

# Estudio experimental y análisis de exergía en un colector solar plano de 3 m<sup>2</sup> con almacenamiento térmico destinado al calentamiento de aire

*by* Arly Darío Rincón Quintero

---

**Submission date:** 10-Sep-2022 02:30PM (UTC-0500)

**Submission ID:** 1896596403

**File name:** F-DC-125.docx (3.51M)

**Word count:** 14921

**Character count:** 83987



**6** **Estudio experimental y análisis de exergía en un colector solar plano de 3 m<sup>2</sup> con almacenamiento térmico destinado al calentamiento de aire**

**Proyecto de investigación**

**Autor:**

**Nicole Daniela Zanabria Ortigoza**  
**C.C. 1.098.805.439**

**Unidades Tecnológicas de Santander**  
**Facultad de Ciencias Naturales E Ingenierías**  
**Ingeniería Electromecánica**  
**Bucaramanga, 09-09-2022**



**6** Estudio experimental y análisis de exergía en un colector solar plano de 3 m<sup>2</sup> con almacenamiento térmico destinado al calentamiento de aire

**Proyecto de investigación**

**Autor:**

**Nicole Daniela Zanabria Ortigoza  
C.C. 1.098.805.439**

**26**

**Trabajo de Grado para optar al título de  
Ingeniero Electromecánico**

**Director:**

**Ph. D. Arly Darío Rincón Quintero**

**Director:**

**Ing. Ms. Nilson Yulián Castillo León**

**Grupo de Investigación en Diseño y Materiales-DIMAT**

**Unidades Tecnológicas de Santander  
Facultad de Ciencias Naturales E Ingenierías  
Ingeniería Electromecánica  
Bucaramanga, 09-09-2022**

Nota de Aceptación

<sup>16</sup>  
Aprobado en cumplimiento de los requisitos exigidos  
por las Unidades Tecnológicas de Santander para  
optar al título de Ingeniero Electromecánico, según  
acta del comité de trabajo de grado número 30 del  
12-09-2022 Evaluador: Luis Alonso Betancur Arboleda

Luis Alonso Betancur A  
cc 3482001 de abogado (Aut)

Firma del Evaluador



Firma del Director

## DEDICATORIA

El presente trabajo de grado es dedicado principalmente a Dios que me ha dado la vida, inteligencia, sabiduría y fortaleza para luchar por cada meta que me he propuesto.

De igual forma a mi madre, Leyla Ortigoza y mi padre William Zanabria, quienes fueron y han sido mi apoyo incondicional a lo largo de esta etapa de mi vida, gracias por su paciencia, comprensión y consejos. Los amo.

A mis hermanos Vane y Kevin, como también, a mi pareja Neyder, por brindarme su tiempo y cariño, les agradezco por siempre estar a mi lado de manera absoluta y por su compañía en este proyecto, ya que son un motivo más para esforzarme y salir adelante.

Nicole Daniela Zanabria Ortigoza

## AGRADECIMIENTOS

Los autores de la presente investigación desean manifestar los <sup>15</sup>agradecimientos a:

Las Unidades Tecnológicas de Santander, por los conocimientos adquiridos, tanto académicos como humanos y por abrir sus puertas para formar profesionales.

Arly Darío Rincón Quintero, PH. D(C) en Eficiencia Energética y Sostenibilidad en Ingeniería y Arquitectura. Director del trabajo de grado. Por brindarme la <sup>15</sup>oportunidad de realizar el proyecto con su presencia, por sus comentarios y colaboración, que fueron de gran importancia en la elaboración del trabajo de investigación.

Nilson Yulian Castillo León, Magíster en Sistemas Energéticos Avanzados. Codirector del trabajo de grado. Por su colaboración desinteresada, paciencia, dedicación incondicional y entusiasmo continuo sobre este tipo de proyectos.

Se agradece infinitamente la contribución y ayuda, de todas aquellas personas que hicieron posible el desarrollo del trabajo de grado presentado.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN EJECUTIVO .....</b>	<b>10</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>11</b>
<b>1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>13</b>
10	
<b>1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>13</b>
<b>1.2. JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>14</b>
<b>1.3. OBJETIVOS .....</b>	<b>155</b>
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	155
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	155
<b>1.4. ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>16</b>
1.4.1 ESTADO DEL ARTE NACIONAL.....	16
1.4.2 ESTADO DEL ARTE INTERNACIONAL.....	18
8	
<b>2. MARCO REFERENCIAL .....</b>	<b>221</b>
<b>2.1 MARCO TEORICO.....</b>	<b>21</b>
<b>2.2 MARCO HISTORICO.....</b>	<b>25</b>
<b>2.3 MARCO CONCEPTUAL.....</b>	<b>27</b>
<b>2.4 MARCO LEGAL.....</b>	<b>29</b>
<b>2.5 MARCO AMBIENTAL.....</b>	<b>30</b>
<b>3. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION .....</b>	<b>32</b>
<b>4. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO.....</b>	<b>33</b>
<b>4.1 REVISION BIBLIOGRAFICA EN LA LITERATURA.....</b>	<b>33</b>
<b>4.2 PRUEBAS EXPERIMENTALES EN COLECTOR SOLAR .....</b>	<b>37</b>
<b>4.3 METODOLOGIA PARA CALCULOS EXERGETICOS.....</b>	<b>41</b>
<b>4.4 ANALISIS DE SENSIBILIDAD.....</b>	<b>54</b>
<b>5. RESULTADOS.....</b>	<b>55</b>
<b>6. CONCLUSIONES .....</b>	<b>62</b>
<b>7. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>63</b>
<b>8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>64</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo de Carnot .....	22
Figura 2. Mapa de coocurrencias con palabras claves destacadas en la literatura.	34
Figura 3. Mapa de red de acoplamiento bibliográfico destacadas en la literatura...	35
Figura 4. Colector solar plano dispuesto para pruebas.....	37
Figura 5. Puntos de prueba en el sistema.....	38
Figura 6. Anemómetro digital.....	38
Figura 7. Termostato digital.....	39
Figura 8. Piranómetro digital.....	39
Figura 9. Manómetro digital.....	40
Figura 10. Programa de adquisición de datos del colector solar.....	40
Figura 11. Metodología para cálculos exergéticos.....	41
Figura 12. Metodología usada para análisis termodinámico.....	46
Figura 13. Cambio de temperatura ambiente y radiación solar en valores medios horarios.....	50
Figura 14. Cambio en <sup>4</sup> velocidad de salida del aire en el colector solar plano.....	56
Figura 15. Cambio de los valores de temperatura de entrada y salida del aire en el colector solar.....	57
Figura 16. Cambio de <sup>1</sup> eficiencia energética en el colector solar plano.....	58
Figura 17. Cambio en la <sup>1</sup> tasa de destrucción de exergía en el colector solar.....	58
Figura 18. Cambio en la eficiencia exergética del colector solar.....	59
Figura 19. Variación de la eficiencia exergética con respecto a la velocidad y temperatura de salida del sistema.....	60



2

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Comparación entre energía y exergía.....	28
Tabla 2. Documentos bibliográficos relevantes en la investigación. ....	36
Tabla 3. Especificaciones técnicas del sistema.....	42
Tabla 4. Parámetros iniciales del sistema.....	42
Tabla 5. Flujo de exergía total en todas las corrientes 8:00 hrs.....	47
Tabla 6. Rendimientos térmicos del sistema 8:00 hrs.....	47
Tabla 7. Flujo de exergía total en todas las corrientes 8:45 hrs.....	47
Tabla 8. Rendimientos térmicos del sistema 8:45 hrs.....	48
Tabla 9. Flujo de exergía total en todas las corrientes 9:30 hrs.....	48
Tabla 10. Rendimientos térmicos del sistema 9:30 hrs.....	48
Tabla 11. Flujo de exergía total en todas las corrientes 10:15 hrs.....	48
Tabla 12. Rendimientos térmicos del sistema 10:15 hrs.....	49
Tabla 13. Flujo de exergía total en todas las corrientes 11:00 hrs.....	49
Tabla 14. Rendimientos térmicos del sistema 11:00 hrs.....	49
Tabla 15. Flujo de exergía total en todas las corrientes 11:45 hrs.....	49
Tabla 16. Rendimientos térmicos del sistema 11:45 hrs.....	50
Tabla 17. Flujo de exergía total en todas las corrientes 12:30 hrs.....	50
Tabla 18. Rendimientos térmicos del sistema 12:30 hrs.....	50
Tabla 19. Flujo de exergía total en todas las corrientes 13:15 hrs.....	50
Tabla 20. Rendimientos térmicos del sistema 13:15 hrs .....	51
Tabla 21. Flujo de exergía total en todas las corrientes 14:00 hrs .....	51
Tabla 22. Rendimientos térmicos del sistema 14:00 hrs .....	51
Tabla 23. Flujo de exergía total en todas las corrientes 14:45 hrs.....	51
Tabla 24. Rendimientos térmicos del sistema 14:45 hrs.....	52
Tabla 25. Flujo de exergía total en todas las corrientes 15:30 hrs .....	52
Tabla 26. Rendimientos térmicos del sistema 15:30 hrs .....	52
Tabla 27. Flujo de exergía total en todas las corrientes 16:15 hrs.....	53
Tabla 28. Rendimientos térmicos del sistema 16:15 hrs.....	53
Tabla 29. Flujo de exergía total en todas las corrientes 17:00 hrs .....	53
Tabla 30. Rendimientos térmicos del sistema 17:00 hrs .....	53

## NOMENCLATURA

### Abreviación

**MCF** Material de cambio de fase

### Símbolos

**Q** Transferencia de calor (W)

**I** Radiación solar (W/m<sup>2</sup>)

**A** Área (m<sup>2</sup>)

**m** Caudal másico (kg/s)

**Cp** Calor específico (J/kg.°K)

**T** Temperatura (°C)

**μ** Coeficiente de fricción del aire (-)

**V** Velocidad (m/s)

**v** Volumen específico (m<sup>3</sup>/kg)

**R** Constantes de los gases ideales (J/mol.°K)

**P** Presión (Pa)

**e** Flujo de exergía (J/kg)

**E** Exergía específica (W)

**h** Entalpía (J/kg)

**s** Entropía (J/kg.°K)

### Símbolos griegos

**α** Absortividad (-)

**τ** Emisividad (-)

**η** Eficiencia (%)

**ρ** Densidad (kg/m<sup>3</sup>)

### Subíndices

**In** Entrada

**Out** Salida

**col** Colector

**o** Condiciones alrededores

**Xi** Fracción molar

**Yi** Peso molar

## RESUMEN EJECUTIVO

La energía solar se ha contemplado como portadora de energía primaria para sustentar la vida y también, actualmente se considera un recurso energético renovable que fortalece la industrialización a través de su uso como fuente principal energía. En este proyecto, se presenta un análisis de exergía a un colector solar plano que transforma los rayos solares en energía térmica, con el fin de calentar el aire que transita por el sistema, para luego aplicarlo en el secado de alimentos.

Con el propósito de realizar un estudio experimental y análisis de exergía en un captador solar plano de 3 m<sup>2</sup>, se establece en primer lugar, el uso de un software especializado en análisis de bases de datos, para identificar desarrollos tecnológicos sobre metodologías y parámetros termodinámicos que permiten el cálculo exergético adecuado para sistemas de almacenamiento térmico. Luego, se realizan pruebas experimentales en el dispositivo solar plano, con el fin de obtener las variables termodinámicas que influyen en el proceso de calentamiento de aire. Seguido, se aplican los cálculos de balance de masa, energía y exergía que permiten la evaluación exergética del sistema. Por último, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad en el equipo, donde se identificaron las variables termodinámicas influyentes, para cambiar sus valores y visualizar un incremento del trabajo útil del colector solar con el ambiente al que está expuesto.

Realizados los balances horarios energéticos y exergéticos del colector solar, se concluye que a las 11:45 horas se tiene la mayor radiación sobre el captador en el lugar de estudio y el rendimiento actual del sistema en este tiempo, alcanza una eficiencia y destrucción exergética del 32,56% y 710,53 W. También, se deduce con el análisis de sensibilidad que, si se implementan procesos ingenieriles para aumentar la temperatura de salida y disminuir la velocidad del aire en el equipo, se llega a obtener hasta un 53,23% de rendimiento exergético en el sistema.

**PALABRAS CLAVE.** Exergía, energía solar, colector solar plano, almacenamiento térmico, eficiencia.

## INTRODUCCIÓN

Las diversas formas de energía juegan un papel cada vez más importante en el proceso del desarrollo económico e industrialización en todo el mundo. Con la disminución de las reservas de combustibles fósiles a nivel mundial, que actualmente proporcionan la principal fuente de energía, el desarrollo de fuentes de energía renovables no convencionales ha recibido un fuerte interés en su desarrollo. La luz solar es una fuente de energía que está disponible de manera directa y permanente, proporcionando una reserva de combustible no contaminante con el medio ambiente (Kalogirou et al., 2016). Según varias investigaciones, la forma más sencilla y eficiente de utilizar la energía solar es convertirla en energía térmica para aplicaciones de calefacción mediante el uso de configuraciones sobre colectores solares. (Akpınar & Koçyiğit, 2010)

Los colectores solares de aire ocupan un lugar importante entre los sistemas de calefacción debido a su simplicidad de diseño, poco uso de materiales y menos costos en equipos de recolección de energía solar. Las principales aplicaciones de estos tipos de captadores de rayos solares son la calefacción de espacios; secado de madera y fortalecimiento de utilidades industriales, como también, se puede utilizar de manera efectiva para el endurecimiento/secado de cacao y café, productos agrícolas esenciales del país. (Mortazavi & Ameri, 2018) Por esta razón, la comunidad científica está investigando sobre la sostenibilidad de esta tecnología.

El artículo expuesto por (Ural, 2019), plantea un análisis experimental de exergía en dos tipos de colectores solares de aire, que operan a las mismas condiciones para realizar un promedio con los datos de temperatura, flujo másico y radiación solar tomados. Por medio de los cálculos exergéticos realizados con los parámetros termodinámicos de entrada, el autor pudo deducir que se alcanzan eficiencias exergéticas de 41%, mediante el uso de tejidos textiles como recubrimiento captador de rayos solares, recomendando su uso para mejorar el potencial útil en aplicaciones de calefacción solar y secado.

Así mismo (Muhammad et al., 2018), enfatizaron en su escrito el análisis experimental de energía, exergía y eficiencia de un captador solar de placa plana ubicado en Pakistán. En su modelo de estudio, realizaron pruebas con cinco caudales máxicos de aire de entrada y tres ángulos de inclinación para la captación de rayos solares del equipo. Después, de la caracterización del equipo, recolección de datos termodinámicos de entrada y realización de cálculos energéticos, los autores registraron una eficiencia energética del 51% y exergética mínima del 24%, lo anterior se logra cuando el sistema trabaja con un caudal de aire de 3,03 kg/s y una inclinación del colector de 35° en el lugar de estudio.

Esta investigación tiene como objetivo realizar un análisis exergético de un colector solar plano de 3 m<sup>2</sup> con almacenamiento térmico, que funciona dentro las Unidades Tecnológicas de Santander como un equipo que permite aprovechar la radiación solar, transformándola en energía térmica, para el calentamiento de aire que será usado para el secado de productos agrícolas.

La metodología implementada se enfoca en primer lugar en la revisión de la literatura técnico-científica con el propósito de identificar los procedimientos pertinentes para los cálculos exergéticos en sistemas de almacenamiento energía térmica. Luego, se efectuaron pruebas experimentales en el dispositivo solar plano, con el objetivo de obtener las variables termodinámicas que influyen en el proceso de calentamiento de aire. Después, se desarrollaron las operaciones de balance de masa, energía y exergía que reconocen la evaluación exergética del captador solar. Finalmente, se realiza un promedio de los datos horarios obtenidos, para evaluar con precisión el rendimiento del equipo, asimismo, se proponen escenarios aumentando la temperatura de salida y velocidad del colector solar, para alcanzar a visualizar mejores comportamientos de la eficiencia exergética, en comparación de la exergía destruida en el sistema inicial.

## 1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El fuerte aumento en el coste del petróleo y la prevención ambiental del uso de los combustibles fósiles ha hecho que surja la necesidad por obtener recursos para las energías renovables, como lo es la energía solar, ya que es amigable con el entorno, ilimitada al ser usada en lugares de trabajo, económica y de trascendencia en muchas investigaciones dentro de la misma rama de estudio. La energía solar, se puede transformar en energía térmica mediante colectores solares de placa plana, este es un dispositivo que se emplea para proveer con energía calorífica, redes domésticas y comerciales, esencialmente para aplicaciones en calefacción o refrigeración. El problema consiste en que, cuando se realiza el proceso indicado anteriormente, es eficaz, llevar a cabo con precedencia un estudio energético que facilite el cálculo del trabajo útil del sistema hasta que la energía solar llegue a estar en armonía con su medio de referencia, y así, alcanzar a elaborar diseños favorables de sistemas térmicos en los casos específicos estudiados.

Varias investigaciones, desarrollan el desempeño térmico en colectores solares en función de la primera ley de la termodinámica; que por sí sola no incluye todas las pérdidas internas que conlleva el proceso. "El análisis hecho por la segunda ley de la termodinámica es útil para cuantificar las diversas pérdidas en el colector solar y, además, ayuda a estimar la eficiencia exergética del sistema". (Gunjo et al., 2017) No obstante, se resalta la importancia de la simulación del modelo en programas que logren resultados de dinámica de fluidos dentro del mismo, y así predecir mediante algunos parámetros de exergía los factores de pérdida de calor.

Los colectores solares planos, generalmente, se investigan en base al análisis de energía y de allí nace la necesidad de realizar un estudio exergético, que sea útil para la identificación de irreversibilidades termodinámicas y mejoras en el diseño de los sistemas solares (Gheorghian et al., 2020). Lo presente, conlleva a los autores de amplias indagaciones a plantearse un multiobjetivo con la finalidad de optimizar

un sistema térmico, mediante la maximización de la eficiencia energética y la minimización del coste anual.

Por estos motivos, se hace necesario desarrollar un análisis real y teórico de los factores termodinámicos característicos de un sistema solar, que permitan abordar la siguiente pregunta de investigación, ¿Cuál es el análisis exergético indicado que puede realizarse en un colector solar plano con almacenamiento térmico que está destinado al calentamiento de aire?

## 1.2. JUSTIFICACIÓN

La utilización de la energía solar ha surgido como una alternativa prometedora para satisfacer la creciente demanda de energías de una manera limpia, eficiente y confiable. Esta misma, se puede recolectar de acuerdo con dos mecanismos principales de conversión: “paneles fotovoltaicos para la generación de electricidad y colectores térmicos para la generación de calor” (Allouhi & Benzakour, 2021) a este último, lo dominan los colectores solares de placa plana y de allí nace la necesidad de realizar la presente investigación, ya que se pretende determinar los parámetros exergéticos necesarios, en el proceso de absorción de luz solar y el aire en el entorno, para que mediante los cálculos se pueda hallar la mayor capacidad de operación del sistema.

El proyecto es pertinente con las Unidades Tecnológicas de Santander, puesto que se buscará el desarrollo de un aprendizaje autónomo de los estudiantes para cuantificar con anticipación, el uso eficiente de la energía solar en captadores planos y así resolver cuestiones que se presentan en el mismo campo investigativo; esto a través, de la estimación de la exergía para alcanzar a identificar imperfecciones termodinámicas, que al modificarlas permiten determinar y aprovechar la cantidad máxima de trabajo real de los colectores solares, en la interacción con el entorno. Lo nombrado anteriormente avanzará en el eje temático de investigación del grupo DIMAT reconocido como “Diseño e implementación de equipos para procesos de termo-fluidos”, con el cual se aspira progresar en el uso y análisis de variables

significativas para el almacenamiento de energía térmica, que se aplican al desarrollo productivos en la sociedad.

Por las diferentes razones planteadas, se quiere realizar un estudio cuantitativo de la eficiencia exergética en un colector solar plano de 3 m<sup>2</sup> con almacenamiento de energía térmica, para posteriormente establecer ineficiencias del proceso; así mismo, se pretende aportar ideas y conclusiones con un enfoque de desarrollo tecnológico, a fin de servir como una aplicación en la especificación del valor máximo de trabajo real que tiene un sistema solar con su entorno.

### 1.3. OBJETIVOS

#### 1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar la exergía obtenida en un colector solar plano de 3 m<sup>2</sup> con almacenamiento térmico, mediante la evaluación de factores termodinámicos característicos de sistemas destinados al calentamiento de aire.

#### 1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar una revisión bibliográfica en la literatura especializada, que permita identificar metodologías y parámetros térmicos adecuados, para el cálculo exergético en sistemas de almacenamiento de energía térmica.
- Desarrollar pruebas experimentales en el dispositivo solar plano estudiado, monitoreando y procesando las variables termodinámicas que influyen en el proceso de calentamiento de aire.
- Aplicar los cálculos del modelo matemático de balance de masa, energía y exergía con el uso de los factores termodinámicos característicos de un sistema solar que permitan la evaluación exergética del sistema.
- Plantear escenarios en donde se alcancen a visualizar mejores comportamientos exergéticos que permitan un incremento del trabajo útil en el colector solar plano de 3 m<sup>2</sup> con el ambiente al que está expuesto.



## 1.4. ESTADO DEL ARTE

Conforme con la revisión bibliográfica en este apartado, se presentan a continuación algunos estudios realizados sobre el análisis exergético en colectores solares, para evaluar según la segunda ley de la termodinámica el rendimiento del equipo mediante simulaciones y evaluaciones experimentales. Con la indagación en los siguientes artículos, se alcanzan a identificar diferentes eficiencias exergéticas alcanzadas en los captadores de energía solar, que dependen de factores termodinámicos, diseño y fluido de trabajo, permitiendo así analizar y cuantificar la capacidad de trabajo útil del sistema con su ambiente.

### 1.4.1. ESTADO DEL ARTE NACIONAL

#### A. “Análisis exergético en colectores solares integrado a un proceso de secado”. (Garay & Villadiego, 2017)

Los autores del proyecto de investigación plantearon como objetivo desarrollar un estudio de exergía a un colector solar incorporado a un proceso de secado. Esta indagación permitió instruir sobre las ineficiencias generadas dentro del sistema en condiciones de irreversibilidades. Principalmente, se identificaron **los balances de masa, energía, entropía y exergía, para** realizar cálculos con los parámetros experimentales hallados. Luego, por medio de los datos tomados anteriormente, se **definieron escenarios que permitieron la optimización del proceso, por medio del aumento de la eficiencia de transferencia de calor** del captador de energía solar con el ambiente, esto se estableció dentro de un rango de temperaturas finitas y en relaciones de flujo de aire destinados para el secado de materias primas.

En el desarrollo de los modelos indagados para hallar las variables termodinámicas destacables, los autores usaron el software EES para medir el aprovechamiento de energía térmica en colectores solares. A través de la acotación de lecturas de radiación solar con un piranómetro, temperaturas con termostatos y flujo con anemómetro, se validó la modelación por medio del ajuste de las regresiones experimentales alcanzadas. En conclusión, los autores lograron

conseguir: la cuantificación de la pérdida exergética en el equipo, el señalamiento de los menores tiempos posibles para comprender el secado de la materia prima estudiada y “la caracterización del proceso mediante un modelo estocástico que les permitió optimizar las condiciones operativas, para obtener el máximo aprovechamiento de la radiación solar integrada a el proceso del deshidratado de frutos”. (Garay & Villadiego, 2017)

**B. “Análisis exergético de un colector solar de placa plana con almacenamiento de calor latente por material de cambio de fase para aplicaciones de calentamiento de agua a baja temperatura”.** (Ortega & Carmona, 2017)

El objetivo principal presentado en la investigación es realizar un análisis exergético para un captador solar de plano que tiene un sistema de acopio **térmico con material de cambio de fase (PCM)**. Se realiza este cálculo de exergía para hallar cuál es la capacidad eficaz de un proceso que acumula calor latente con material de transición de fase. La cera de parafina comercial fue el material empleado por el artículo, y se utiliza para almacenar y liberar energía en su transformación de sólido-líquido; “este material se encuentra en recipientes metálicos debajo de la placa absorbente en el aislamiento inferior del colector”. (Ortega & Carmona, 2017)

El análisis de exergía lo realizaron en condiciones exteriores para días de baja, media y alta radiación tomados de octubre de 2016 a marzo de 2017 en la ciudad de Barranquilla, Colombia. El sistema se evalúa a lo largo de los períodos de carga y descarga. Los autores, formulan y resuelven las ecuaciones de balance de energía y exergía basadas en la primera y segunda ley de la termodinámica para cada elemento del colector, así como para la parafina usada. Finalmente, se obtuvieron resultados satisfactorios con lo esperado, ya que se alcanza a demostrar la distribución y destrucción energética de cada componente del proceso y su variación en función del tiempo. Se observó que la eficiencia energética es de 13.2% para días de baja radiación y 18,6% para días de radiación alta.

#### 1.4.2. ESTADO DEL ARTE INTERNACIONAL

##### A. “Rendimiento térmico del colector solar de placa plana y modo de operación óptimo mediante análisis de exergía y simulación numérica”.

(Koholé et al., 2021)

En esta investigación, los autores centran su estudio en el efecto de las tasas de destrucción de exergía, en los componentes de un colector solar de placa plana, sobre la productividad de este. Tras la verificación de la precisión del modelo propuesto con datos experimentales, se indagó el efecto y optimización de parámetros como el caudal másico, la temperatura del fluido de entrada y el grosor del aislamiento del sistema, que dependen conjuntamente de la radiación solar con el tiempo en el que se efectúan las pruebas.

Los resultados evidenciaron, que cuando la temperatura del fluido de entrada aumenta de 20 a 50 °C, la tasa de destrucción de exergía de la placa absorbente del captador disminuye de 676,66 a 438,40 W/ m<sup>2</sup>, lo que da como resultado un aumento significativo en la eficiencia de exergía del colector de 6,80 a 37,86 %. Con los ensayos realizados en el proyecto, también, se pudo determinar que la condición óptima de operación de captador solar era 37 °C para la temperatura del fluido de entrada, 0,0087 kg/s para el caudal másico y quince para el número de tubos. Por último, los autores resaltan que se debe profundizar sobre los estudios de la exergía, porque esta propiedad ha ayudado a superar las deficiencias del análisis de energía de los colectores solares; haciendo que se realice una operación más precisa de la condición y el rendimiento óptimo del funcionamiento del captador solar.

##### B. “Evaluación experimental del rendimiento de un nuevo colector solar de aire de placa plana con tejido textil como absorbedor mediante análisis de energía y exergía”. (Ural, 2019)

Los autores de este artículo técnico-científico iniciaron su escrito resaltando la importancia la revisión de la literatura, determinado que varias investigaciones se han centrado en aumentar el rendimiento, como las temperaturas de salida de los

colectores solares, mediante el diseño de diferentes formas y tipos de placas absorbentes. De modo que, este estudio se centra en la comparación experimental de los rendimientos termodinámicos y económicos del captador solar de placa plana y un nuevo equipo que fue especialmente diseñado con un tejido plano diagonal a través del cual se proporciona el flujo de aire.

Los análisis de energía y exergía se realizan, mediante el uso de la temperatura, presión, volumetría, caudal y potencia eléctrica, recopilados durante las pruebas experimentales, que fueron definidas en valores de hora promedio cada 3 meses en el año 2018, en los que el entorno y las condiciones de prueba son similares. Los resultados del estudio muestran que las eficiencias energéticas en los dos colectores analizados son del 70% para el de placa plana y 53% en el de tejido plano. Sus eficiencias exergéticas son del 41% y 31%, respectivamente. Se infiere que es más beneficioso utilizar el equipo de tejido textil como absorbente, ya que su estructura disminuye la destrucción de exergía y permite un éxito específico en este estudio, aumentando el rendimiento de los sistemas almacenamiento térmico utilizados en la actualidad. Incluso, este estudio proporciona información útil para diferentes aplicaciones en sistemas de secado de productos agrícolas.

**C. “Análisis energético, exergético, económico y ambiental (4E) de colectores solares de aire de placa plana y ranura en V basados en aluminio y cobre”. (Abuşka & Şevik, 2017)**

En este estudio científico los autores plantearon una investigación experimental para estudiar el efecto energético, económico y ambiental de los colectores solares planos, que son de tipo lisos y rugosos, que se encuentran dispuestos en materiales de cobre y aluminio. Los análisis de energía, exergía, económicos y ambientales (4E) se indagaron utilizando los datos obtenidos de estudios experimentales a caudales máxicos de aire entre 0,04 y 0,1 kg/s.

Como resultado, se determinaron los impactos térmicos, económicos y ambientales para obtener una mejora en el rendimiento de los colectores solares planos. También, se revela en el estudio que las eficiencias térmicas y exergéticas

promedio de los captadores solares, para la región en que se instalaron los equipos, fueron de 43–60% y 6–12%, respectivamente. Igualmente, entre todos los tipos de sistemas estudiados, el que tenía un diseño con ranura en V de cobre, sobresalió demostrando las mayores mejoras de transferencia de calor con los factores de fricción más altos que los del rendimiento térmico del tipo plano con ranura en V de cobre; de lo anteriormente dicho, se concluye que los datos obtenidos con este tipo de sistema se encuentran entre los más altos probados dentro de este campo de almacenamiento térmico de la energía solar. Finalmente, se encontró mediante los resultados de los experimentos, que la generación de energía en colectores solares de placa plana ranurados en V es factible, dependiendo de la cantidad de irradiación de energía solar y de las condiciones ecológicas que tenga el ambiente al que se someta el sistema investigado.

## 2. MARCO REFERENCIAL

### 2.1. MARCO TEORICO

#### 2.1.1 Segunda ley de la termodinámica

El segundo principio de la termodinámica enuncia que: "No es posible que el calor fluya desde un cuerpo frío hacia un cuerpo más caliente, sin necesidad de producir ningún trabajo que genere este flujo". (Çengel & Boles, 2012)

El mismo, también establece que, en cualquier transferencia o conversión de energía dentro de un sistema cerrado, la entropía del sistema aumenta, siendo este término, el que define las desigualdades en los sistemas mediante su fundamento de que un proceso es reversible, si la exergía se conserva e irreversible, si la exergía se destruye.

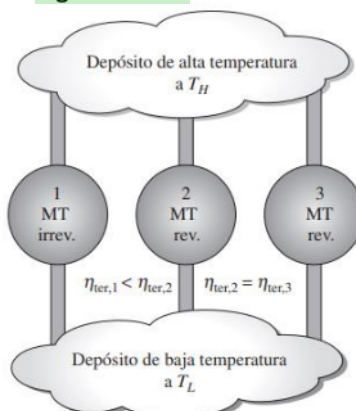
Las consecuencias de la segunda ley pueden, por lo tanto, establecerse como la dirección espontánea o natural de la transferencia o conversión de energía es hacia el aumento de la entropía o todas las transferencias o conversiones de energía son irreversibles. Más vagamente, la primera ley de la termodinámica implica que "No se puede ganar" porque la energía se conserva, por lo que no puede obtener más energía de un sistema de la que se tiene inicialmente, mientras que en la segunda ley se establece que "No puede alcanzar el punto de equilibrio" porque las irreversibilidades durante los procesos reales no lo hacen; no se permite recuperar la calidad original de la energía que puso en un sistema, ya que el sistema sufre una degradación de energía hasta llegar a un estado de armonía con su entorno. (Dincer & Rosen, 2020)

#### 2.1.2 Ciclo de Carnot

Probablemente el ciclo inverso más famoso es el ciclo de Carnot, propuesto por el ingeniero francés Sadi Carnot en 1824. "La máquina térmica teórica que opera en el ciclo de Carnot, cuyo ciclo se compone de cuatro procesos reversibles, dos

isotérmicos y dos adiabáticos, y que es posible llevar a cabo en un sistema cerrado o de flujo estacionario". (Çengel & Boles, 2012)

Figura 1. Ciclo de Carnot.



Fuente: (Çengel & Boles, 2012)

La segunda ley de la termodinámica limita la acción de los equipos cíclicos, dado que los dispositivos térmicos no pueden operar intercambiando calor con un solo recipiente y los refrigeradores no pueden operar sin energía externa de entrada. Se pueden extraer importantes conclusiones de estos datos; dos de ellas se relacionan con la eficiencia térmica de la máquina que es reversible e irreversible. (Çengel & Boles, 2012)

Así mismo según la figura 1, se conocen como principios de Carnot los cuales se manifiestan como:

- La eficiencia de un equipo térmico no reversible es siempre menor que la de un motor reversible que opera entre dos contenedores idénticos.
- La eficiencia del equipo térmico inverso que funciona entre los dos tanques iguales es la misma.

A pesar de los estudios realizados por Carnot en los motores, él estableció que siempre se puede hallar experimentalmente un límite superior para el trabajo que puede realizar un artefacto, y de aquí nace el punto de partida sobre de la definición

de exergía como el trabajo máximo que puede producir un sistema con su entorno de referencia.

### 2.1.3 Evaluación exergética en sistemas

Como parte de los estudios presentados en este proyecto de investigación, se realiza un estudio integral del análisis de la segunda ley de la termodinámica, donde se puedan obtener los principios termodinámicos básicos sobre la aplicación de la exergía en los colectores solares como sistema de almacenamiento térmico. Con el objetivo de ofrecer un fuerte soporte investigativo sobre la exergía con sus áreas esenciales en términos de energía, medio ambiente y desarrollo sostenible, se presenta a continuación el siguiente libro técnico-científico:

“Exergía: Energía, Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible” (Dincer & Rosen, 2020)

Los autores de este escrito exergético, exponen que cuando un ingeniero estudia un sistema, se espera que dirija su investigación hacia una mayor eficiencia técnica razonable con el menor costo posible, lo anterior, bajo condiciones técnicas, económicas y legales establecidas. En este escrito se presenta un procedimiento especializado para el análisis de exergía, reconociendo que la calidad de energía puede degradarse hasta llegar en equilibrio con su entorno, por esto mismo, los escritores ofrecen información única sobre tipos, ubicaciones, causas de pérdidas e identificación de posibles mejoras en sistemas específicos. A continuación, se plantea la metodología de análisis de exergía:

- Subdividir el proceso bajo consideración de las secciones que se desee, dependiendo de la profundidad de detalles y análisis deseado.
- Aplicar balances de masa y energía convencionales para determinar las propiedades termodinámicas definidas.
- En función de la naturaleza del proceso, el grado de complejidad y la precisión del análisis, seleccionar un modelo de referencia.



- Evaluar los valores de energía y exergía, en relación con el modelo de referencia.
- Realizar balances de exergía, incluyendo la determinación de consumos, perdidas y destrucciones exergéticas en el sistema.
- Seleccionar definiciones de eficiencia y valorar los datos obtenidos.
- Interpretar los resultados y extraer conclusiones y recomendaciones apropiadas, en relación de cuestiones como cambios de diseño, modificaciones en la planta, etc.

Esta teoría de investigación e innovación es realmente importante, ya que proporciona un proceso de desarrollo altamente aplicable dentro de la evaluación exergética brindando la oportunidad de conocer una serie de ejemplos ilustrativos, adaptaciones prácticas y estudios de casos relacionados con el tema de este trabajo de investigación. Así mismo, este aporte permite aumentar la actividad investigativa sobre el análisis exergético en colectores solares; puesto que contiene un estilo factible de proceder, exponiendo aplicaciones en sistemas básicos y avanzados. (Dincer & Rosen, 2020)

#### 2.1.4 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se puede utilizar para evaluar dos tipos de sensibilidad: individual o local, describiendo el efecto sobre la salida de las diferencias en cada parámetro de entrada; y global, teniendo en cuenta las interacciones de todos los parámetros de ingreso. En el primer caso, permite seleccionar las variables de entrada que más influyen en la salida (por lo tanto, deben elegirse con cuidado) y las variables a la salida son insensibles para producir una especificación que puede ser muy precisa. En el otro caso, se ayuda a evaluar la precisión del programa en términos de predicción absoluta. (Flores & Lesino, 2005)

Un ejemplo de análisis de sensibilidad es el el método diferencial, que “consiste en variar un parámetro de entrada por vez, es de sencilla aplicación cuando el

número de estas variables a analizar es pequeño, y permite obtener una estimación de la sensibilidad individual de cada uno de los parámetros". (Flores & Lesino, 2005)

## 2.2. MARCO HISTORICO

La tecnología solar, no es nueva, sus primeras aplicaciones se remontan al siglo VII a.C. cuando los griegos y los romanos usaban espejos ardientes para encender antorchas con fines religiosos. También se dice que, el científico griego Arquímedes utilizó las propiedades de los reflectores en los escudos de bronce para concentrar la luz solar y encender el fuego a los barcos de madera del Imperio. Igualmente, en esta época se diseñaron casas en lugares estratégicos, que garantizaran el acceso individual al sol para tener calor dentro las viviendas en tiempo de invierno. (Kimball & Fox, 2015)

A continuación, se expondrán las fechas más importantes en la historia, que dieron lugar a la temática central del proyecto de investigación; exergía y colectores solares.

- En 1864, Sadi Carnot estudió lo que ahora se llama el motor de Carnot, y demostró mediante un experimento, que cualquier motor térmico que funcionara mejor que este, sería una máquina de movimiento perpetuo. Esta descripción de un límite superior para el trabajo que puede realizar una máquina fue la primera formulación moderna de la segunda ley de la termodinámica como de la entropía, y también, fue un punto de partida para comprender el concepto de exergía. (Kimball & Fox, 2015)
- En 1870, Josiah Gibbs "incorporó el nuevo concepto de un potencial químico que describen las diferencias del equilibrio de la termodinámica, derivando los cálculos de la "energía disponible del cuerpo y el medio" a la forma que tiene hoy, dentro de la exergía". (Kimball & Fox, 2015)
- En 1767, "se le atribuyo al científico suizo Horace de Saussure la construcción del primer colector solar del mundo, que más tarde Sir John

Herschel utilizó para cocinar alimentos durante su expedición a Sudáfrica”.  
(Kimball & Fox, 2015)

- En el año 1860, el matemático francés August Mouchet propuso una idea para las máquinas a vapor alimentadas por energía solar. En las siguientes dos décadas, él y su asistente construyeron los primeros motores alimentados por energía solar que se convirtieron en los predecesores de los modernos colectores de discos parabólicos. (Kimball & Fox, 2015)
- Durante el año de 1909, “William Bailey invento el primer colector solar plano, con bobinas de cobre y una caja aislada, usando agua o aire como medios térmicos de fluidos de trabajo, este es aproximadamente el diseño usado actualmente”. (Yao et al., 2020)
- En 1942, “Hottle y Woertz, analizaron el rendimiento térmico de los colectores solares de placa plana a base de agua o aire, destinados para el almacenamiento de energía térmica”. (Yao et al., 2020)
- En 1955, Whillier y Hottle derivaron el factor de eficiencia y evaluaron otros factores importantes de los colectores solares de placa plana. Dentro de este mismo año, Sporn y Ambrose propusieron por primera vez un sistema de bomba de calor asistida por energía solar de expansión directa utilizando un captador de placa plana. (Yao et al., 2020)
- En el año de 1959, “el científico Bliss derivó el factor de eficiencia de varios tipos de colectores solares de placa plana que usaban como fluido de trabajo el agua o aire”. (Yao et al., 2020)
- Durante 1976, la Universidad de Delaware construye "Solar One", una de las primeras residencias con un sistema que combina colectores solares y células fotovoltaicas. Los conjuntos integrados en el techo alimentaban el excedente de energía a través de un medidor especial a la empresa de servicios públicos durante el día y compraban energía de la empresa de servicios públicos de noche. (Yao et al., 2020)

Todos estos avances técnico-científicos ayudaron a desarrollar modelos colectores solares planos, empezando por definir el fluido a trabajar para alguna aplicación en específico. En la actualidad, se tienen muchas investigaciones que trabajan en el estudio de esta energía renovable, con el objetivo de que se permita la combinación ideal del diseño y construcción de sistemas de almacenamiento térmico provenientes de la energía solar, para que, de esta manera se puedan tener procesos energéticamente eficientes.

### 2.3. MARCO CONCEPTUAL

Según (Akpınar & Koçyiğit, 2010), normalmente los colectores solares planos de aire se componen de:

- Cubierta de vidrio: es un material transparente que permite la captación de los rayos solares, se debe considerar sus dimensiones y protección para que permita una buena transferencia de calor al aire que transita por el sistema.
- Placa absorbente: se utiliza en la mayoría de los casos una placa metálica con diferentes obstáculos para generar turbulencia en el fluido. También, permite la absorción de la radiación solar para transferir el calor al aire y MCF.
- Estructura: carcasa que permite depositar y asegurar cada uno de los componentes del colector solar.

Para definir la condición de operación de un colector solar plano con almacenamiento térmico, se debe tener en cuenta la temperatura de fusión del material de cambio de fase (MCF). En este proyecto, se utiliza la parafina como componente para almacenar la energía térmica del sistema, y según (Kahwaji et al., 2018) requiere temperaturas mayores a 40°C para pasar de su estado sólido a líquido. Por lo anterior, se establece que el captador solar plano de 3 m<sup>2</sup> analizado en la presente investigación, estará trabajando hasta que la temperatura de salida del aire este sobre los 36°C, ya que con valores menores no se estará aprovechando las propiedades de la parafina para acumular calor y secar aire.

**Energía.** “La energía retorna en muchas formas, como forma de trabajo. La termodinámica juega un papel clave en el análisis de procesos, sistemas y dispositivos en los que se producen transferencias y transformaciones de energía”. (Dincer & Rosen, 2020)

**Masa de control.** “Se define como un sistema cerrado que contiene una cantidad fija de materia, en el que no entra ni sale masa”. (Dincer & Rosen, 2020)

**Volumen de control.** “Se establece como un sistema abierto en el que se permite la entrada y/o salida de materia”. (Dincer & Rosen, 2020)

**Entropía.** “Es la distinción entre procesos reversibles e irreversibles, también, se define como una medida de desorden, que siempre aumenta para el universo”. (Dincer & Rosen, 2020)

**Entalpía.** “La entalpía de un compuesto es evaluada en relación con los componentes estables del entorno de referencia, es decir, en relación con el estado muerto”. (Dincer & Rosen, 2020)

**Calor.** “El calor es una cantidad de flujo, es decir, energía en tránsito. Igualmente, está definido como una forma de transferencia de energía entre sistemas debido a una diferencia de temperatura”. (Dincer & Rosen, 2020)

**Capacidad de calor.** “Es la relación entre el calor absorbido en una sustancia y el aumento de temperatura resultante. El cambio de temperatura depende del proceso de calentamiento, siendo más común el volumen o la presión constante”. (Dincer & Rosen, 2020)

**Proceso irreversible.** “Se define como un proceso en el que tanto el sistema como su entorno no pueden regresar a su(s) estado(s) inicial(es) a través de un proceso reversible posterior”. (Dincer & Rosen, 2020)

**Proceso reversible.** “Establecido como un proceso en el que tanto el sistema como su entorno pueden regresar a su(s) estado(s) inicial(es) sin efectos observables”. (Dincer & Rosen, 2020)

**Exergía.** “Término general para el potencial de trabajo máximo de un sistema, flujo de materia o interacción de calor en relación con el entorno de referencia como estado de referencia”. (Dincer & Rosen, 2020)

A continuación, se presenta en la tabla 1 una comparación entre los fundamentos de energía y exergía:

**Tabla 1.** Comparación entre energía y exergía.

Energía	Exergía
Depende de las propiedades de un solo flujo de materia o energía, y es independiente del entorno.	Depende de las propiedades, tanto de un flujo de materia o energía como del medio ambiente.
Tiene valores diferentes a cero cuando está en equilibrio con el medio ambiente.	Igual a cero cuando está en estado muerto, estando en completo equilibrio.
Conservada para todos los procesos, basado en la primera ley de la termodinámica.	Conservada para procesos reversibles y no conservada para los reales, basado en la segunda ley de la termodinámica.
No se puede destruir ni producir.	No se puede destruir ni producir en proceso reversible, pero siempre se destruye en irreversible.
Aparece en muchas formas (energía cinética, potencial, trabajo y calor), midiéndose en las respectivas unidades.	Aparece en muchas formas (exergía cinética, potencial, térmica y trabajo), midiéndose en función del trabajo.
Es una medida de cantidad solamente.	Es una medida de cantidad y calidad.

Fuente: Autora.

**Exergía química.** “Se conoce como el trabajo máximo que se puede obtener de una sustancia cuando se la lleva del estado ambiental al estado muerto por medio de procesos que involucran interacción únicamente con el medio ambiente”. (Dincer & Rosen, 2020)

**Exergía física.** “Es la cantidad máxima de trabajo del eje que se puede obtener de una sustancia cuando se lleva de su estado inicial al estado ambiental mediante procesos físicos que involucran interacción únicamente con el medio ambiente”. (Dincer & Rosen, 2020)

## 2.4. MARCO LEGAL

A continuación, se presenta la normativa vigente en Colombia relacionada con la transición energética y el uso de la energía solar, como fuente no convencional de energía renovable.

**Ley 1715 del 2014.** Mediante la cual se disponen normas en el sistema energético nacional sobre la implementación y uso de energías limpias que son propias del pueblo, academia, grupos públicos y privados. También, considera que la energía solar, se debe examinar e investigar bajo las condiciones propias de la naturaleza para obtener la regulación por parte de la CREG. Igualmente, se impone que las autoridades del gobierno deberán tener entre sus funciones comunicar los beneficios del recurso solar en espacios específicos en común. (Ley 1715, 2014)

**Decreto 2469 de 2014 diciembre.** Por la que se insta el ámbito jurídico y las utilidades para la generación, progreso y empleo de las fuentes no convencionales de energía, particularmente las de condición renovable. (Decreto 2469, 2014)

**Decreto 1073 2015 mayo.** Mediante la cual se tramita el “decreto único reglamentario del sector administrativo de minas y energía”. También, se considera que el Ministerio de Minas y Energía tiene como finalidad manifestar, aprobar, orientar y administrar la diplomacia, ideas y propósitos del sector encargado del uso de energías en el país. (Decreto 1073, 2015)

**Decreto 348 de marzo del 2017.** “Por el cual se adiciona el Decreto 1073 de 2015, en lo que respecta al establecimiento de los lineamientos de política pública en materia de gestión eficiente de la energía y entrega de excedentes de autogeneración a pequeña escala”. (Decreto 348, 2017)

## 2.5. MARCO AMBIENTAL

Con la finalidad de llevar a cabo el análisis exérgica de un colector solar plano, cuyo fluido de trabajo es aire, se consideran varias regulaciones aplicables dependiendo de la aplicación del proyecto, pero en general existen las siguientes

regulaciones ambientales que no pueden ser ignoradas cuando se utiliza este modelo de energía renovable.

**Ley 697 de 2001.** En la que su finalidad es impulsar y aconsejar, los programas con proyección y el empleo de energías no convencionales, en línea con las orientaciones del temario programado para el manejo razonable y eficaz de la energía y otras formas de energía no convencionales; a menudo, mediante el estudio de su viabilidad ahorrativa, financiera y ambiental. Además, en esta ley se destaca el uso inteligente y recto de cualquier tipo de energía, también se enfatiza el uso correcto de las energías alternativas y se abordan otros temas similares. (Ley 697, 2001)

**Decreto 3683 de 2003.** El objetivo del presente mandato es regular el uso lógico y eficaz de la energía, con la más alta eficacia energética a fin de afianzar el adecuado y oportuno suministro de energía, la gran competencia del mercado de energía en Colombia, el resguardo del uso de los consumidores y el aumento de las fuentes de energía no convencionales, en el ámbito del progreso sustentable, el cumplimiento de la normativa ambiental y de recursos naturales renovables aplicables. (Decreto 3683, 2003)

**Ley 1753 de 2015.** Se estableció la presente, en cuestión de evaluar el impacto ambiental en Colombia; en la cual se dispone principalmente un documento direccionado al desarrollo sostenible del ambiente, también, se resalta la importancia “sobre el lugar en el que se desee realizar un proyecto, como los elementos vivos y no vivos presentes en el ambiente, aspectos socioeconómicos del lugar que pueda padecer deterioro por la actividad que se realizara”. (Ley 1753, 2015)

**Ley 2099 de 2021.** Mediante la cual “se dictan disposiciones para la transición energética, la dinamización del mercado energético, la reactivación económica del país y otras disposiciones. Establece priorización de los trámites ambientales para proyectos del sector de energía que cumplan ciertas condiciones”. (Ley 2099, 2021)



### 3. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION

Con el propósito de realizar un análisis exergético de un colector solar plano de 3 m<sup>2</sup> con almacenamiento térmico, destinado al calentamiento de aire para secar productos agrícolas; se tendrá en cuenta el siguiente procedimiento para cumplir con los objetivos trazados en el proyecto de investigación:

1. Llevar a cabo una revisión bibliográfica en la literatura especializada, mediante el uso de la herramienta VOSviewer, que proporciona gráficos sobre redes que relacionan indagaciones que contienen términos similares sobre las metodologías y variables termodinámicas usadas, para el cálculo exergético en colectores solares planos.
2. Realizar el mantenimiento y las pruebas experimentales en el colector solar que se encuentra en las instalaciones de la Institución. Se plantea una toma de datos y monitoreo de las variables termodinámicas requeridas para los cálculos exergéticos, en el mes de Julio del año 2022.
3. Desarrollar una metodología que permita realizar la evaluación exergética del sistema, donde se reúnan los parámetros encontrados en la literatura y los hallados con las pruebas en el colector solar, para aplicarlos en los cálculos balance de masa, energía y exergía.
4. Crear una tabla dinámica que permita guardar todas las variables obtenidas de forma teórica y experimental, para que de esta manera se pueda visualizar de un modo más factible todos los datos y cálculos obtenidos, que luego sustentan el análisis exergético en el equipo solar plano estudiado.
5. Realizar un análisis de sensibilidad en el equipo que permita visualizar mejores comportamientos en la eficiencia exergética del sistema, para que, cuando se cambien algunas variables influyentes en el proceso, se pueda alcanzar un incremento del trabajo útil en el colector solar plano de 3 m<sup>2</sup> con el ambiente al que está expuesto.

## 4. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO

### 4.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA EN LA LITERATURA

Inicialmente, se destaca la importancia de encontrar información sobre los colectores solares planos para el secado de productos, puesto que la indagación en la literatura es una parte esencial del presente proyecto de desarrollo tecnológico. En este apartado se establecen las palabras claves indicadas para encontrar la información precisa que permita ser punto de partida para esta indagación, y al identificar aquellos artículos y libros de alto impacto con relación a la bibliografía disponible, se garantiza un óptimo análisis exergético del sistema.

Para dar comienzo a la búsqueda intensiva de documentos referentes al desarrollo de la exergía en los colectores solares de placa plana, se aborda la base de datos Scopus que es propiedad de la editorial académica Elsevier, la cual permite acceder a bases de datos con una inmensa cantidad de revistas técnico-científicas de alto impacto y que se encuentran investigaciones de categoría internacional.

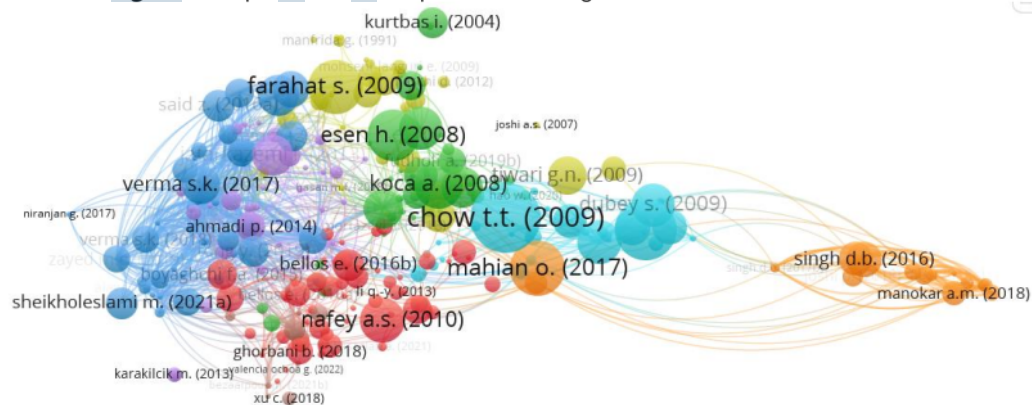
En base a los servicios que ofrece esta base de datos sobre información científica, se establece la siguiente formulación de investigación "exergy\* AND flat solar collector" con el objetivo de indagar en temas de exergía y colectores solares planos. Con la formulación hecha anteriormente y al analizar los resultados arrojados por el banco de datos, se obtuvieron 378 documentos que se encuentran relacionados con el tema de investigación. En el presente trabajo, se decidió usar un programa para el análisis de bases de datos llamado VOSviewer, con el cual es viable procesar el registro obtenido por la fórmula de búsqueda y hacer un estudio gráfico de las palabras claves, verificando el contenido de los documentos como se observa a continuación.



La tercera línea de investigación se orienta hacia el uso la <sup>36</sup>energía solar, eficiencia térmica y la radiación solar. Siendo esta última, una línea de interés para el proyecto, ya que según la condición meteorológica que se tenga, la irradiación es una variable importante para el hallazgo del trabajo útil de entrada al colector solar. En ella se destacan palabras claves como estudios experimentales, caudal, aire presurizado y otras características importantes para la elaboración de los parámetros de entrada al colector solar plano.

Para aumentar el procesamiento del registro de los documentos y libros científicos seleccionados en la base de datos, también se dispone a graficar, una red de acoplamiento bibliográfico <sup>44</sup>como se muestra a continuación.

**Figura 3.** Mapa de red de acoplamiento bibliográfico destacadas en la literatura.



Fuente: Autora de VOSviewer.

Se puede observar en la figura 3, una red de 189 nodos o documentos, que tienen al menos dos coincidencias dentro de 378 documentos, en los que es posible evidenciar la bibliografía de los diferentes apartados; con esta red es posible identificar aquellos libros que tienen un impacto importante mediante los vínculos generados entre ellos, aquellos que tienen mayor cantidad de conexiones entre otros nodos dentro de la red, son seleccionados para su lectura en orden de mayor número de conexión del documento.

De acuerdo con la revisión bibliográfica hecha anteriormente, en la tabla 2 se pueden observar los documentos relevantes utilizados para el desarrollo del estudio.

**Tabla 2.** Documentos bibliográficos relevantes en la investigación.

Título del documento	Autor	Revista	Tipo de revista	Ranking de la revista
Análisis de energía y exergía de un nuevo aerotermo-solar de placa plana con diferentes obstáculos en las placas absorbentes.	(Akpınar & Koçyiğit, 2010)	Applied Energy	Ingeniería energética	(Q1)
Análisis exergético de colectores y procesos solares térmicos.	(Kalogirou et al., 2016)	Progress in Energy and Combustion Science	Ciencia de la energía y la combustión	(Q1)
Evaluación experimental del rendimiento de un nuevo colector solar de aire de placa plana con tejido textil como absorbedor mediante análisis de energía y exergía.	(Ural, 2019)	Energy	Ingeniería energética	(Q1)
Evaluación termodinámica y económica para la generación eléctrica por medio de la incineración de residuos sólidos urbanos.	(Castillo, 2019)	Tesis Maestría	-	-
Energía, Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible.	(Dincer & Rosen, 2020)	Editorial Elsevier	-	-

Fuente: Autora.

#### 4.2. PRUEBAS EXPERIMENTALES EN COLECTOR SOLAR

Antes de iniciar las pruebas se debe verificar que el equipo cumpla con las siguientes condiciones.

- El fluido de transferencia de calor, en este caso parafina mediana se encuentre dentro de los tres depósitos del colector solar plano.
- La adhesión de las cubiertas de vidrio con silicona negra, para que el cristal no sufra daños al contacto con el metal.
- El ventilador centrífugo a la entrada del sistema, para que genere un flujo volumétrico de 10 m/s del aire que entra al captador de rayos solares.

A continuación, se aprecia en la figura 4 el equipo solar plano usado para realizar las pruebas experimentales que permitirán el análisis exergético del sistema.

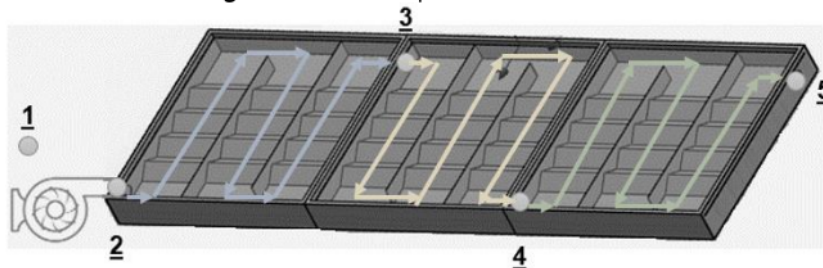
**Figura 4.** Colector solar plano dispuesto para pruebas.



Fuente: Autora.

Para realizar la toma de datos, se definen principalmente los puntos de acceso, llamadas corrientes del fluido de aire que transitan en el sistema. A continuación, en la figura 5 se observa un esquema de los lugares establecidos para realizar las pruebas en el colector solar plano.

**Figura 5.** Puntos de prueba en el sistema.



Fuente: Autora.

A continuación, se establecen las siguientes corrientes del sistema.

- Corriente 1: Se encuentra a la entrada del ventilador con el ambiente.
- Corriente 2: Se localiza en la entrada del colector solar plano.
- Corriente 3: Se considera entre los cajones 1 y 2 del equipo solar.
- Corriente 4: Se establece entre los cajones 2 y 3 del colector.
- Corriente 5: Se ubica en el punto de salida del colector solar plano.

Se establece una toma de las variables termodinámicas, en intervalos de 8 am a 5 pm cada 45 minutos al día; estas pruebas se realizaron en el mes de Julio del año 2022. A continuación, se exponen los instrumentos de medida usados para analizar el comportamiento del colector solar plano sobre calentamiento del aire:

- El primer equipo es el anemómetro, el cual permite medir las temperaturas y velocidades de entrada, como de salida del colector solar de placa plana.

**Figura 6.** Anemómetro digital.



Fuente: Autora.

- El segundo es el termostato digital, que permite medir la temperatura del ambiente para cada prueba que se va a realizar, porque esta medida con la presión atmosférica son patrones requeridos para determinar varios parámetros termodinámicos para el análisis de exergía.

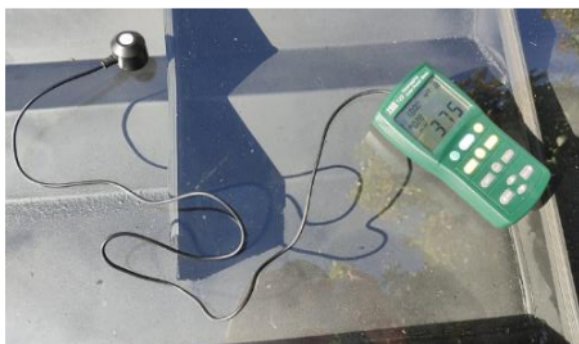
**Figura 7.** Termostato digital.



Fuente: Autora.

- El tercer instrumento de medida es el piranómetro, con el cual se puede cuantificar la intensidad de la irradiación solar en  $W/m^2$ . Este es un factor que permite tener un estimado de la eficiencia del sistema de calentamiento de aire, de acuerdo, con las condiciones meteorológicas para el secado de alimentos.

**Figura 8.** Piranómetro digital.



Fuente: Autora.



- El cuarto equipo es el manómetro, el cual alcanza a medir la caída de presión en pascales (kPa) a la entrada y salida del colector solar plano.

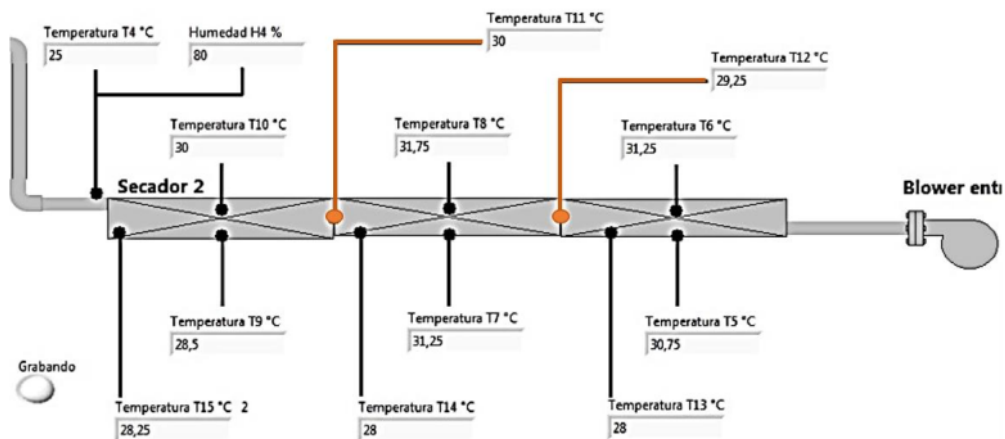
Figura 9. Manómetro digital.



Fuente: Autora.

- Por último, fue necesario tener en cuenta un programa de adquisición de datos para analizar las variables termodinámicas entre cajones 1-2 y 2-3 como se muestra en la figura 10, este programa pertenece al grupo DIMAT de las Unidades Tecnológicas de Santander. (Jaimes & Carreño, 2021)

Figura 10. Programa de adquisición de datos del colector solar.

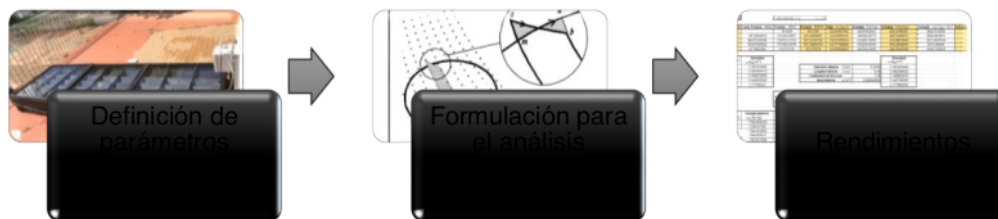


Fuente: (Jaimes & Carreño, 2021)

### 4.3. METODOLOGÍA PARA CÁLCULOS EXERGÉTICOS

La metodología para realizar las operaciones que permitan efectuar el análisis exergético del colector solar plano estudiado, orienta su desarrollo para el cumplimiento de su tercer objetivo, como se muestra en la Figura 11, se divide en tres fases, cada una de las cuales se originan del procedimiento hecho en el libro expuesto por (Dincer & Rosen, 2020).

**Figura 11.** Metodología para cálculos exergéticos.



Fuente: Autora.

#### 4.3.1 Definición de parámetros iniciales del sistema.

En el presente proyecto de investigación, se utiliza una configuración experimental que consta de un colector solar plano, ventilador, instrumentos de control y medición para analizar el comportamiento y rendimiento del sistema. El equipo se ubica en la sede recreacional de las Unidades Tecnológicas de Santander del municipio de Bucaramanga/Santander exactamente latitud y la longitud de  $7^{\circ}7'31.4''$  N  $73^{\circ}7.188'$  O, respectivamente.

El proceso de calentamiento del fluido, comienza cuando el aire exterior se lleva a la entrada del colector por medio de un ventilador y luego, a través de la parafina acumulada en los compartimientos, se permite el almacenamiento térmico, para posteriormente aumentar la temperatura del fluido a partir de la radiación solar que reciben los vidrios puestos sobre el captador y después, enviar el aire a alta temperatura en la salida del equipo, a un equipo secador de productos agrícolas.

En la tabla 3 y tabla 4, se ilustran las especificaciones técnicas y los parámetros iniciales del colector solar plano, ventilador y tuberías, con los cuales se realizó la evaluación energética y exergética.

**Tabla 3.** Especificaciones técnicas del sistema.

<b>Colector solar plano</b>		
<b>Especificación</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Tamaño	1x3x0,1	m
Área	3	m <sup>2</sup>
Espesor tanque de absorción	0,05	m
Cubierta superior	Vidrio de 0,4	mm
Recubrimiento placa absorbente	Color oscuro (negro)	
Grosor placa absorbente	0.02	m
Fluido de almacenamiento térmico	Parafina mediana	
Fluido de trabajo	Aire	
Tipo de transferencia de calor	Convección forzada	
<b>Ventilador</b>		
<b>Especificación</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Potencia	120	W
Voltaje	110-120	V
Caudal	1.4	m <sup>3</sup> /min
Eficiencia ventilador	75	%
<b>Tubería</b>		
<b>Especificación</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Diámetro ( <i>d</i> )	0.0508	m
Longitud ( <i>l</i> )	0.08	m
Área	0.00202683	m <sup>2</sup>

Fuente: Autora.

**Tabla 4.** Parámetros iniciales del sistema.

<b>Parámetros iniciales del sistema</b>			
<b>Especificación</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>	<b>Referencia</b>
Temperatura alrededores	25	°C	(Dincer & Rosen, 2020)
Temperatura del sol	5,770	°C	(Dincer & Rosen, 2020)
Presión alrededores	101.325	kPa	(Dincer & Rosen, 2020)
Volumen específico del aire ( $v_{aire}$ )	0.78	$\left[\frac{m^3}{kg}\right]$	(Moran & Shapiro, 2004)
Exergía química teórica del aire	34,050	$\left[\frac{J}{mol}\right]$	(Dincer & Rosen, 2020)
Constantes de los gases ideales	8,314472	$\left[\frac{J}{mol * K}\right]$	(Moran & Shapiro, 2004)
Calor específico del aire ( $C_{p_{air}}$ )	1.007	$\left[\frac{J}{kg * K}\right]$	(Moran & Shapiro, 2004)
Peso total de una mol de aire	28,7364	$\left[\frac{kg}{mol}\right]$	(Dincer & Rosen, 2020)

Emisividad placa del colector ( $\tau$ )	0.4	-	(Ural, 2019)
Absortividad placa del colector ( $\alpha$ )	0.9	-	(Ural, 2019)
Velocidad de entrada del aire	10	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Autora
Horas de operación	9	Horas	Autora

Fuente: Autora.

### 4.3.2 Evaluación energética y exergética.

El procedimiento utilizado para el estudio energético y exergético es explicado en la figura 12. Después de definir los parámetros iniciales del sistema (Tabla 3), se calculan las principales propiedades termodinámicas en cada estado (Presión (P), densidad ( $\rho$ ), Entalpía (h) y Entropía (s), estas dos últimas por unidad de masa y mol). Para lo dicho anteriormente, se uso el software CoolProp el cual da la oportunidad calcular los factores termodinámicos con precisión a partir de formulaciones de tipo explícito de energía Helmholtz multiparamétrica. (Bell et al., 2014)

Con las propiedades ya definidas en cada estado se puede calcular:

- La transferencia de energía térmica a través del espacio hacia la Tierra.

$$\dot{Q}_{radiacion,solar} = I * (\tau * \alpha) * A_{colector} \quad (1)$$

Dónde  $A_{colector}$  es el área proyectada del calentador en (m<sup>2</sup>) e  $I$  es la radiación solar total incidente en el equipo (W/m<sup>2</sup>).

- El aire ingresa por convección interna forzada, impulsado por el ventilador.

$$\dot{Q}_{colector,aire} = \dot{m}_{air} * Cp_{air} * (T_{out} - T_{in}) \quad (2)$$

- La eficiencia energética del colector solar plano.

$$\eta_{colector} = \frac{\dot{Q}_{colector,aire}}{\dot{Q}_{radiacion,solar}} \quad (3)$$

- La caída de presión en cada corriente de aire según (TLV, 2022) es:

$$\Delta p = \frac{\mu * l * v_i^2 * \rho_i}{2 * d} \quad (4)$$

Donde  $\mu$  es igual a 1.15 y se define como el coeficiente de fricción del aire. La longitud y el diámetro de la tubería por la que pasa el fluido de trabajo del colector solar plano, se establecen como  $l$  y  $d$  respectivamente.

- Los flujos de exergía por unidad de masa.

$$e_i = e_{quimica} + e_{fisica} \quad (5)$$

También, se define el flujo de exergía de la siguiente manera.

$$E_i = e_i * \dot{m} \quad (6)$$

Para el aire se formulan la exergía química y física del siguiente modo.

$$e_{quimica} = \frac{\bar{e}_{quimica-aire} + R * T_0 * \ln\left(\frac{P_0}{P_i}\right)}{\sum X_i * Y_i} \quad (7)$$

$$e_{fisica} = \frac{(\bar{h}_i - \bar{h}_0) - T_0 * ((\bar{s}_i - \bar{s}_0) - R * \ln\left(\frac{P_i}{P_0}\right))}{\sum X_i * Y_i} \quad (8)$$

- La exergía de entrada al colector solar plano.

$$\dot{E}_{in,col} = \dot{Q}_{radiacion,solar} * \left(1 - \frac{T_0}{T_{sol}}\right) \quad (9)$$

- La exergía destruida en el colector solar.

$$\dot{E}_{destruida,colector} = \dot{E}_{insumo} - \dot{E}_{productos} \quad (10)$$

Al estudiar la ecuación 10, se pueden establecer también, las siguientes dos ecuaciones como exergía destruida del captador solar plano.

$$\dot{E}_{destruida,colector} = (\dot{E}_{in}) - (\dot{E}_5 - \dot{E}_2) \quad (11)$$

$$\dot{E}_{destruida,colector} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{sol}}\right) * \dot{Q}_{radiacion,solar} - \dot{m}_{air} * [(h_5 - h_2) - T_0 * (s_5 - s_2)] \quad (12)$$

- La exergía destruida en el ventilador se define como:

$$\dot{E}_{destruida,ventilador} = \dot{E}_{insumo} - \dot{E}_{productos} \quad (13)$$

La ecuación 13, también se puede escribir de la siguiente manera.

$$\dot{E}_{destruida,ventilador} = (\dot{m}_{in} * (h_2 - h_1)) - (\dot{E}_2 - \dot{E}_1) \quad (14)$$

- El trabajo de un ventilador.

$$W_{ventilador} = \frac{v_{aire} * (P_2 - P_1)}{\eta_{ventilador}} \quad (15)$$

- La eficiencia térmica instantánea del colector solar se define como:

$$\eta_{térmica} = \frac{\dot{Q}_{colector,aire}}{I * A_{colector}} \quad (16)$$

- La eficiencia exergética en un sistema.

$$\eta_{exergetica} = 1 - \frac{\dot{E}_{total,destruida}}{\dot{E}_{in}} \quad (17)$$

- La exergía destruida en el sistema.

$$\dot{E}_{total,destruida} = \dot{E}_{destruida,colector} + \dot{E}_{destruida,ventilador} \quad (18)$$

- También la exergía perdida en el sistema se define como:

$$\dot{E}_{total,perdida} = \dot{E}_{total,entrada\ al\ ciclo} - \dot{E}_{total,productos} - \dot{E}_{total,destruida} \quad (19)$$

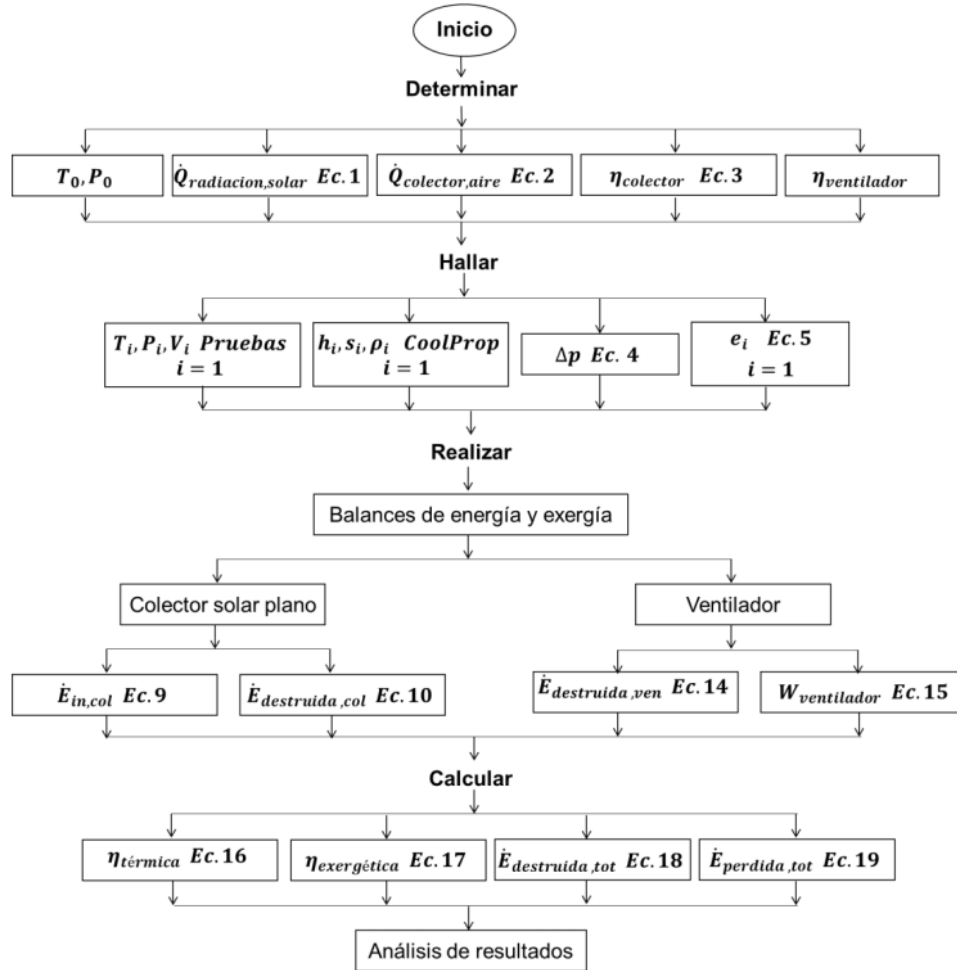
Donde:

$$\dot{E}_{total,entrada\ al\ ciclo} = \dot{E}_{in,col} \quad (20)$$

$$\dot{E}_{total,productos} = \dot{E}_{productos,colector} + \dot{E}_{productos,ventilador} \quad (21)$$

A continuación, en la figura 12 se encuentra de forma reducida la metodología utilizada en el presente proyecto de investigación.

Figura 12. Metodología usada para análisis termodinámico.



Fuente: Autora.

### 4.3.3 Rendimientos termodinámicos.

A continuación, se muestran las tablas que representan los datos horarios promedio recopilados en el mes de Julio del 2022, según (Ural, 2019) esta metodología de estudio permite evaluar con precisión el rendimiento de los colectores solares de aire.

Se considera que inicialmente, el colector se encuentra expuesto a rayos solares.

- Datos tomados a las 8:00 hrs con una irradiación promedio de  $426 [W/m^2]$ .

**Tabla 5.** Flujo de exergía total en todas las corrientes 8:00 hrs.

Corriente	Flujo $\dot{m} \left[ \frac{kg}{s} \right]$	Presión $P [kPa]$	Temperatura $T [^{\circ}C]$	Entalpía $h \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$	Entropía $s \left[ \frac{kJ}{kg \cdot ^{\circ}K} \right]$	Energía $e \left[ \frac{J}{kg} \right]$	Exergía $E [W]$
1	0,0240	101,3250	25,6	425,0398	3,8825	1184,9083	28,3854
2	0,0240	101,4321	25,8	425,2409	3,8829	1184,9997	28,3985
3	0,0215	101,4134	34,5	433,9975	3,9118	1185,1156	25,4320
4	0,0177	101,3856	35,75	435,2559	3,9160	1185,1311	21,0229
5	0,0156	101,3728	42,8	442,3545	3,9387	1185,4331	18,4535

Fuente: Autora.

Datos basados en la primera y segunda ley:

**Tabla 6.** Rendimientos térmicos del sistema 8:00 hrs.

Parámetro		Valor	Unidad	EC
Trabajo del ventilador	$W_{ventilador}$	1,1135	$J / kg$	[15]
Eficiencia térmica	$\eta_{térmica}$	26,3651	%	[16]
Exergía de entrada al colector	$\dot{E}_{in}$	458,0387	$W$	[9]
Eficiencia exergética	$\eta_{exergética}$	27,5830	%	[17]
Exergía total destruida	$\dot{E}_{total,destruida}$	331,6980	$W$	[18]
Exergía total perdida	$\dot{E}_{total,perdida}$	116,3825	$W$	[19]

Fuente: Autora.

- Datos tomados a las 8:45 hrs con una irradiación promedio de  $554 [W/m^2]$ .

**Tabla 7.** Flujo de exergía total en todas las corrientes 8:45 hrs.

Corriente	Flujo $\dot{m} \left[ \frac{kg}{s} \right]$	Presión $P [kPa]$	Temperatura $T [^{\circ}C]$	Entalpía $h \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$	Entropía $s \left[ \frac{kJ}{kg \cdot ^{\circ}K} \right]$	Energía $e \left[ \frac{J}{kg} \right]$	Exergía $E [W]$
1	0,0239	101,3250	26,8	426,2475	3,8865	1184,9083	28,2715
2	0,0239	101,4321	27,1	426,5491	3,8872	1185,0001	28,2753
3	0,0213	101,4135	37,4	436,9170	3,9213	1185,1697	25,2088
4	0,0173	101,3859	44,75	444,3183	3,9449	1185,4847	20,4726
5	0,0153	101,3731	49,4	449,0022	3,9595	1185,7726	18,1329

Fuente: Autora.

**Tabla 8.** Rendimientos térmicos del sistema 8:45 hrs.

Parámetro		Valor	Unidad	EC
Trabajo del ventilador	$W_{ventilador}$	1,1135	$J / kg$	[15]
Eficiencia térmica	$\eta_{térmica}$	26,2436	%	[16]
Exergía de entrada al colector	$\dot{E}_{in}$	595,5410	$W$	[9]
Eficiencia exergética	$\eta_{exergética}$	27,2660	%	[17]
Exergía total destruida	$\dot{E}_{total,destruida}$	433,1608	$W$	[18]
Exergía total perdida	$\dot{E}_{total,perdida}$	152,2341	$W$	[19]

Fuente: Autora.



- Datos tomados a las 9:30 hrs con una irradiación promedio de  $732 [W/m^2]$ .

**Tabla 9.** Flujo de exergía total en todas las corrientes 9:30 hrs.

Corriente	Flujo $\dot{m} \left[ \frac{kg}{s} \right]$	Presión $P [kPa]$	Temperatura $T [^{\circ}C]$	Entalpía $h \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$	Entropía $s \left[ \frac{kJ}{kg \cdot ^{\circ}K} \right]$	Energía $e \left[ \frac{J}{kg} \right]$	Exergía $E [W]$
1	0,0238	101,3250	27,3	426,7506	3,8882	1184,9083	28,2244
2	0,0238	101,4321	27,4	426,8510	3,8883	1185,0001	28,2470
3	0,0209	101,4152	45,5	445,0736	3,9472	1185,5235	24,8141
4	0,0178	101,3902	45,75	445,3255	3,9480	1185,5167	21,1283
5	0,0160	101,3782	50,8	450,4126	3,9639	1185,8409	18,9998

Fuente: Autora.

**Tabla 10.** Rendimientos térmicos del sistema 9:30 hrs.

Parámetro	Valor	Unidad	EC
Trabajo del ventilador	$W_{ventilador}$	$J / kg$	[15]
Eficiencia térmica	$\eta_{térmica}$	%	[16]
Exergía de entrada al colector	$\dot{E}_{in}$	$W$	[9]
Eficiencia exergética	$\eta_{exergética}$	%	[17]
Exergía total destruida	$\dot{E}_{total,destruida}$	$W$	[18]
Exergía total perdida	$\dot{E}_{total,perdida}$	$W$	[19]

Fuente: Autora.

- Datos tomados a las 10:15 hrs con una irradiación promedio de  $829 [W/m^2]$ .

**Tabla 11.** Flujo de exergía total en todas las corrientes 10:15 hrs.

Corriente	Flujo $\dot{m} \left[ \frac{kg}{s} \right]$	Presión $P [kPa]$	Temperatura $T [^{\circ}C]$	Entalpía $h \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$	Entropía $s \left[ \frac{kJ}{kg \cdot ^{\circ}K} \right]$	Energía $e \left[ \frac{J}{kg} \right]$	Exergía $E [W]$
1	0,0237	101,3250	28,6	428,0590	3,8926	1184,9083	28,1025
2	0,0237	101,4321	28,9	428,3607	3,8933	1185,0007	28,1063
3	0,0206	101,4157	52	451,6215	3,9675	1185,8625	24,3894
4	0,0175	101,3915	54,5	454,1406	3,9753	1186,0334	20,7665
5	0,0160	101,3797	56	455,6522	3,9799	1186,1469	18,9621

Fuente: Autora.

**Tabla 12.** Rendimientos térmicos del sistema 10:15 hrs.

Parámetro	Valor	Unidad	EC
Trabajo del ventilador	$W_{ventilador}$	$J / kg$	[15]
Eficiencia térmica	$\eta_{térmica}$	%	[16]
Exergía de entrada al colector	$\dot{E}_{in}$	$W$	[9]
Eficiencia exergética	$\eta_{exergética}$	%	[17]
Exergía total destruida	$\dot{E}_{total,destruida}$	$W$	[18]
Exergía total perdida	$\dot{E}_{total,perdida}$	$W$	[19]

Fuente: Autora.

- Datos tomados a las 11:00 hrs con una irradiación promedio de  $897 [W/m^2]$ .

**Tabla 13.** Flujo de exergía total en todas las corrientes 11:00 hrs.

Corriente	Flujo $\dot{m} \left[ \frac{kg}{s} \right]$	Presión $P [kPa]$	Temperatura $T [^{\circ}C]$	Entalpía $h \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$	Entropía $s \left[ \frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$	Energía $e \left[ \frac{J}{kg} \right]$	Exergía $E [W]$
1	0,0237	101,3250	29,4	428,8641	3,8952	1184,9083	28,0279
2	0,0237	101,4321	29,5	428,9646	3,8953	1185,0008	28,0505
3	0,0206	101,4176	55	454,6444	3,9768	1186,0296	24,4287
4	0,0180	101,3966	57,25	456,9120	3,9837	1186,1969	21,3684
5	0,0165	101,3858	63,2	462,9098	4,0017	1186,7465	19,5763

Fuente: Autora.

**Tabla 14.** Rendimientos térmicos del sistema 11:00 hrs.

Parámetro		Valor	Unidad	EC
Trabajo del ventilador	$W_{ventilador}$	1,1135	J/ kg	[15]
Eficiencia térmica	$\eta_{térmica}$	24,8366	%	[16]
Exergía de entrada al colector	$\dot{E}_{in}$	963,8239	W	[9]
Eficiencia exergética	$\eta_{exergética}$	31,2721	%	[17]
Exergía total destruida	$\dot{E}_{total,destruida}$	662,4157	W	[18]
Exergía total perdida	$\dot{E}_{total,perdida}$	292,9115	W	[19]

Fuente: Autora.

- Datos tomados a las 11:45 hrs con una irradiación promedio de  $981 [W/m^2]$ .

**Tabla 15.** Flujo de exergía total en todas las corrientes 11:45 hrs.

Corriente	Flujo $\dot{m} \left[ \frac{kg}{s} \right]$	Presión $P [kPa]$	Temperatura $T [^{\circ}C]$	Entalpía $h \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$	Entropía $s \left[ \frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$	Energía $e \left[ \frac{J}{kg} \right]$	Exergía $E [W]$
1	0,0235	101,3250	31,2	430,6759	3,9012	1184,9083	27,8618
2	0,0235	101,4321	31,3	430,7763	3,9012	1185,0013	27,8842
3	0,0206	101,4189	56,75	456,4080	3,9821	1186,0215	24,4599
4	0,0182	101,3998	60,75	460,4398	3,9943	1186,3422	21,6243
5	0,0168	101,3898	67,2	466,9433	4,0136	1186,9706	19,9744

Fuente: Autora.

**Tabla 16.** Rendimientos térmicos del sistema 11:45 hrs.

Parámetro		Valor	Unidad	EC
Trabajo del ventilador	$W_{ventilador}$	1,1135	J/ kg	[15]
Eficiencia térmica	$\eta_{térmica}$	24,3251	%	[16]
Exergía de entrada al colector	$\dot{E}_{in}$	1053,7511	W	[9]
Eficiencia exergética	$\eta_{exergética}$	32,5621	%	[17]
Exergía total destruida	$\dot{E}_{total,destruida}$	710,6277	W	[18]
Exergía total perdida	$\dot{E}_{total,perdida}$	335,1912	W	[19]

Fuente: Autora.

- Datos tomados a las 12:30 hrs con una irradiación promedio de 880  $[W/m^2]$ .

**Tabla 17. Flujo de exergía total en todas las corrientes 12:30 hrs.**

Corriente	Flujo $\dot{m} \left[ \frac{kg}{s} \right]$	Presión $P [kPa]$	Temperatura $T [^{\circ}C]$	Entalpía $h \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$	Entropía $s \left[ \frac{kJ}{kg \cdot ^{\circ}K} \right]$	Energía $e \left[ \frac{J}{kg} \right]$	Exergía $E [W]$
1	0,0236	101,3250	30,5	429,9713	3,8989	1184,9083	27,9262
2	0,0236	101,4321	30,4	429,8704	3,8982	1185,0011	27,9671
3	0,0203	101,4162	57	456,6600	3,9829	1186,0974	24,0949
4	0,0174	101,3929	59,75	459,4318	3,9913	1186,3120	20,6540
5	0,0158	101,3813	64,8	464,5231	4,0065	1186,7881	18,7542

Fuente: Autora.

**Tabla 18. Rendimientos térmicos del sistema 12:30 hrs.**

Parámetro		Valor	Unidad	EC
Trabajo del ventilador	$W_{ventilador}$	1,1135	$J / kg$	[15]
Eficiencia térmica	$\eta_{térmica}$	25,3009	%	[16]
Exergía de entrada al colector	$\dot{E}_{in}$	945,3762	$W$	[9]
Eficiencia exergética	$\eta_{exergética}$	30,5523	%	[17]
Exergía total destruida	$\dot{E}_{total,destruida}$	656,5422	$W$	[18]
Exergía total perdida	$\dot{E}_{total,perdida}$	279,5802	$W$	[19]

Fuente: Autora.

- Datos tomados a las 13:15 hrs con una irradiación promedio de 678  $[W/m^2]$ .

**Tabla 19. Flujo de exergía total en todas las corrientes 13:15 hrs.**

Corriente	Flujo $\dot{m} \left[ \frac{kg}{s} \right]$	Presión $P [kPa]$	Temperatura $T [^{\circ}C]$	Entalpía $h \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$	Entropía $s \left[ \frac{kJ}{kg \cdot ^{\circ}K} \right]$	Energía $e \left[ \frac{J}{kg} \right]$	Exergía $E [W]$
1	0,0236	101,3250	30,1	429,5687	3,8976	1184,9083	27,9631
2	0,0236	101,4321	30,3	429,7697	3,8979	1185,0010	27,9763
3	0,0204	101,4150	53,75	453,3848	3,9729	1185,8765	24,1612
4	0,0172	101,3896	56	455,6522	3,9799	1186,0272	20,3810
5	0,0156	101,3775	58	457,6679	3,9861	1186,1822	18,4629

Fuente: Autora.

**Tabla 20. Rendimientos térmicos del sistema 13:15 hrs.**

Parámetro		Valor	Unidad	EC
Trabajo del ventilador	$W_{ventilador}$	1,1135	$J / kg$	[15]
Eficiencia térmica	$\eta_{térmica}$	26,3072	%	[16]
Exergía de entrada al colector	$\dot{E}_{in}$	728,4202	$W$	[9]
Eficiencia exergética	$\eta_{exergética}$	27,1864	%	[17]
Exergía total destruida	$\dot{E}_{total,destruida}$	530,3889	$W$	[18]
Exergía total perdida	$\dot{E}_{total,perdida}$	188,5045	$W$	[19]

Fuente: Autora.

- Datos tomados a las 14:00 hrs con una irradiación promedio de 625  $[W/m^2]$ .

**Tabla 21.** Flujo de exergía total en todas las corrientes 14:00 hrs.

Corriente	Flujo $\dot{m} \left[ \frac{kg}{s} \right]$	Presión $P [kPa]$	Temperatura $T [^{\circ}C]$	Entalpía $h \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$	Entropía $s \left[ \frac{kJ}{kg \cdot ^{\circ}K} \right]$	Energía $e \left[ \frac{J}{kg} \right]$	Exergía $E [W]$
1	0,0236	101,3250	29,6	429,0654	3,8959	1184,9083	28,0094
2	0,0237	101,4321	29,7	429,1659	3,8959	1185,0008	28,0319
3	0,0208	101,4146	47	446,5845	3,9519	1185,4746	24,6169
4	0,0173	101,3888	51	450,6141	3,9645	1185,6969	20,5526
5	0,0155	101,3765	55,5	455,1483	3,9784	1186,0173	18,4200

Fuente: Autora.

**Tabla 22.** Rendimientos térmicos del sistema 14:00 hrs.

Parámetro		Valor	Unidad	EC
Trabajo del ventilador	$W_{ventilador}$	1,1135	$J/kg$	[15]
Eficiencia térmica	$\eta_{térmica}$	26,7724	%	[16]
Exergía de entrada al colector	$\dot{E}_{in}$	671,5373	$W$	[9]
Eficiencia exergética	$\eta_{exergética}$	26,3246	%	[17]
Exergía total destruida	$\dot{E}_{total,destruida}$	494,7580	$W$	[18]
Exergía total perdida	$\dot{E}_{total,perdida}$	167,1448	$W$	[19]

Fuente: Autora.

- Datos tomados a las 14:45 hrs con una irradiación promedio de 470  $[W/m^2]$ .

**Tabla 23.** Flujo de exergía total en todas las corrientes 14:45 hrs.

Corriente	Flujo $\dot{m} \left[ \frac{kg}{s} \right]$	Presión $P [kPa]$	Temperatura $T [^{\circ}C]$	Entalpía $h \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$	Entropía $s \left[ \frac{kJ}{kg \cdot ^{\circ}K} \right]$	Energía $e \left[ \frac{J}{kg} \right]$	Exergía $E [W]$
1	0,0237	101,3250	28,9	428,3609	3,8936	1184,9083	28,0745
2	0,0237	101,4321	29,2	428,6626	3,8943	1185,0008	28,0784
3	0,0212	101,4139	39,75	439,2831	3,9288	1185,1781	25,0804
4	0,0174	101,3870	45	444,5701	3,9457	1185,3824	20,6350
5	0,0156	101,3743	48,1	447,6926	3,9555	1185,5452	18,4410

Fuente: Autora.

**Tabla 24.** Rendimientos térmicos del sistema 14:45 hrs.

Parámetro		Valor	Unidad	EC
Trabajo del ventilador	$W_{ventilador}$	1,1135	$J/kg$	[15]
Eficiencia térmica	$\eta_{térmica}$	26,2602	%	[16]
Exergía de entrada al colector	$\dot{E}_{in}$	505,0576	$W$	[9]
Eficiencia exergética	$\eta_{exergética}$	27,1902	%	[17]
Exergía total destruida	$\dot{E}_{total,destruida}$	367,7315	$W$	[18]
Exergía total perdida	$\dot{E}_{total,perdida}$	127,6848	$W$	[19]

Fuente: Autora.

A partir de las 14:45 hrs, instantáneamente el colector plano se encuentra a la sombra en el lugar de estudio y la exergía de entrada tiende a cero. Sin embargo, la temperatura del aire y la exergía destruida en el sistema disminuye lentamente, lo anterior, debido al almacenamiento térmico que conserva la parafina antes expuesta a la radiación solar sobre el captador.

Con la formulación expuesta anteriormente, se obtienen valores de energía y exergía menores a cero cuando el equipo se encuentra a la sombra, por esto, con el objetivo de lograr un análisis de resultados en función de las horas solares disponibles, se decide asumir, que la irradiación solar sobre el colector disminuye gradualmente desde las 15:30 hrs hasta que alcance el valor mínimo de temperatura del aire que no satisfaga las necesidades del proceso (36 °C).

- Datos tomados a las 15:30 hrs con una irradiación promedio de 370 [ $W/m^2$ ].

**Tabla 25.** Flujo de exergía total en todas las corrientes 15:30 hrs.

Corriente	Flujo $\dot{m}$ [ $\frac{kg}{s}$ ]	Presión $P$ [kPa]	Temperatura $T$ [°C]	Entalpía $h$ [ $\frac{kJ}{kg}$ ]	Entropía $s$ [ $\frac{kJ}{kg \cdot K}$ ]	Energía $e$ [ $\frac{J}{kg}$ ]	Exergía $E$ [W]
1	0,0238	101,3250	27,6	427,0526	3,8892	1184,9083	28,1961
2	0,0238	101,4321	27,8	427,2536	3,8896	1185,0003	28,2093
3	0,0214	101,4138	35,5	435,0042	3,9151	1185,0880	25,4108
4	0,0176	101,3867	41,25	440,7936	3,9337	1185,2665	20,8391
5	0,0158	101,3740	43,1	442,6566	3,9397	1185,3424	18,6763

Fuente: Autora.

**Tabla 26.** Rendimientos térmicos del sistema 15:30 hrs.

Parámetro		Valor	Unidad	EC
Trabajo del ventilador	$W_{ventilador}$	1,1135	J/ kg	[15]
Eficiencia térmica	$\eta_{térmica}$	27,2696	%	[16]
Exergía de entrada al colector	$\dot{E}_{in}$	397,6886	W	[9]
Eficiencia exergética	$\eta_{exergética}$	25,1047	%	[17]
Exergía total destruida	$\dot{E}_{total,destruida}$	297,8500	W	[18]
Exergía total perdida	$\dot{E}_{total,perdida}$	90,2923	W	[19]

Fuente: Autora.

- Datos tomados a las 16:15 hrs con una irradiación promedio de  $270 [W/m^2]$ .

**Tabla 27.** Flujo de exergía total en todas las corrientes 16:15 hrs.

Corriente	Flujo $\dot{m} \left[ \frac{kg}{s} \right]$	Presión $P [kPa]$	Temperatura $T [^{\circ}C]$	Entalpía $h \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$	Entropía $s \left[ \frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$	Energía $e \left[ \frac{J}{kg} \right]$	Exergía $E [W]$
1	0,0239	101,3250	26,4	425,8449	3,8852	1184,9083	28,3094
2	0,0239	101,4321	26,5	425,9453	3,8852	1184,9999	28,3320
3	0,0216	101,4133	32,75	432,2358	3,9061	1185,0512	25,5695
4	0,0176	101,3855	38,25	437,7729	3,9241	1185,1918	20,8343
5	0,0157	101,3726	40,1	439,6356	3,9301	1185,2576	18,5830

Fuente: Autora.

**Tabla 28.** Rendimientos térmicos del sistema 16:15 hrs.

Parámetro		Valor	Unidad	EC
Trabajo del ventilador	$W_{ventilador}$	1,1135	$J / kg$	[15]
Eficiencia térmica	$\eta_{térmica}$	33,2840	%	[16]
Exergía de entrada al colector	$\dot{E}_{in}$	290,2658	$W$	[9]
Eficiencia exergética	$\eta_{exergética}$	9,6927	%	[17]
Exergía total destruida	$\dot{E}_{total,destruida}$	262,1311	$W$	[18]
Exergía total perdida	$\dot{E}_{total,perdida}$	18,3631	$W$	[19]

Fuente: Autora.

- Datos tomados a las 17:00 hrs con una irradiación promedio de  $203 [W/m^2]$ .

**Tabla 29.** Flujo de exergía total en todas las corrientes 17:00 hrs.

Corriente	Flujo $\dot{m} \left[ \frac{kg}{s} \right]$	Presión $P [kPa]$	Temperatura $T [^{\circ}C]$	Entalpía $h \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$	Entropía $s \left[ \frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$	Energía $e \left[ \frac{J}{kg} \right]$	Exergía $E [W]$
1	0,0239	101,3250	25,9	425,3417	3,8835	1184,9083	28,3569
2	0,0239	101,4321	26,1	425,5428	3,8839	1184,9998	28,3700
3	0,0216	101,4128	32	431,4809	3,9036	1185,0456	25,5628
4	0,0175	101,3843	36,25	435,7593	3,9176	1185,1366	20,7624
5	0,0156	101,3713	36,8	436,3130	3,9194	1185,1446	18,5056

Fuente: Autora.

**Tabla 30.** Rendimientos térmicos del sistema 17:00 hrs.

Parámetro		Valor	Unidad	EC
Trabajo del ventilador	$W_{ventilador}$	1,1135	$J / kg$	[15]
Eficiencia térmica	$\eta_{térmica}$	34,7865	%	[16]
Exergía de entrada al colector	$\dot{E}_{in}$	218,2559	$W$	[9]
Eficiencia exergética	$\eta_{exergética}$	5,2984	%	[17]
Exergía total destruida	$\dot{E}_{total,destruida}$	206,6919	$W$	[18]
Exergía total perdida	$\dot{E}_{total,perdida}$	1,6864	$W$	[19]

Fuente: Autora.

#### 4.4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Con el objetivo de plantear escenarios en donde se alcancen a visualizar mejores comportamientos exergéticos, que permitan un incremento del trabajo útil en el colector solar plano con el ambiente al que está expuesto, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad en el equipo, donde se identificaron las variables termodinámicas influyentes, para cambiar sus valores y analizar los nuevos rendimientos exergéticos del sistema.

En primer lugar, se considera disminuir la velocidad de entrada del ventilador (punto 2) a 9, 8 y 7 m/s y aumentar la temperatura de salida al colector (punto 5) en 5%, 10% y 15%, posteriormente, se decide evaluar la sensibilidad en la hora que se presenta una mayor destrucción de exergía, en este caso a las 11:45 horas; puesto que al cambiar los mismos parámetros en escenarios de menor exergía destruida se tendrán resultados similares, lo anterior, se lleva a cabo para observar cambios en los rendimientos exergéticos del sistema. Para realizar este cálculo se utilizó la ecuación 17.

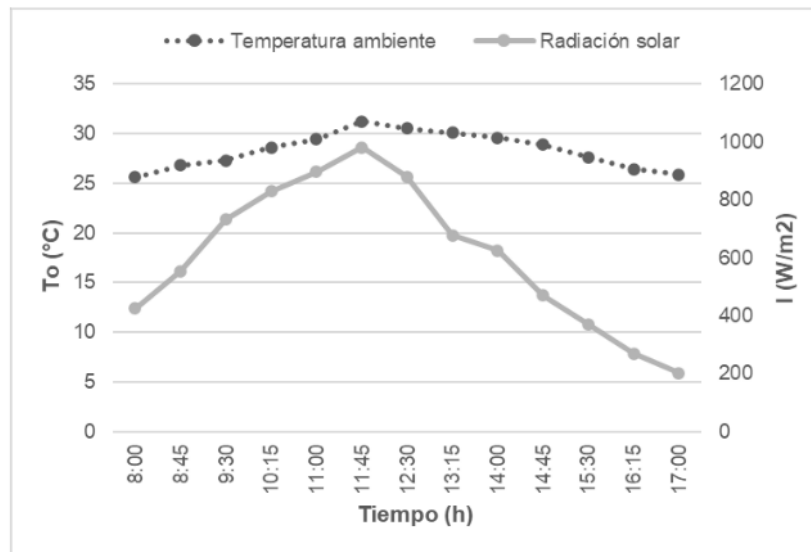
## 5. RESULTADOS

### **Resultados del estudio exergético.**

Los rendimientos termodinámicos del colector solar de aire se evalúan con el objetivo de realizar con precisión el análisis de exergía en el equipo de estudio del presente proyecto de investigación. Para el análisis del sistema, se utilizan los datos horarios promedio recopilados en el mes de Julio de 2022, en el intervalo de tiempo de 8:00 a 17:00 horas. Como se puede observar en la figura 13, se presentan los datos horarios tomados de la temperatura ambiente y radiación solar promedio.

En las pruebas experimentales realizadas, los valores más altos de temperatura ambiente y radiación solar son de 31,2 °C y 981 W/m<sup>2</sup>, a las 11:45 horas. En el proceso de verificar el rendimiento del colector solar, es deseable tener la misma cantidad de radiación solar todos los días a las mismas horas, sin embargo, se considera una desventaja para el análisis exergético que estos dos parámetros de entrada varíen un poco todos días, por lo anterior, lo más pertinente fue realizar un promedio de los datos obtenidos experimentalmente.

**Figura 13.** Cambio de temperatura ambiente y radiación solar en valores medios horarios.



Fuente: Autora.

ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

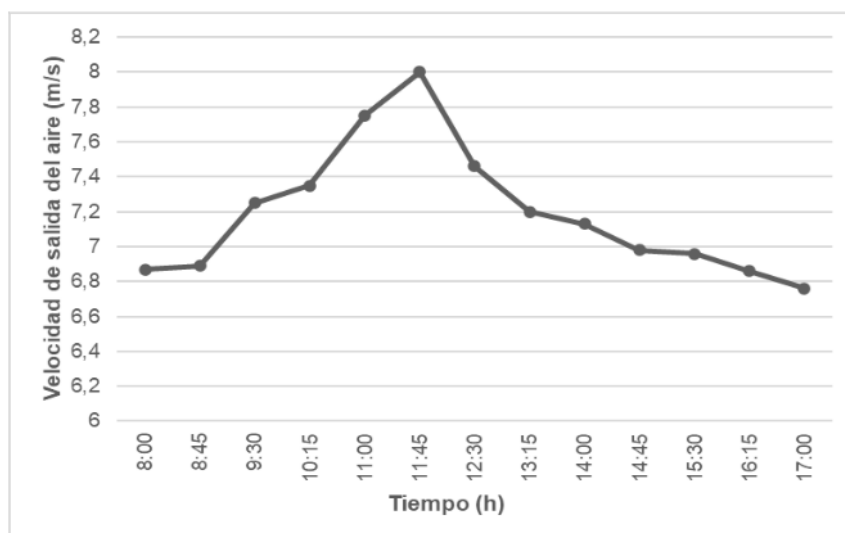
REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:



La velocidad y la temperatura del aire que entra al sistema, son factores que afectan la eficiencia de los colectores solares planos de aire. En las pruebas experimentales, el ventilador ofrece una velocidad de entrada igual a 10 m/s en todos los valores tomados en el mes de Julio, pero la rapidez del fluido de salida disminuye debido a la longitud que recorre el aire en el colector solar. Como se indica en la figura 14, la velocidad de salida varía en un rango de 6.76 m/s a 8 m/s, obteniendo su pico más alto a las 11:45 horas, puesto que está relacionado con la temperatura y densidad a la que se encuentra el aire a la hora deseada.

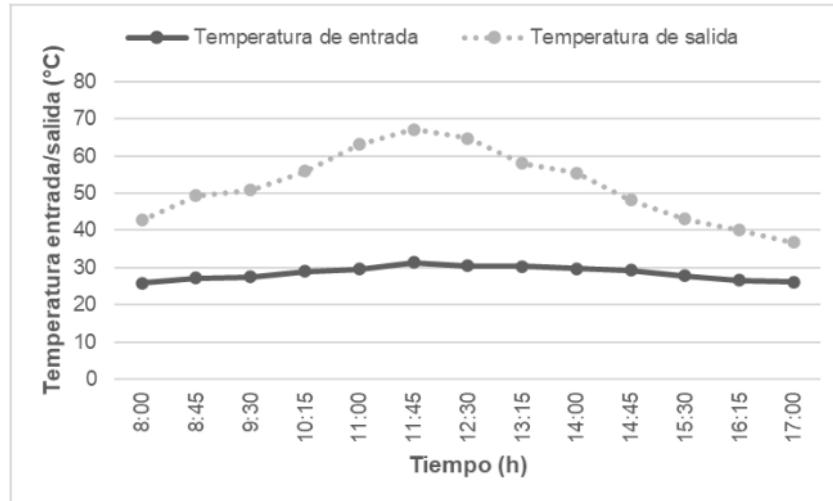
**Figura 14.** Cambio en la velocidad de salida del aire.



Fuente: Autora.

La figura 15 muestra el cambio temporal de las temperaturas de entrada y salida del aire en el colector solar. La temperatura de entrada, varía de 25,8 °C a 31,3 °C y la temperatura de salida del aire se encuentra en un rango de 36,8 °C a 67,2 °C. De esta gráfica, se puede inferir que las fluctuaciones en las temperaturas del aire de salida del colector se deben a la transición de nubes, por lo mismo, se obtienen las mayores temperaturas de entrada y salida cuando el cielo se encuentra despejado, es decir, cuando se tiene una mayor radiación solar, ubicada a las 11:45 horas.

**Figura 15.** Cambio de los valores de temperatura de entrada y salida del aire.

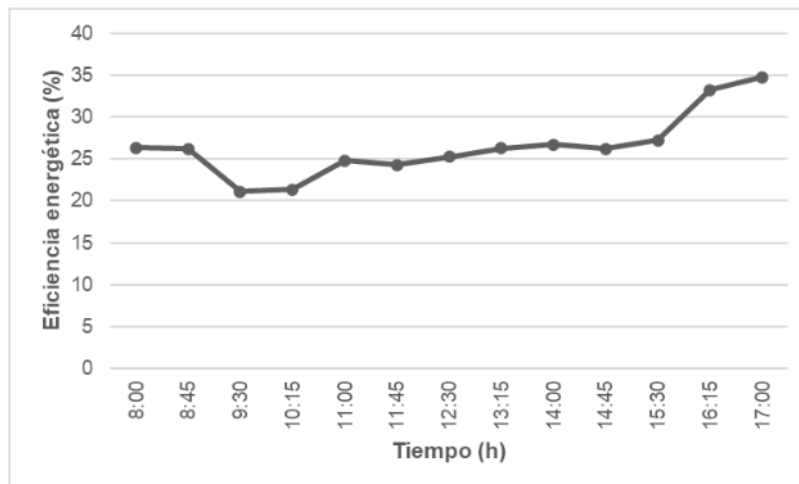


Fuente: Autora.

La eficiencia energética cambia según el material estructural del colector, el diseño del tipo de colector, la estructura de la placa absorbente, las características del vidrio, el fluido de trabajo y las variables termodinámicas.

En la figura 16, se indican los resultados de los cálculos de la eficiencia energética del colector solar plano estudiado, que se encuentra en un rango promedio de 21,08% y 34,79% durante el día. También se expone, el cambio temporal de las eficiencias energéticas del colector estudiado, observándose que el almacenamiento de calor en el equipo es efectivo, puesto que en las últimas 3 horas, el combustible de entrada al captador pasa de ser la radiación solar, a ser el material de cambio de fase (MCF), por la acción de la parafina que permite conservar el almacenamiento térmico y reducir lentamente la temperatura de salida del aire cuando se tienen muy pocos rayos solares sobre el sistema estudiado. Además, se puede deducir que las fluctuaciones en el rendimiento son causadas por las diferencias entre las temperaturas de entrada y salida del aire en el colector.

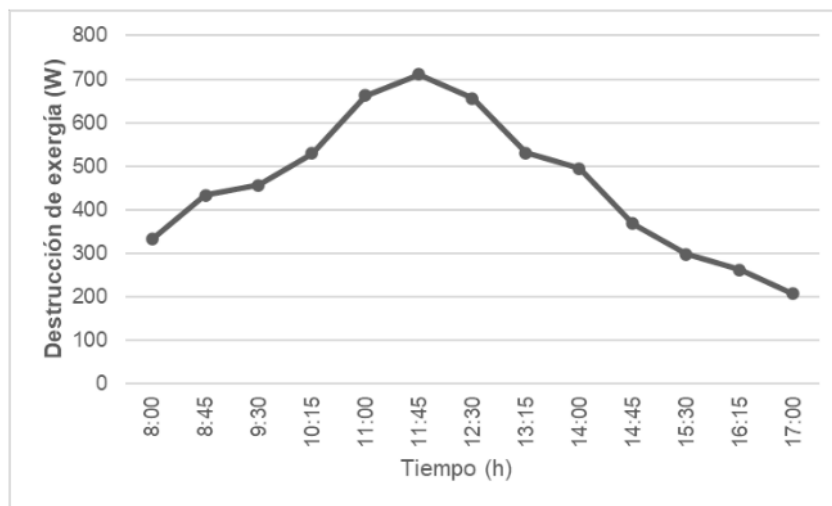
**Figura 16.** Cambio de eficiencia energética en el sistema.



Fuente: Autora.

Se observa en la figura 17, que las mayores estimaciones de potencial energético útil destruido en el colector solar plano estudiado, se encuentran entre las 11:00 y 12:45 hrs, donde en su pico más alto se obtuvo a las 11:45 hrs con un valor de 710,63 W. De lo anterior se puede inferir que la exergía destruida es directamente proporcional con la cantidad de radiación solar a la que está expuesta el sistema.

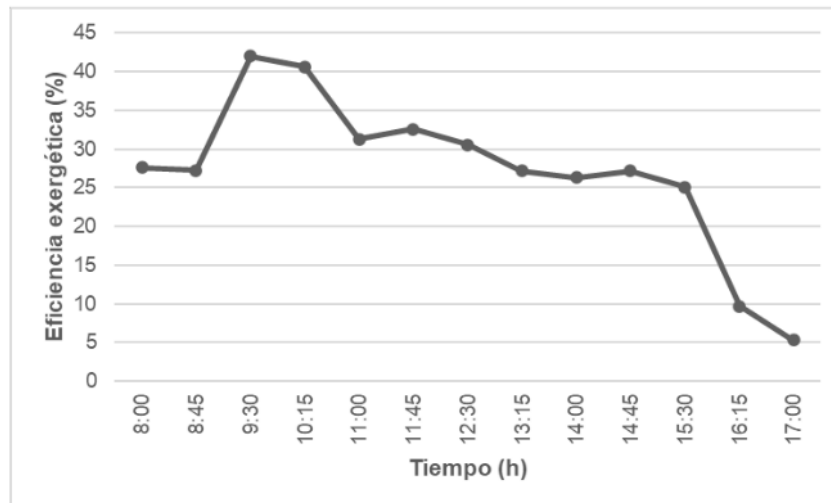
**Figura 17.** Cambio en la tasa de destrucción de exergía en el colector solar.



Fuente: Autora.

En la figura 18, se muestra el cambio de eficiencias exergéticas del colector solar plano. La eficiencia exergética promedio del sistema estudiado es igual a 27,14%, indicando los mayores rendimientos entre las 9:30 y 10:15 horas, deduciéndose que a estas horas se obtiene un mayor diferencial de las temperaturas de entrada y salida del sistema. Igualmente, se puede inferir que la eficiencia exergética depende directamente de la radiación solar como parámetro inicial en la exergía de entrada, también, de las temperaturas de entrada y salida del colector, puesto que permiten hallar los parámetros de entalpía y entropía necesarios para calcular la exergía destruida en el sistema.

**Figura 18.** Cambio en la eficiencia exergética del colector solar.



Fuente: Autora.

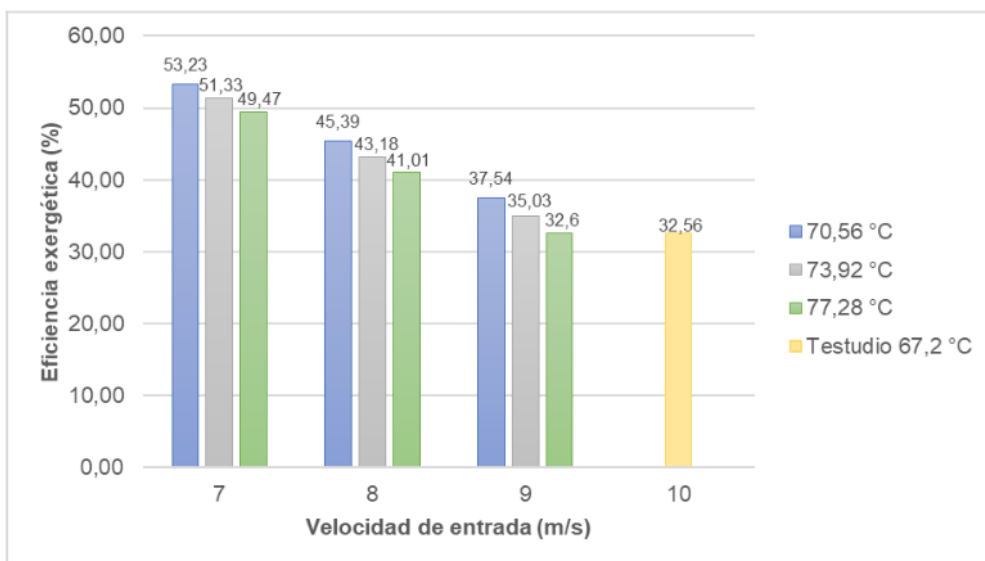
Las eficiencias exergéticas normalmente brindan conocimientos reales sobre el rendimiento del sistema estudiado, que las eficiencias energéticas, debido a que proporcionan una medida del rendimiento sobre el potencial dentro del proceso en específico, es en este caso del calentamiento del aire.

### **Resultados del estudio de sensibilidad.**

Con la finalidad de hallar una mejora exergética, se implementó un análisis de sensibilidad a las 11:45 horas de los datos promedio estudiados, debido a que, en

esta hora se encontró una mayor exergía destruida en el sistema. Al analizar las corrientes de aire, fue de interés variar simultáneamente la velocidad de entrada entre 10% y 30% la nominal y la temperatura de salida del colector solar plano entre 5% y 15% la real obtenida en las pruebas. A continuación, se observan los resultados obtenidos en la eficiencia exergética al cambiar los parámetros influyentes en el sistema ya mencionados.

**Figura 19.** Variación de la eficiencia exergética con respecto a la velocidad y temperatura de salida del sistema.



Fuente: Autora.

En la figura 19, se observan nueve casos para los cuales se puede llegar a adquirir un incremento del trabajo útil en el colector solar plano estudiado. También, se puede analizar que, al trabajar con mayores temperaturas de salida (punto 5) y menores velocidades de entrada al equipo, se obtienen mayores resultados de eficiencia exergética, llegándose a alcanzar un rendimiento del 53,23% con una temperatura salida de 70,56°C y velocidad 7 m/s, donde antes solo se alcanzaba un 32,56% con los valores nominales. De lo anterior, se puede inferir que:

- La exergía destruida en el colector solar, depende de la diferencia entre los parámetros de entalpía y entropía calculados, que están en función de las temperaturas y caídas de presión halladas experimentalmente. Lo anterior, quiere decir que, a mayor diferencia entre las temperaturas de entrada y salida del sistema, menor será la eficiencia exergética en el captador solar estudiado.
- Al transcurrir el aire más tiempo por el colector solar plano, es decir a una menor velocidad, el fluido adquiere una mayor temperatura con la ayuda de la transferencia de calor que ofrece almacenamiento térmico dentro del sistema.

Por último, se puede decir que este insumo teórico es relevante dentro la ingeniería, debido a que se identifican dos variables influyentes en el sistema, las cuales requieren de la implementación de procesos ingenieriles en el ámbito de diseño y materiales, para lograr llegar a los valores de eficiencia exergética definidos en el análisis de sensibilidad.

#### 4 CONCLUSIONES

- En el presente estudio se realizaron pruebas experimentales en un colector solar plano de 3 m<sup>2</sup> que contenía parafina como fluido de almacenamiento térmico, mediante el análisis exergético, se proporciona una evaluación del rendimiento más representativa y real del sistema estudiado, permitiendo demostrar de forma cuantitativa que el rendimiento en el colector solar plano depende significativamente de la radiación solar, temperatura ambiente a la que se encuentra expuesto el equipo, extensión de la línea por la que circula el aire y la velocidad de entrada al sistema que ofrece el ventilador.
- Debido a las diferentes condiciones operativas y atmosféricas en el desarrollo de las pruebas, se considera una desventaja para el análisis exergético que la radiación solar y temperatura de entrada varíen todos días, por lo anterior, se decidió que lo más pertinente para el estudio era realizar un promedio por horas de los datos obtenidos experimentalmente.
- Los resultados del estudio en el captador solar plano exponen una eficiencia energética y exergética promedio del 26,47% y 27,14%, respectivamente. Deduciéndose, que el rendimiento del sistema depende principalmente de la radiación solar y del material de almacenamiento térmico como datos iniciales del captador, así mismo, se relaciona con las diferencias entre las temperaturas de entrada y salida del aire en el equipo, debido a que estas variables termodinámicas, permiten hallar los parámetros de entalpía y entropía necesarios para los cálculos de exergía.
- Al realizar el análisis de sensibilidad del sistema, se decidió evaluar el escenario promedio de las 11:45 horas, puesto que a esta hora se presenta una mayor destrucción de exergía. En el estudio, se demuestra que había una relación inversa entre la eficiencia exergética y la exergía destruida, estas variables de salida mejoraron considerablemente al trabajar con mayores temperaturas de salida y menores velocidades de entrada al equipo.

## 5 RECOMENDACIONES

- Como complemento a este proyecto de investigación se recomienda llevar a cabo un análisis exergético en el que se incluyan los balances exergía en la cubierta de vidrio, placa absorbente y material de cambio de fase (MCF), puesto que todos estos componentes también actúan para transferir calor al aire que transita por el colector solar plano. Al adicionar este estudio, se puede lograr una indagación más especializada sobre el potencial útil que tiene el sistema con el almacenamiento térmico que ofrece.
- Se sugiere realizar un análisis de carácter multidisciplinario que relacione la economía, medio ambiente y el desarrollo sostenible en el colector solar plano con almacenamiento térmico estudiado, puesto que al trabajar en conjunto estos conceptos con la exergía, se pueden realizar estudios enfocados en mitigar el impacto ambiental de la utilización de los recursos energéticos y lograr mejoras en el proceso del secado con aire en función de variables económicas evaluando la viabilidad de los costos de producción e inversión de diferentes escenarios.



## 6. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS

- Abuşka, M., & Şevik, S. (2017). Energy, exergy, economic and environmental (4E) analyses of flat-plate and V-groove solar air collectors based on aluminium and copper. *Solar Energy*, 158, 259–277. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.09.045>
- Akpinar, E. K., & Koçyiğit, F. (2010). Energy and exergy analysis of a new flat-plate solar air heater having different obstacles on absorber plates. *Applied Energy*, 87(11), 3438–3450. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.05.017>
- Allouhi, A., & Benzakour, M. (2021). Heat pipe flat plate solar collectors operating with nanofluids. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 219. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110798>
- Bell, I. H., Wronski, J., Quoilin, S., & Lemort, V. (2014). Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(6), 2498–2508. <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/ie4033999>
- Castillo, N. (2019). *Evaluación termodinámica y económica para la generación eléctrica por medio de la incineración de residuos sólidos urbanos* [Universidad de Santander]. <https://repositorio.udes.edu.co/handle/001/4431>
- Çengel, Y., & Boles, M. (2012). *Termodinámica* (McGraw-Hill/Interamericana, Ed.; Séptima).
- Ley 697, de 2001. Por la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía (2001). [https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma\\_pdf.php?i=4449](https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=4449)
- Ley 1715, de 2014. Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional (2014). [http://www.upme.gov.co/Normatividad/Nacional/2014/LEY\\_1715\\_2014.pdf](http://www.upme.gov.co/Normatividad/Nacional/2014/LEY_1715_2014.pdf)

- Ley 1753, de 2015. Por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018 “Todos por un nuevo país” (2015).  
[https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma\\_pdf.php?i=61933](https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=61933)
- Ley 2099, de 2021. Por la cual se dictan las disposiciones para la transición energética, dinamización del mercado energético y reactivación económica del país (2021).  
<https://dapre.presidencia.gov.co/normativa/normativa/LEY%202099%20DEL%2010%20DE%20JULIO%20DE%202021.pdf>
- Dincer, I., & Rosen, M. (2020). *Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development* (Third Edition). Elsevier Science.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/C2016-0-02067-3>
- Flores, S., & Lesino, G. (2005). Análisis de sensibilidad del programa SIMEDIF mediante método de MonteCarlo y diferencial. *Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*, 9, 13–18.  
<http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/82862>
- Garay, Á., & Villadiego, Á. (2017). *Análisis exergético en colectores solares integrado a un proceso de secado* [Universidad Pontificia Bolivariana].  
<https://doi.org/https://doi.org/http://hdl.handle.net/20.500.11912/3204>
- Gheorghian, A., Prisecaru, T., & Ciobanu, M. (2020). Energy and exergy analysis of a flat plate collector using collector test equations. *Renewable Energy and Rural Development*, 180, 1–12.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018002016>
- Gunjo, D. G., Mahanta, P., & Robi, P. S. (2017). Exergy and energy analysis of a novel type solar collector under steady state condition: Experimental and CFD analysis. *Renewable Energy*, 114, 655–669.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.07.072>
- Jaimes, J., & Carreño, W. (2021). *Evaluación de la eficiencia alcanzada por un colector solar plano con almacenamiento de energía térmica, monitoreando*

- variables a través de Software LabView y Hardware Arduino* [Unidades Tecnológicas de Santander]. <http://repositorio.uts.edu.co>
- Kahwaji, S., Johnson, M. B., Kheirabadi, A. C., Groulx, D., & White, M. A. (2018). A comprehensive study of properties of paraffin phase change materials for solar thermal energy storage and thermal management applications. *Energy*, *162*, 1169–1182. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.068>
- Kalogirou, S. A., Karellas, S., Braimakis, K., Stanciu, C., & Badescu, V. (2016). Exergy analysis of solar thermal collectors and processes. *Progress in Energy and Combustion Science*, *56*, 106–137. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pecs.2016.05.002>
- Kimball, A., & Fox, S. (2015, June 4). *Sun through the Centuries: The History of Solar*. KMB. <https://www.kmbdg.com/about-kmb/>
- Koholé, Y. W., Fohagui, F. C. V., & Tchuen, G. (2021). Flat-Plate Solar Collector Thermal Performance and Optimal Operation Mode by Exergy Analysis and Numerical Simulation. *Arabian Journal for Science and Engineering*, *46*(2), 1877–1897. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-05150-w>
- Moran, M., & Shapiro, H. (2004). *Fundamentos de termodinámica técnica* (Reverté, Ed.; Segunda). <http://www.reverte.com>
- Mortazavi, A., & Ameri, M. (2018). Conventional and advanced exergy analysis of solar flat plate air collectors. *Energy*, *142*, 277–288. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.035>
- Muhammad, H., Mansoor, K., Maazullah, K., Muhammas, R., & Abdurab, M. (2018). Energy, Exergy aEfficiency Analysis of a Flat Plate Solar Collector Used as Air Heater. *Sains Malaysiana*, *47*(5), 1061–1067. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.17576/jsm-2018-4705-24>
- Ortega, A., & Carmona, M. (2017). Exergy analysis of a flat plate solar collector with latent heat storage by phase change material for water heating applications at low temperature. *Contemporary Urban Affairs*, *1*(3), 43–48. <https://doi.org/https://doi.org/10.25034/ijcua.2018.3678>

- Decreto 3683, de 2003 [Ministerio de Minas y Energía]. Por la cual se establece el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales (2003). [https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma\\_pdf.php?i=11032](https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=11032)
- Decreto 2469, de 2014 [Ministerio de Minas y Energía]. Por el cual se establecen los lineamientos de política energética en materia de entrega de excedentes de autogeneración (2014). <https://www.suin-juriscal.gov.co/viewDocument.asp?id=1454003>
- Decreto 1073, de 2015 [Ministerio de Minas y Energía]. Por la cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía (2015). [https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma\\_pdf.php?i=77887](https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=77887)
- Decreto 348, de 2017 [Ministerio de Minas y Energía]. Por la cual se establecen los parámetros y procedimientos de autogeneración (2017). [https://acmineria.com.co/acm/wp-content/uploads/normativas/decreto\\_348\\_de\\_2017\\_-\\_excedentes\\_autogeneracion.pdf](https://acmineria.com.co/acm/wp-content/uploads/normativas/decreto_348_de_2017_-_excedentes_autogeneracion.pdf)
- TLV. (2022). *Caída de Presión del Aire en la Tubería*. Compañía Especializada En Vapor. <https://www.tlv.com/global/ES/calculator/air-pressure-loss-through-piping.html>
- Ural, T. (2019). Experimental performance assessment of a new flat-plate solar air collector having textile fabric as absorber using energy and exergy analyses. *Energy*, 188, 116. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116116>
- Yao, J., Chen, E., Dai, Y., & Huang, M. (2020). Theoretical analysis on efficiency factor of direct expansion PVT module for heat pump application. *Solar Energy*, 206, 677–694. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.04.053>

# Estudio experimental y análisis de exergía en un colector solar plano de 3 m<sup>2</sup> con almacenamiento térmico destinado al calentamiento de aire

## ORIGINALITY REPORT

7%

SIMILARITY INDEX

6%

INTERNET SOURCES

1%

PUBLICATIONS

0%

STUDENT PAPERS

## PRIMARY SOURCES

1	<a href="#">dokumen.pub</a> Internet Source	1%
2	<a href="#">bdigital.unal.edu.co</a> Internet Source	1%
3	<a href="#">hdl.handle.net</a> Internet Source	1%
4	<a href="#">sedici.unlp.edu.ar</a> Internet Source	<1%
5	<a href="#">qdoc.tips</a> Internet Source	<1%
6	Hernández-Román, Miguel, Alejandro Manzano-Ramírez, Jorge Pineda-Piñón, and Jorge Ortega-Moody. "Exergetic and Thermo-economic Analyses of Solar Air Heating Processes Using a Parabolic Trough Collector", Entropy, 2014. Publication	<1%

7	Internet Source	<1 %
8	repository.usta.edu.co Internet Source	<1 %
9	www.solydarydar.com Internet Source	<1 %
10	bibliotecadigital.usbcali.edu.co Internet Source	<1 %
11	prezi.com Internet Source	<1 %
12	Submitted to Universidad Internacional del Ecuador Student Paper	<1 %
13	repositorioslatinoamericanos.uchile.cl Internet Source	<1 %
14	doku.pub Internet Source	<1 %
15	livrosdeamor.com.br Internet Source	<1 %
16	red.uao.edu.co Internet Source	<1 %
17	William Quitiaquez, Isaac Simbaña, César A. Isaza-Roldán, Patricio Quitiaquez et al. "Revisión del estado del arte de sistemas DX-	<1 %

# SAHP para la obtención de agua caliente sanitaria", Enfoque UTE, 2020

Publication

---

18	<a href="https://repository.udistrital.edu.co">repository.udistrital.edu.co</a> Internet Source	<1 %
19	<a href="https://clavigero.iteso.mx">clavigero.iteso.mx</a> Internet Source	<1 %
20	<a href="https://cuidemosnuestroambienteiene.blogspot.com">cuidemosnuestroambienteiene.blogspot.com</a> Internet Source	<1 %
21	<a href="https://dspace.ups.edu.ec">dspace.ups.edu.ec</a> Internet Source	<1 %
22	<a href="https://www.unesco.org.uy">www.unesco.org.uy</a> Internet Source	<1 %
23	<a href="https://markredting.blogspot.com">markredting.blogspot.com</a> Internet Source	<1 %
24	<a href="https://patents.google.com">patents.google.com</a> Internet Source	<1 %
25	<a href="https://repositorio.ug.edu.ec">repositorio.ug.edu.ec</a> Internet Source	<1 %
26	<a href="https://repository.ucatolica.edu.co">repository.ucatolica.edu.co</a> Internet Source	<1 %
27	<a href="https://www.ifelsd.org">www.ifelsd.org</a> Internet Source	<1 %
28	<a href="https://baixardoc.com">baixardoc.com</a> Internet Source	<1 %

---

29	<a href="http://dei.uca.edu.sv">dei.uca.edu.sv</a> Internet Source	<1 %
30	<a href="http://digibuo.uniovi.es">digibuo.uniovi.es</a> Internet Source	<1 %
31	<a href="http://tareando.blogspot.com">tareando.blogspot.com</a> Internet Source	<1 %
32	<a href="http://worldwidescience.org">worldwidescience.org</a> Internet Source	<1 %
33	<a href="http://www.ebookchip.com">www.ebookchip.com</a> Internet Source	<1 %
34	DAVID BIENVENIDO HUERTAS, DAVID MARIN, DANIEL SANCHEZ GARCIA, PEDRO FERNÁNDEZ-VALDERRAMA APARICIO, JUAN MOYANO. "PREDICCIÓN DEL IMPORTE DE ACTUACIONES DE MANTENIMIENTO EN VIVIENDAS Y SOLARES UBICADOS EN ESPAÑA USANDO PERCEPTRONES MULTICAPA", DYNA INGENIERIA E INDUSTRIA, 2019 Publication	<1 %
35	JADER RODRIGUEZ CORTINA. "CONTRIBUCION AL ESTUDIO DE LA INTENSIFICACION DEL PROCESO DE SECADO DE TOMILLO (Thymus Vulgaris L.): APLICACIÓN DE ULTRASONIDOS DE POTENCIA Y SECADO INTERMITENTE", Universitat Politecnica de Valencia, 2013 Publication	<1 %



36	<a href="http://anes.org.mx">anes.org.mx</a> Internet Source	<1 %
37	<a href="http://archive.org">archive.org</a> Internet Source	<1 %
38	<a href="http://bulma.net">bulma.net</a> Internet Source	<1 %
39	<a href="http://casasincreibles.com">casasincreibles.com</a> Internet Source	<1 %
40	<a href="http://docplayer.es">docplayer.es</a> Internet Source	<1 %
41	<a href="http://issuu.com">issuu.com</a> Internet Source	<1 %
42	<a href="http://itcelaya.edu.mx">itcelaya.edu.mx</a> Internet Source	<1 %
43	<a href="http://repositorio.unesp.br">repositorio.unesp.br</a> Internet Source	<1 %
44	<a href="http://repository.unab.edu.co">repository.unab.edu.co</a> Internet Source	<1 %
45	<a href="http://riunet.upv.es">riunet.upv.es</a> Internet Source	<1 %
46	<a href="http://www.accountantscy.com">www.accountantscy.com</a> Internet Source	<1 %
47	<a href="http://www.cunifitting.com">www.cunifitting.com</a> Internet Source	<1 %

48	Esteban Urresta, Marcelo Moya Cajas, Andres Campana, Dario Rodríguez. "Desalinizador solar de múltiples etapas para su aplicación en zonas costeras del Ecuador", Enfoque UTE, 2022 Publication	<1 %
49	legislacion.vlex.com.co Internet Source	<1 %
50	Juan Ángel Saiz Jimenez. "Diseño y realización de un equipo de deshidratación de alimentos mediante energía solar para aplicación a países en desarrollo", Universitat Politecnica de Valencia, 2017 Publication	<1 %
51	Submitted to University of Sussex Student Paper	<1 %
52	futur.upc.edu Internet Source	<1 %
53	repositorio.unj.edu.pe Internet Source	<1 %

Exclude quotes  On

Exclude matches  < 3 words

Exclude bibliography  On