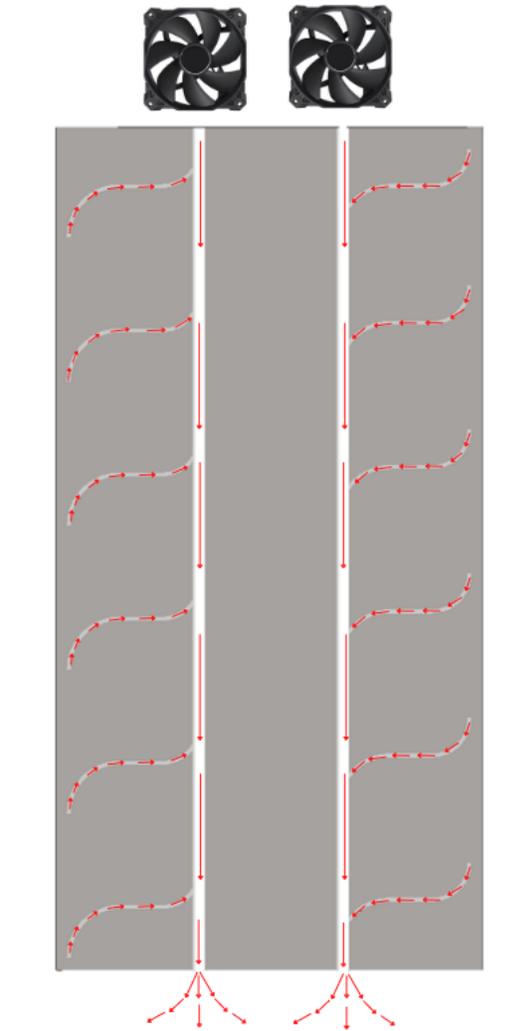
9.4. SIMULACIÓN DE CONFIGURACIÓN *HEAT PIPE* - PANEL SOLAR

Para el buen funcionamiento de un *Heat pipe*, éste debe dejar libre el área de disipación de calor, (zona de condensación) sin embargo, teniendo en cuenta que la finalidad de este trabajo es disipar la mayor cantidad de calor posible, se expusieron las 3 zonas de trabajo del *Heat pipe* (zona de condensación, zona adiabática y zona de evaporación) a la cara trasera del panel solar, con el objetivo de abarcar la mayor área posible. Dado que, en este caso el área de condensación fue expuesta a la cara trasera del panel, fue necesario agregar una sección con un coeficiente convectivo, para que funcionara como área de condensación y disipara el calor que es absorbido por el *Heat pipe*, y a su vez, redireccionara el mismo.

De acuerdo con las simulaciones y recolección de datos del panel solar se observó que la temperatura se distribuye de manera casi uniforme alrededor de la placa, en base a esto se propuso una configuración en la cual los *Heat pipes* abarcaran la mayor cantidad de zonas posibles y que a su vez estos dispongan de una zona por la cual pueda extraerse el calor disipado para el sistema de cogeneración. Ver (Figura 15). La configuración propuesta fue la siguiente.

Figura 23

Configuración propuesta



Esta configuración. Ver (Figura 23) cuenta con 12 *Heat pipes* 6 de cada lado separados por 2 ductos en los cuales se inducirá un flujo de calor encargado de recoger el calor disipado.

Ahora con este valor de la convección que recorrerá él tubo y el diámetro del tubo que será de 0.006m se determinó el caudal que sería entre 46.63135 y 100 CFM tomando en consideración las pérdidas por caídas de presión.

De acuerdo con los parámetros anteriores, se encontró un ventilador de tipo Axial, con un consumo de energía de 5W y un volumen de aire entre 80-120 CFM. Ver (Figura 24)

Figura 24

Referencia seleccionada



Nota:

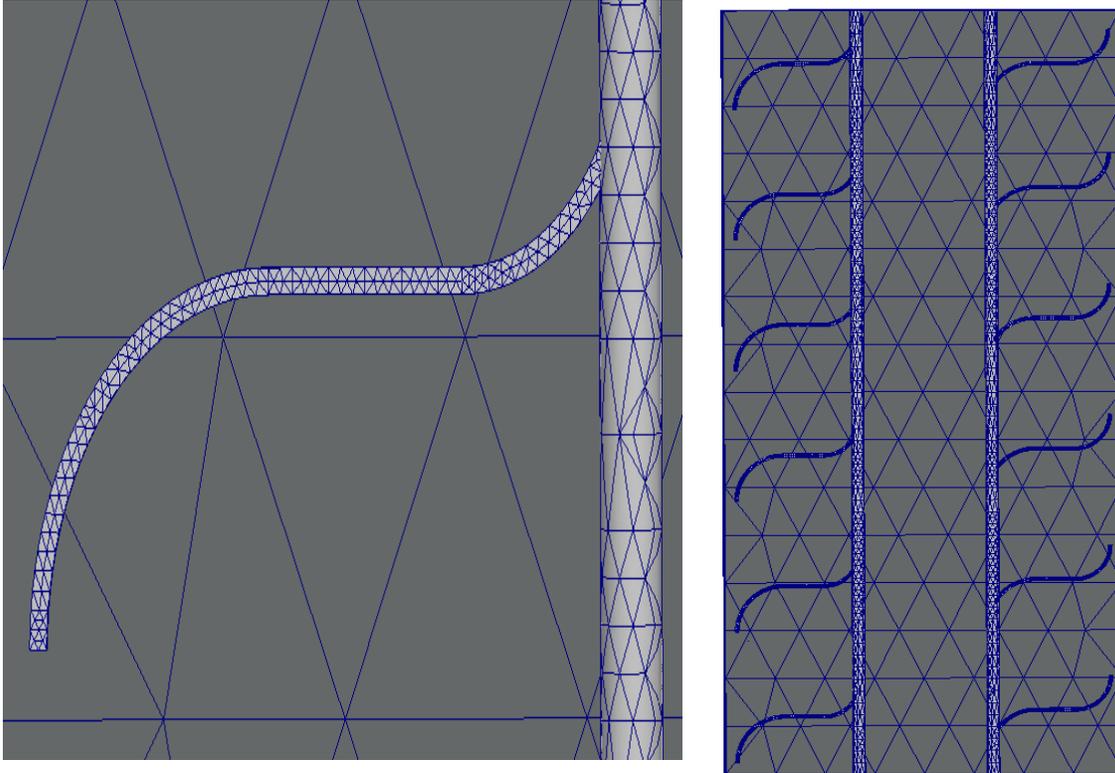
La simulación térmica del sistema se realizó mediante SolidWorks, donde se ensamblaron un total de 12 *Heat pipes* que se distribuyeron de manera uniforme en la parte posterior del panel solar, 2 canales de PVC, por donde se direccionaría el calor recuperado de los *Heat pipes* y, por último, el panel solar completo.

Una vez definidas las condiciones necesarias para acercar el estudio a la realidad, se creó una malla para poder realizar el estudio, debido a la complejidad de este, fue necesario crear un control de malla, que se implementó en los *Heat pipes*, de forma que toda la configuración fuera abarcada por la malla y se obtuvieran un estudio térmico de todo el sistema, el tamaño de elementos utilizado en los parámetros del mallado fue de 4.19734564mm. Ver (Figura 25)

}

Figura 25

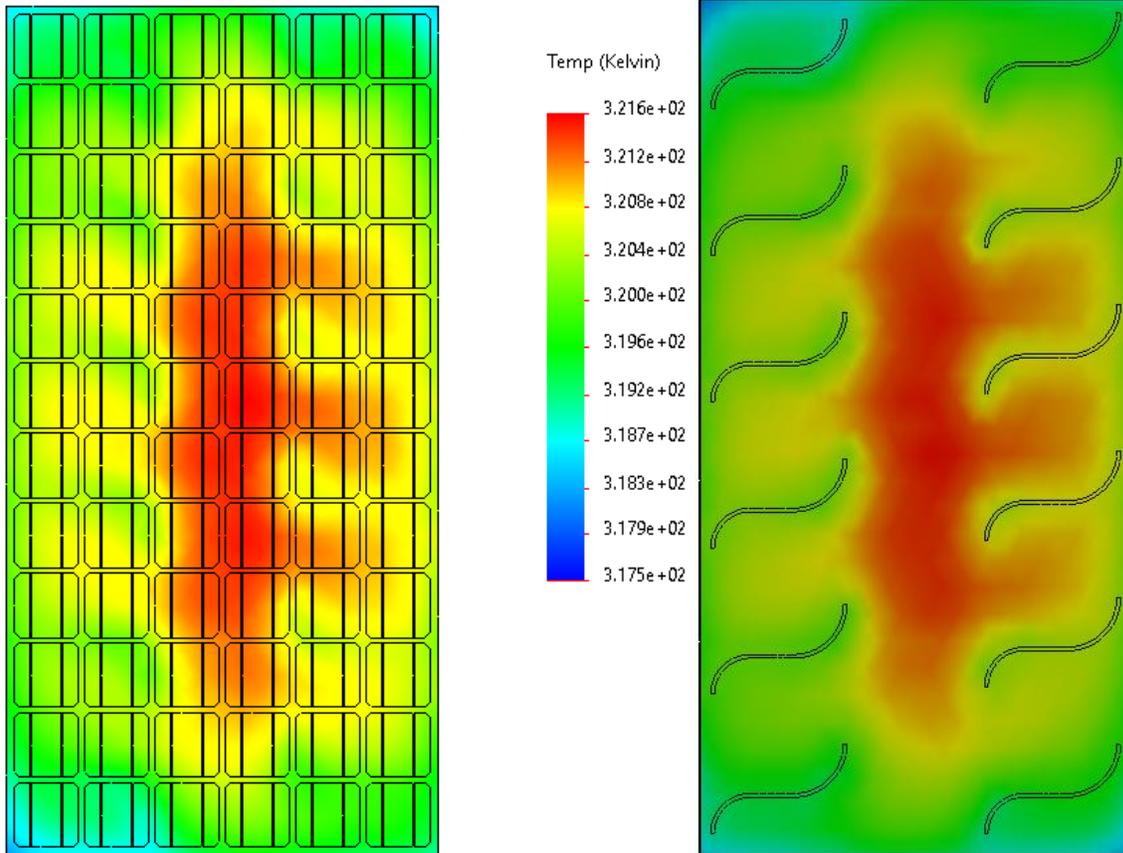
Malla impuesta en el estudio térmico



Luego de haber creado la malla, se realizó el estudio térmico, obteniendo los siguientes resultados

Figura 26

Resultado de estudio térmico Panel solar-Heat pipe



De acuerdo con los resultados del estudio térmico, se obtuvo la temperatura máxima alcanzada por el panel solar con la implementación del *Heat pipe*. Por otro lado, aplicando la Ec.5 obtuvimos que el porcentaje de potencia perdido, además teniendo en cuenta que el panel en condiciones ideales (expuesto a 1000W, 25°C) el pico de potencia producida por este es de 200W, con esta información se halló la potencia real producida por medio de la Ecuación 12 por el panel dando los siguientes resultados.

Tabla 12

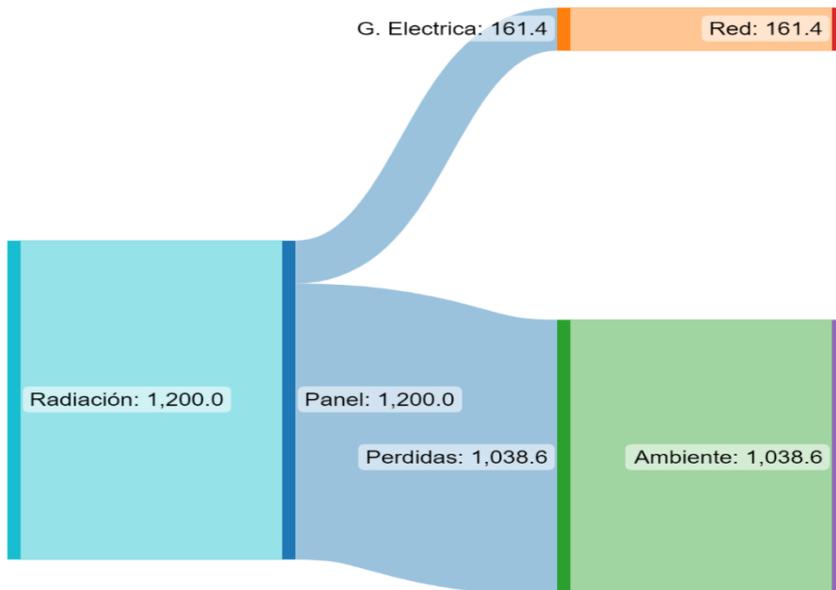
Comparativa de resultados entre sistema de cogeneración y panel solar

Temperatura alcanzada por el panel (°K)		Porcentaje de Potencia perdido (%)		Potencia real (W)	
Sin <i>Heat pipe</i>	Con <i>Heat pipe</i>	Sin <i>Heat Pipe</i>	Con <i>Heat Pipe</i>	Sin <i>Heat pipe</i>	Con <i>Heat pipe</i>
341.9	321.6	19.2	9.7	161.4	180.4

Se puede observar un aumento en la eficiencia con relación a la potencia máxima producida por el panel, ya que la potencia que se obtuvo sin Heat pipe fue de 161.4 y añadiendo la configuración de Heat pipes fue de 180.4. Con estos datos se construyó un diagrama de flujo para la generación de energía eléctrica del panel sin la implementación de los Heat pipes. Ver (Figura 27)

Figura 27

Diagrama de flujo para la generación de energía en panel solar fotovoltaico tradicional.



Posterior al estudio térmico, se concluyeron algunas variables que podrían esperarse al implementar el sistema de cogeneración, como: La potencia requerida para el acondicionamiento de este, el incremento de la eficiencia que se generaría con ayuda de la Ec.13 y la potencia recuperada, se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 13

VARIABLES CONSECUENTES DEL SISTEMA DE COGENERACIÓN

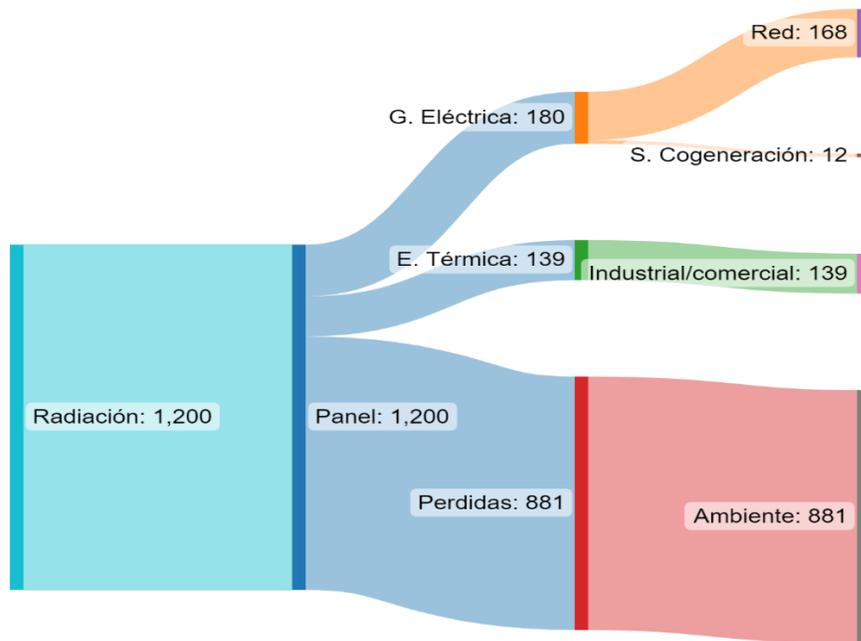
Potencia recuperada (W)	Incremento de la eficiencia global (%)	Potencia requerida para acondicionamiento del sistema de cogeneración (W)	Potencia eléctrica incrementada (W)
18.98	1.58	12	6.98

Luego de realizar los cálculos para ver la potencia recuperada con la implementación de los *Heat pipes*, se puede decir que con este sistema hay un balance favorable de energía, puesto que se recuperan 18.98W y para la implementación de los ventiladores se necesitaron 12W. Esto traduce que el sistema de cogeneración sería autosuficiente y además se dispondrían de 6.98W eléctricos adicionales por la disipación de calor, más la generación o recuperación de la energía térmica (139W) a 318K.

Si se tiene en cuenta que lo máximo que puede producir el panel, son 200 W, la eficiencia en el caso actual global del panel es de un 13.45% y se proyecta un incremento en la eficiencia global de 1.58% con la implementación del *Heat pipes*. Este incremento de potencia será distribuido en un 63.2 % para la cogeneración de energía térmica como se presentó previamente y 36.8% hacia la red de generación eléctrica como se puede ver en el siguiente diagrama de flujo. Ver (Figura 28)

Figura 28

Diagrama de flujo para la generación de energía en panel solar fotovoltaico con sistema de cogeneración de *Heat pipes* reciclados.



10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:

- En este trabajo se demuestra el potencial tecnológico del reuso del reciclado de *Heat pipes* (tubo disipador de calor) desde desechos tecnológicos cotidianos (Laptops) para su implementación en sistemas de recuperación de energía térmica (W) desde los paneles fotovoltaicos.
- Con este sistema hay un balance favorable de energía, puesto que se recuperan 18.98W y para la implementación de los ventiladores se necesitaron 12W. esto traduce que el sistema de cogeneración sería autosuficiente con una eficiencia de 25.58 %, con una recuperación de energía térmica 139 W por panel y además se

dispondrían de aproximadamente 168 We- con un incremento del 1.58% en la generación de energía eléctrica.

- A través del análisis térmico computacional se demostró que es posible implementar distintas configuraciones *Heat pipe*+Panel, solar y fluido de trabajo (aire o agua) lo que influye directamente en el resultado, por tal motivo se requirieron estudios adicionales para la maximización de la energía térmica recuperada.
- Con los diagramas de flujo podemos observar que la generación de energía eléctrica llega casi al tope que son los 200W habiendo un margen de mejora, pero en lo cual se puede buscar un mayor aumento es en la generación de energía térmica modificando distintas variables como utilizar una configuración distinta del sistema de cogeneración, aumentar el número de *Heat pipes*, cambiar el coeficiente convectivo etc.

11. TRABAJO FUTURO

se recomienda evaluar las condiciones geométricas y de transferencia de calor, como el ducto por donde fluye el aire y el coeficiente convectivo, dado que estos son factores modificables que influyen en la cantidad de energía recuperada.

12. REFERENCIAS

CELSIA. (n.d.). *Todo lo que debes saber sobre energía solar en Colombia.*
<https://eficienciaenergetica.celsia.com/todo-lo-que-debes-saber-sobre-energia-solar-en-colombia/>

COGEN EUROPE. (2021). *What Is Cogeneration*. <https://www.cogeneurope.eu/knowledge-centre/what-is-cogeneration>

Çengel, Y. A. (s.f.). *Transferencia de Calor y masa*. Mc Graw Hill.

Efraín Eufrazio, W., Ibeth Abregú, N., & Rodríguez, D. (2019). *Evaluación experimental de la eficiencia de un colector solar de tubosevacuados sin y con tubo de calor*.

ESPINOZA POLANCO, D. E. (2017). *DISEÑO Y MODELAMIENTO DE DISIPADORES DE CALOR PASIVOS* [UNIVERSIDAD DE CHILE]. <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/144607/Diseño-y-modelamiento-de-disipadores-de-calor-pasivos-en-paneles-fotovoltaicos-para-reducción-y-redistribución.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Faghri, A. (1995). *HEAT PIPE SCIENCE AND TECHNOLOGY* (Taylor & F).

Hernández, L., Bedolla, J., Hernández, M., & Muñoz, A. C. F. (2019). *Sistema térmico para recuperar energía de desecho en panel fotovoltaico*.

IEA. (2020). *Perspectivas energéticas mundiales 2020*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020/outlook-for-electricity>

Lozada Pincay, J. L. (2017). *Análisis experimental de la relación de la temperatura de operación de un módulo fotovoltaico y su voltaje de circuito abierto* [Universidad Autónoma Occidente]. <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/10010/T07673.pdf;jsessionid=DCC326F27B71DFF00EEBF227B4BC0698?sequence=5>

MAGGI SILVA, S. A. (2013). *MODELAMIENTO TÉRMICO DE UN PANEL FOTOVOLTAICO CON DISIPADOR DE CALOR OPERANDO EN EL NORTE DE CHILE.* [UNIVERSIDAD DE CHILE].

http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/114814/cf-maggi_ss.pdf?sequence=1

OSPINA, J. F. C., MOLANO, G., & SAAVEDRA, A. (2019). *Métodos para mejorar la eficiencia en la generación de energía eléctrica de módulos fotovoltaicos.*

Serrano, R., & TRITEC INTERVENTO. (2020). *EFICIENCIA DEL PANEL SOLAR (PARTE I).* <https://tritec-intervento.cl/eficiencia-del-panel-solar-parte-i>

SUNSUPPLY. (n.d.). *Energía solar en Colombia vs el mundo.* <https://www.sunsupplyco.com/>

YUVA SOLAR. (2015). *Factores de pérdidas energía fotovoltaica.* yvasolar.net

Zohuri, B. (2016). *Heat Pipe Design and Technology* (C. Springer (ed.)).

Valoración del uso de *Heatpipes* reciclados en la recuperación de energía térmica de paneles fotovoltaicos.

Martínez Cantero Alex N¹. Pérez Pérez Guillermo N².

¹ Universidad Pontificia Bolivariana / Montería, Colombia, alex.martinez@upb.edu.co

² Universidad Pontificia Bolivariana / Montería, Colombia, guillermo.perezp@upb.edu.co

Resumen

A partir del auge del uso de las energías renovables en los últimos años, la energía fotovoltaica ha tomado un papel importante en la generación de energía eléctrica alrededor del mundo. Sin embargo, la eficiencia de transformación de energía en esta tecnología apenas alcanza un 20% para el 2020 en tecnologías comerciales, ocasionando que un 80% de la energía se transforme en energía térmica y se deseché al ambiente. Este trabajo evaluó el proceso de reciclado de *Heat pipe* (tubo disipador de calor) desde desechos tecnológicos cotidianos (Laptops) para su implementación en sistemas de recuperación de energía térmica desde los paneles fotovoltaicos. A partir de estudios fenomenológicos térmicos utilizando softwares comerciales (SolidWorks) se diseñaron y evaluaron distintos dispositivos que permiten la concentración de energía térmica del panel y su disipación hacia una corriente de aire que permite su implementación en procesos cotidianos como el secado. Se seleccionará el dispositivo a partir de una evaluación multicriterio considerando la eficiencia en la recuperación de energía térmica, la calidad de la energía térmica recuperada y la temperatura operativa del panel fotovoltaico. Finalmente se desarrollará un diseño de detalle del dispositivo de recuperación de calor con *Heat pipe* y se construirá un prototipo para su validación experimental en la ciudad de Montería.

Palabras clave

Heat pipe, reciclado, Panel fotovoltaico, recuperación energética.

1. Problema de Investigación

A pesar de los esfuerzos que se realizan para el aprovechamiento de energía fotovoltaica, y los beneficios que traería esta nueva tecnología, no

será posible una globalización en el uso de esta energía hasta que su eficiencia aumente en las celdas accesibles para el común. El problema radica en el efecto de la temperatura en un panel solar pues sucede que según aumenta la temperatura ambiente, menor es la potencia de salida de un módulo fotovoltaico. Es decir, un panel solar trabaja más eficientemente, o lo que es lo mismo, convierte en electricidad una mayor proporción de la radiación solar que reciben, cuanto menor es la temperatura a la que están sometidos.

2. Marco Teórico

La energía fotovoltaica se ha visto limitada por los altos costos que ofrecen las celdas solares más eficientes ya que, las celdas comerciales disminuyen su eficiencia, puesto que el aumento de temperatura causa que éstas acumulen calor y bajen su rendimiento, los módulos fotovoltaicos presentan unas pérdidas de potencia del orden de un 4% por cada 10°C de aumento de su temperatura de operación (YUVA SOLAR, 2015). Dicha temperatura podría disminuirse con algún mecanismo de disipación de calor, en el caso de este estudio los *Heat pipes*, los *Heat pipes* son dispositivos muy eficaces para transmitir calor a alta velocidad a distancias considerables con caídas de temperatura extremadamente pequeñas, con flexibilidad excepcional, construcción simple y fácil control sin potencia de bombeo externa. (Faghri, 1995).

3. Metodología

La metodología aplicada en este proyecto es, en base a su grado de investigación exploratoria y descriptiva, por lo que los resultados que se obtendrán generarán una visión aproximada del alcance con el desarrollo propuesto. Así mismo, se clasifica en el tipo de investigación descriptiva

puesto que la investigación consiste en el análisis de la transferencia de calor que se da entre el *Heat pipe* y el panel solar, con el fin de establecer su comportamiento. Por otro lado, teniendo en cuenta la estrategia que se utilizará para responder al problema planteado la investigación entra en la clasificación de experimental.

Se proponen 3 etapas para el desarrollo del proyecto: Análisis tecnológico de componentes (*Heat pipe* y panel solar), evaluación de la implementación del *Heat pipe* al panel solar y por último valoración del sistema de cogeneración.

En la primera etapa de adquirieron los materiales necesarios para el análisis. Se obtuvieron los *Heat pipes*, posteriormente se verificó su estado operativo y se procedió al análisis de estos con el fin de definir su potencia térmica y así obtener las variables de calor específico, conductividad térmica y densidad que se utilizaron en la simulación de los tubos. Para ello se usó una calculadora técnica de *Heat pipe* para determinar la potencia máxima de un *Heat pipe* en función de su temperatura de operación, ésta fue proporcionada por la empresa ADVANCE COOLING TECHNOLOGY.

En la segunda etapa se realizó un estudio térmico por medio de SolidWorks, donde se evaluó el efecto sobre la eficiencia del panel por de la implementa un ensamble *Heat pipe* con el fin de analizar el efecto térmico que este genera en dicho dispositivo, con el propósito de obtener información de condiciones de simulación computacional y valores previos de temperaturas de operación que sirvieran como guía para evaluar la viabilidad del sistema.

En la última etapa En esta última etapa se evaluó un diseño conceptual del sistema de cogeneración para validar teóricamente la viabilidad técnica de su implementación. El sistema inicial propuesto consta de la implementación de los 2 ventiladores que son los que redireccionarán el aire caliente, 2 canales semiesféricos para trasferencia de calor entre *Heat pipe* - aire, la implementación de 12 *Heat pipes*. Con este sistema se espera inducir un flujo de aire que permita la transferencia de calor entre el *Heat pipe* - aire por convección forzada y el calentamiento del aire a temperatura ambiente hasta la condición de térmica del panel.

4. Objetivos

Objetivo general

- Diseñar de elementos térmicos y mecánicos que permitan la recuperación de energía térmica solares comerciales a partir de *Heat pipes* reciclados.

Objetivos específicos.

- Identificar los *Heat pipes* reciclados obtenidos de computadoras portátiles y la eficiencia energética global de un panel fotovoltaico en condiciones reales de operación como punto de partida para delimitar la capacidad de cogeneración de energía (validación de panel fotovoltaico).
- Evaluar el efecto térmico de la implementación de *Heat pipes* en un panel fotovoltaico a partir de herramienta de simulación computacional.
- Valorar a través de técnicas computacionales el diseño propuesto para la cogeneración de energía a partir de la implementación de *Heat pipes* en paneles fotovoltaicos.

5. Resultados y Discusión

5.1 Primera etapa

Se obtuvieron los materiales necesarios (*Heat pipe* y panel solar) para tener una referencia del tipo de dispositivos que se utilizará a futuro para realizar un diseño computacional. Posteriormente se caracterizaron térmica y operativamente para definir los datos de la simulación, en la que se desarrolló un modelo físico y fenomenológico de un panel solar comercial, seguido a esto se realizó la validación experimental del comportamiento térmico, los resultados de ese estudio se contrastaron con unas pruebas teórico - practicas realizadas por la Universidad Pontificia Bolivariana. Así mismo se realizó este proceso con los *Heat pipes* reciclados, teniendo en cuenta aspectos como su potencia máxima, dimensiones y zonas de operación.

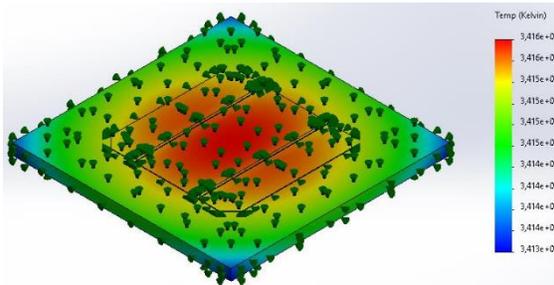
5.2 Segunda etapa

El primer estudio fue realizado a una celda individual, en condiciones operativas normales, a fin de obtener la temperatura máxima que alcanzaría esta sin la implementación de ningún

disipador de calor, obteniendo una temperatura máxima de: 341.6 °K. Ver (Figura 1)

Figura 1

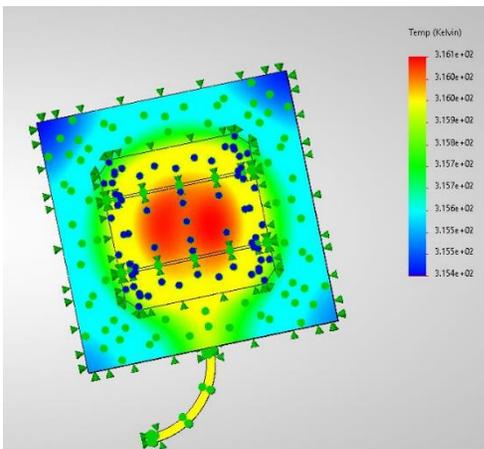
Celda Solar sin Heat pipe



Luego se realizó el mismo estudio en la celda, pero esta vez implementando un *Heat pipe* analizado del estudio se extrajeron los siguientes resultados. Ver (Figura 2)

Figura 2

Celda Solar con la implementación de Heat pipe



Con este estudio, se evidenció el efecto de disipación que genera el *Heat pipe* en la celda, puesto que hubo una disminución de la temperatura máxima de hasta 26 grados. Además, se observa que, si una parte del *Heat pipe* que está expuesta al ambiente el calor disipado será entregado a este mismo, además que un *Heat pipe* puede abarcar

varias celdas siempre y cuando tenga donde entregar ese calor disipado.

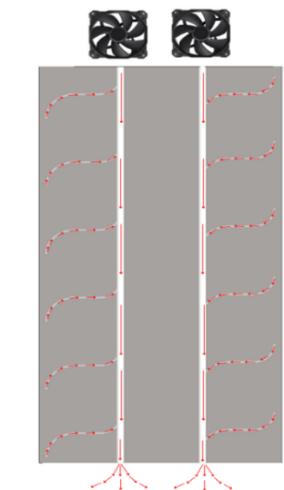
5.3 tercera etapa

Para el buen funcionamiento de un *Heat pipe*, éste debe dejar libre el área de disipación de calor, (zona de condensación) sin embargo, teniendo en cuenta que la finalidad de este trabajo es disipar la mayor cantidad de calor posible, se expusieron las 3 zonas de trabajo del *Heat pipe* (zona de condensación, zona adiabática y zona de evaporación) a la cara trasera del panel solar, con el objetivo de abarcar la mayor área posible. Dado que, en este caso el área de condensación fue expuesta a la cara trasera del panel, fue necesario agregar una sección con un coeficiente convectivo, para que funcionara como área de condensación y disipara el calor que es absorbido por el *Heat pipe*, y a su vez, redireccionara el mismo.

De acuerdo con las simulaciones y recolección de datos del panel solar se observó que la temperatura se distribuye de manera casi uniforme alrededor de la placa, en base a esto se propuso una configuración en la cual los *Heat pipes* abarcaran la mayor cantidad de zonas posibles y que a su vez estos dispongan de una zona por la cual pueda extraerse el calor disipado para el sistema de cogeneración- Ver (Figura 3). La configuración propuesta fue la siguiente:

Figura 3

Configuración propuesta

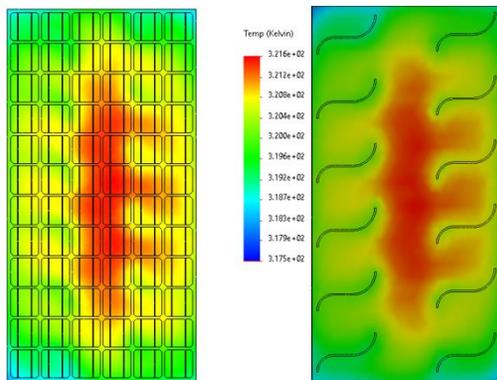


Esta configuración. Ver (Figura 3) cuenta con 12 *Heat pipes* 6 de cada lado separados por 2 ductos en los cuales se inducirá un flujo de calor encargado de recoger el calor disipado.

A continuación, se procedió a realizar la simulación obteniendo los siguientes resultados

Figura 4

Resultado de estudio térmico Panel solar-Heat pipe



De acuerdo con los resultados del estudio térmico, se obtuvo la temperatura máxima alcanzada por el panel solar con la implementación del *Heat pipe*. Por otro lado, se obtuvo que el porcentaje de potencia perdido, además teniendo en cuenta que el panel en condiciones ideales (expuesto a 1000W, 25°C) el pico de potencia producida por este es de 200W, con esta información se halló la potencia real producida. Ver (Tabla 1).

Tabla 1

Comparativa de resultados entre sistema de cogeneración y panel solar

Temperatura alcanzada por el panel (°K)		Porcentaje de Potencia perdido (%)		Potencia real (W)	
Sin <i>Heat pipe</i>	Con <i>Heat pipe</i>	Sin <i>Heat Pipe</i>	Con <i>Heat Pipe</i>	Sin <i>Heat pipe</i>	Con <i>Heat pipe</i>
341.9	321.6	19.2	9.7	161.4	180.4

Se puede observar un aumento en la eficiencia con relación a la potencia máxima producida por el panel, ya que la potencia que se obtuvo sin *Heat pipe* fue de 161.4 y añadiendo la configuración de *Heat pipes* fue de 180.4.

Posterior al estudio térmico, se concluyeron algunas variables que podrían esperarse al implementar el sistema de cogeneración, como: La potencia requerida para el acondicionamiento de este, el incremento de la eficiencia que se generaría y la potencia recuperada, se muestran en la siguiente tabla. Ver (Tabla 2)

Tabla 2

Variables consecuentes del sistema de cogeneración

Potencia recuperada (W)	Incremento de la eficiencia global (%)	Potencia requerida para acondicionamiento del sistema de cogeneración (W)	Potencia eléctrica incrementada (W)
18.98	1.58	12	6.98

Luego de realizar los cálculos para ver la potencia recuperada con la implementación de los *Heat pipes*, se puede decir que con este sistema hay un balance favorable de energía, puesto que se recuperan 18.98W y para la implementación de los ventiladores se necesitaron 12W. Esto traduce que el sistema de cogeneración sería autosuficiente y además se dispondrían de 6.98W eléctricos adicionales por la disipación de calor, más la generación o recuperación de la energía térmica (139W) a 318K.

Si tenemos en cuenta que lo máximo que puede producir el panel, son 200 W, la eficiencia en el caso actual global del panel es de un 13.45% y se proyecta un incremento en la eficiencia global de 1.58% con la implementación del *Heat pipes*. Este incremento de potencia será distribuido en un 63.2 % para la cogeneración de energía térmica como se

presentó previamente y 36.8% hacia la red de generación eléctrica

6. Conclusiones

- En este trabajo se demuestra el potencial tecnológico del reuso del reciclado de *Heat pipes* (tubo disipador de calor) desde desechos tecnológicos cotidianos (Laptops) para su implementación en sistemas de recuperación de energía térmica (W) desde los paneles fotovoltaicos.

- Con este sistema hay un balance favorable de energía, puesto que se recuperan 18.98W y para la implementación de los ventiladores se necesitaron 12W. esto traduce que el sistema de cogeneración sería autosuficiente con una eficiencia de 25.58 %, con una recuperación de energía térmica 139 W por panel y además se dispondrían de aproximadamente 168 We- con un incremento del 1.58% en la generación de energía eléctrica.

- A través del análisis térmico computacional se demostró que es posible implementar distintas configuraciones *Heat pipe*+Panel, solar y fluido de trabajo (aire o agua) lo que influye directamente en el resultado, por tal motivo se requirieron estudios adicionales para la maximización de la energía térmica recuperada.

- Con los diagramas de flujo podemos observar que la generación de energía eléctrica llega casi al tope que son los 200W habiendo un margen de mejora, pero en lo cual se puede buscar un mayor aumento es en la generación de energía térmica modificando distintas variables como utilizar una configuración distinta del sistema de cogeneración, aumentar el número de *Heat pipes*, cambiar el coeficiente convectivo etc.

7. Referencias.

CELSIA. (n.d.). *Todo lo que debes saber sobre energía solar en Colombia.* <https://eficienciaenergetica.celsia.com/todo-lo-que-debes-saber-sobre-energia-solar-en-colombia/>

COGEN EUROPE. (2021). *What Is Cogeneration.* <https://www.cogeneurope.eu/knowledge-centre/what-is-cogeneration>

Çengel, Y. A. (s.f.). *Transferencia de Calor y masa.* Mc Graw Hill.

Faghri, A. (1995). *HEAT PIPE SCIENCE AND TECHNOLOGY* (Taylor & F).

IEA. (2020). *Perspectivas energéticas mundiales 2020.* <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020/outlook-for-electricity>

MAGGI SILVA, S. A. (2013). *MODELAMIENTO TÉRMICO DE UN PANEL FOTOVOLTAICO CON DISIPADOR DE CALOR OPERANDO EN EL NORTE DE CHILE.* [UNIVERSIDAD DE CHILE]. http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/114814/cf-maggi_ss.pdf?sequence=1

OSPINA, J. F. C., MOLANO, G., & SAAVEDRA, A. (2019). *Métodos para mejorar la eficiencia en la generación de energía eléctrica de módulos fotovoltaicos.*

Serrano, R., & TRITEC INTERVENTO. (2020). *EFICIENCIA DEL PANEL SOLAR (PARTE I).* <https://tritec-intervento.cl/eficiencia-del-panel-solar-parte-i>

SUNSUPPLY. (n.d.). *Energía solar en Colombia vs el mundo.* <https://www.sunsupplyco.com/>

YUVA SOLAR. (2015). *Factores de pérdidas energía fotovoltaica.* yuvasolar.net

Zohuri, B. (2016). *Heat Pipe Design and Technology* (C. Springer (ed.)).