



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTROMECAÁNICA

MODALIDAD: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Título:

Análisis comparativo del rendimiento térmico de un colector solar de placa plana variando el tipo de vidrio en la cubierta.

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Magister en
Electromecánica

Autor

Albarracín Álvarez Mauro Darío

Tutor

Enrique Torres Tamayo Ph.D.

LATACUNGA – ECUADOR
2022

AVAL DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación “Análisis comparativo del rendimiento térmico de un colector solar de placa plana variando el tipo de vidrio en la cubierta” presentado por Albarracín Álvarez Mauro Darío, para optar por el título magíster en Electromecánica:

CERTIFICO

Que dicho trabajo de investigación ha sido revisado en todas sus partes y se considera que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación para la valoración por parte del Tribunal de Lectores que se designe y su exposición y defensa pública.

Latacunga, mayo, 16, 2022



Ph.D. Enrique Torres Tamayo
CC.: 1757121940

AVAL DEL TRIBUNAL

El trabajo de Titulación: “Análisis comparativo del rendimiento térmico de un colector solar de placa plana variando el tipo de vidrio en la cubierta”, ha sido revisado, aprobado y autorizado su impresión y empastado, previo a la obtención del título de Magíster en Electromecánica; el presente trabajo reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la exposición y defensa.

Latacunga, mayo, 25, 2022



Mgtr. Gallardo Molina Cristian Fabian
CC.: 0502847692
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL



Mgtr. Navarrete López Luis Miguel
CC.: 1803747284
LECTOR 2



Mgtr. Corrales Bastidas Byron Paul
CC.: 0502347768
LECTOR 3

DEDICATORIA

A mis padres Gonzalo y Judith.

A mi esposa e hija.

Mauro Albarracín

AGRADECIMIENTO

A toda mi familia, por su comprensión y apoyo.

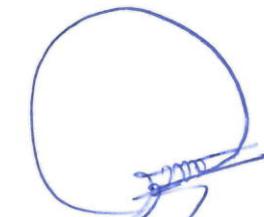
A mi tutor, Enrique Torres.

Mauro Albarracín

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Quien suscribe, declara que asume la autoría de los contenidos y los resultados obtenidos en el presente trabajo de titulación.

Latacunga, mayo, 25, 2022

A handwritten signature in blue ink, consisting of a large, circular loop followed by several horizontal strokes and a long, thin tail extending downwards and to the left.

Mgr. Mauro Darío Albarracín Álvarez
CC.: 0503113730

RENUNCIA DE DERECHOS

Quien suscribe, cede los derechos de autoría intelectual total y/o parcial del presente trabajo de titulación a la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Latacunga, mayo, 25, 2022



Mgr. Mauro Darío Albarracín Álvarez
CC.: 0503113730

AVAL DEL PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Quien suscribe, declara que el presente Trabajo de Titulación: “Análisis comparativo del rendimiento térmico de un colector solar de placa plana variando el tipo de vidrio en la cubierta”, contiene las correcciones a las observaciones realizadas por los lectores en sesión científica del tribunal.

Latacunga, junio, 07, 2022


Mgtr. Gallardo Molina Cristian Fabian
CC.: 0502847692

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTROMECAÁNICA

Título: Análisis comparativo del rendimiento térmico de un colector solar de placa plana variando el tipo de vidrio en la cubierta.

Autor: Mauro Darío Albarracín Álvarez

Tutor: Enrique Torres Tamayo Ph.D.

RESUMEN

Este trabajo estudió el proceso de intercambio térmico que se produce en un flujo másico de aire debido a la radiación solar incidente y temperatura ambiente, se utilizó dos colectores solares de placa plana a los que se les aplicó dos vidrios convencionales oscuro y claro para determinar la incidencia que tiene en la temperatura de salida del aire, el objetivo fue establecer la comparación del comportamiento de los colectores y su rendimiento térmico al variar el tipo de cubierta; se trabajó con experimentos en igualdad de condiciones con toma de datos en tiempo real cada minuto durante seis horas al día y cuatro condiciones, sin aire forzado, con aire forzado a 6,2 m/s, 9,5 m/s y 11,5 m/s; la experimentación permitió definir que la aplicación de vidrio oscuro disminuye el rendimiento térmico, se obtiene mejor rendimiento al utilizar vidrio claro siendo la temperatura de salida mayor con un valor promedio de 8,26 °C sin aire forzado, al utilizar aire forzado la variación promedio de temperatura del colector con vidrio claro con respecto al oscuro es de 0,58 °C a 6,2 m/s con valores de radiación medidas desde 383,5 W/m² (puede haber valores inferiores) , 0,28 °C a 9,5 m/s con radiaciones a partir de 333,1 W/m² y 0,15 °C a 11,5 m/s con radiaciones a partir de 1090,1 W/m².

PALABRAS CLAVE: Colector solar de placa plana; rendimiento térmico; comparación de cubierta.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
POSTGRADUATE DIRECTION**

ELECTROMECHANIC MASTER'S DEGREE

Title: Comparative analysis of thermal performance from a flat solar plate collector varying glass type on the cover.

Author: Mauro Darío Albarracín Álvarez

Tutor: Enrique Torres Tamayo Ph.D.

ABSTRACT

This work studied heat exchange process that occurs in a mass air flow due to solar radiation influence and ambient temperature, using two solar flat plate collectors which ones conventional dark and light glasses were applied to determine the impact on air outlet temperature, the objective was to compare collectors behavior and their thermal performance by many types of covers; experiments were carried out under equal conditions with real time data taken every minute for six hours a day and with four conditions, no forced air, with forced air at 6.2 m/s, 9.5 m/s and 11.5 m/s; the experimentation allowed to define that dark glass application decreases thermal performance, better performance is obtained using clear glass, being outlet temperature higher with an average value of 8.26 °C without forced air, at using forced air, the average temperature variation of the collector with clear glass with respect to dark glass is 0.58 °C at 6.2 m/s with radiation values measured from 383.5 W/m² (there may be lower values), 0.28 °C at 9.5 m/s with radiation values starting from 333.1 W/m² and 0.15 °C at 11.5 m/s with radiation values starting from 1090.1 W/m².

KEYWORDS: Flat plate solar collector; thermal performance; roof comparison.

Yo, Edison Marcelo Pacheco Pruna con cédula de identidad número: 0502617350, Licenciado en: Ciencias de la Educación Mención Inglés con número de registro de la SENESCYT: 1020-12-1169234; **CERTIFICO** haber revisado y aprobado la traducción al idioma inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: "Análisis comparativo del rendimiento térmico de un colector solar de placa plana variando el tipo de vidrio en la cubierta" de: Mauro Darío Albarracín Álvarez, aspirante a Magister en Electromecánica.

Latacunga, junio, 06, 2022



Lic. Edison Marcelo Pacheco Pruna Mg.
CC.: 0502617350

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
ÍNDICE DE TABLAS	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO I	5
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	5
1.1 Introducción y objetivo del capítulo.	5
1.2 Antecedentes de la investigación o fundamentación del estado del arte.	5
1.3 Fundamentación teórica.	13
1.3.1 Variables ambientales que inciden en el calentamiento del aire.....	13
1.3.2 Flujo másico de aire.	16
1.3.3 Rendimiento térmico.....	17
1.4 Descripción del objeto de estudio.	18
1.4.1 Colector solar de placa plana.	18
1.4.2 Principio de funcionamiento.	19
1.4.3 Partes.....	19
CAPITULO II	22
MATERIALES Y MÉTODOS	22
2.1 Introducción y objetivo.	22
2.2 Estación experimental.	22
2.2.1 Ubicación geográfica.	22
2.2.2 Colectores solares.	23
2.2.3 Estación meteorológica.	25
2.2.4 Equipos auxiliares para validación de datos.	25
2.2.6 Ubicación de los sensores.	26

2.3 Metodología.....	27
2.3.1 Selección de variables y descripción.....	28
2.3.2 Curvas comparativas de dos colectores en igualdad de condiciones....	29
2.3.3 Comparación de curvas con datos obtenidos utilizando vidrio convencional oscuro y claro.....	30
2.3.4 Rendimiento térmico y análisis comparativo.....	31
2.3 Conclusiones del Capítulo II.....	34
CAPITULO III.....	35
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	35
2.1 Introducción y objetivo.....	35
3.2 Análisis de resultados.....	35
3.2.1 Variación de temperatura en igualdad de condiciones.....	36
3.2.2 Análisis comparativo de la variación del rendimiento térmico entre cubierta de vidrio convencional oscuro y claro, sin aire forzado.....	37
3.2.2 Análisis comparativo de la variación del rendimiento térmico entre cubierta de vidrio convencional oscuro y claro, con aire forzado.....	39
3.3 Impacto ambiental.....	45
3.4 Conclusiones del Capítulo III.....	45
CONCLUSIONES GENERALES.....	46
RECOMENDACIONES.....	48
ANEXO.....	49
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Ángulo de inclinación.....	13
Fig. 2. Diagrama de un colector solar.....	18
Fig. 3. Ubicación geográfica de la estación experimental.....	23
Fig. 4. Estación experimental.....	23
Fig. 5. Estación meteorológica WS-2000.....	25
Fig. 6. Determinación de variables.....	28
Fig. 7. Comportamiento de los colectores solares M_4 y M_6	29
Fig. 8. Comportamiento de los colectores – sin flujo de aire.....	37
Fig. 9. Variación de temperatura sin aire forzado.....	38
Fig. 10. Comportamiento de los colectores - a 6,2 m/s.....	39
Fig. 11. Variación de temperatura con flujo de 6,2 m/s.....	40
Fig. 12. Variación del rendimiento térmico a 6,2 m/s.....	40
Fig. 13. Comportamiento de colector - a 9,5 m/s.....	41
Fig. 14. Variación de temperatura con flujo de 9,5 m/s.....	42
Fig. 15. Variación del rendimiento térmico a 9,5 m/s.....	42
Fig. 16. Comportamiento del colector – 11,5 m/s.....	43
Fig. 17. Variación de temperatura con flujo de 11,5 m/s.....	44
Fig. 15. Variación del rendimiento térmico a 11,5 m/s.....	44

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA I SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN CON LOS OBJETIVOS	2
TABLA II UBICACIÓN GEOGRÁFICA.....	22
TABLA III EQUIPOS Y ACCESORIOS DEL COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA	24
TABLA IV ESPECIFICACIONES CONSTRUCTIVAS DEL COLECTOR....	24
TABLA V EQUIPOS AUXILIARES PARA VALIDACIÓN DE DATOS	26
TABLA VI UBICACIÓN DE LOS SENSORES.....	27
TABLA VII NOMENCLATURA DE SENSORES.....	27
TABLA VIII NÚMERO DE EXPERIMENTOS	30
TABLA IX VARIACIÓN DE TEMPERATURA.....	36

INTRODUCCIÓN

En la Universidad Técnica de Cotopaxi una de las líneas de investigación es **“Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental”** concomitante con esta convergen actividades y tareas investigativas en la sub línea de investigación **“Eficiencia energética en sistemas electromecánico y uso de fuentes renovables de energía”**, por lo que, el análisis comparativo del rendimiento térmico de un colector solar de placa plana variando el tipo de vidrio en la cubierta guarda estrecha relación con los procesos de investigación institucional.

El aprovechamiento y transformación de energía en el desarrollo de la humanidad ha sido determinante, desde tiempos inmemorables nuestros antepasados han reconocido al sol como una fuente perpetua generadora de luz y calor, fecundadora de cultivos; actualmente, sin desconocer este principio ancestral, al astro rey se lo asocia como una fuente de energía alternativa y renovable digna de ser aprovechada para la satisfacción de necesidades energéticas de la época. La mayor parte de las actividades humanas presupone de un alto consumo de energía en sus diferentes formas, razón por la que se destaca la necesidad de investigar sobre mecanismos o dispositivos que permitan tener un suministro de energía. El presente trabajo establece la comparación del **rendimiento térmico** resultante de la utilización de dos vidrios convencionales el oscuro y claro en la cubierta de un colector solar de placa plana para el calentamiento de aire, para este propósito se considera la variación del **flujo másico de aire forzado**, los valores aleatorios de **radiación solar incidente** y la **temperatura ambiente**.

El uso de energía solar térmica en el Ecuador, si bien es todavía limitado, constituye una oportunidad para la investigación y desarrollo de dispositivos tales que

permitan la transformación sostenible y sustentable de este recurso natural ampliamente disponible de manera accesible.

Al formular el problema se establece que el estudio del **proceso de intercambio térmico** que se produce en un **flujo másico de aire** debido a la **radiación solar incidente** y **temperatura ambiente** en un colector solar de placa plana al que se le aplica dos vidrios convencionales oscuro y claro para **determinar la incidencia** que tiene en la **temperatura de salida del aire** y su **rendimiento térmico**, es una necesidad imperiosa en la actualidad.

El **objeto** en el que se enmarca el presente trabajo son los colectores solares de placa plana, siendo el **campo** de acción el estudio del rendimiento térmico de los referidos colectores a los cuales se varía el tipo de vidrio en la cubierta.

Establecer la comparación del comportamiento de los colectores solares de placa plana y el rendimiento térmico variando el tipo de vidrio en la cubierta es el objetivo general de este estudio, con este propósito se parte por **describir los fundamentos teóricos referentes a los colectores solares** para identificar y posteriormente **medir las variables ambientales aleatorias y de entrada que inciden en el calentamiento de aire** lo que finalmente permite **comparar las curvas de comportamiento del colector y el rendimiento térmico utilizando vidrio convencional oscuro y claro en igualdad de condiciones**.

Se expone en la siguiente tabla el sistema de tareas en relación con los objetivos planteados:

TABLA I
SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN CON LOS OBJETIVOS

Objetivo general	Establecer la comparación del comportamiento de los colectores solares de placa plana y el rendimiento térmico variando el tipo de vidrio en la cubierta.		
Objetivos específicos	Actividad (Tareas)	Resultado de la actividad	Descripción de la actividad (Técnicas e Instrumentos)
Describir los fundamentos teóricos referentes a	Identificación de los fundamentos teóricos sobre	Sistematización de contenido útil	Técnica: Recolección y análisis de documentos

los colectores solares de placa para el calentamiento de aire	los colectores solares		
	Ubicación de colector solar considerando su inclinación ideal.	Adecuada posición del colector	Técnica: Observación Instrumento: Brújula Nivel de burbuja
Medir las variables ambientales aleatorias y de entrada que inciden en el calentamiento de aire de un colector solar de placa plana	Definición de variables	Variables identificadas de entrada, salida y aleatorias	Técnica: Observación
	Medición de variables ambientales aleatorias, de entrada y salida	Valores de: Radiación solar incidente Temperatura ambiental Flujo másico de aire Rendimiento térmico	Técnica: Observación Instrumento: Piranómetro Estación Meteorológica Termómetro ambiental Caudalímetro Pirómetro Cámara Termográfica
Comparar las curvas de comportamiento del colector solar de placa plana y el rendimiento alcanzado utilizando vidrio convencional oscuro y claro en igualdad de condiciones.	Análisis del intercambio térmico	Datos de temperatura de salida en función del flujo másico, radiación solar incidente y temperatura ambiental.	Técnica: Observación Instrumento: Software Microsoft Excel
	Interpretación de valores y resultados obtenidos	Curvas de comportamiento del colector solar de placa plana con vidrio convencional oscuro y claro	Técnica: Observación Instrumento: Software Microsoft Excel

Tomado en cuenta lo señalado el Plan Nacional de Desarrollo 2021-2025 – Plan de Creación de Oportunidades, que en el eje 4 correspondiente a “Transición Ecológica” y su objetivo 12 “Fomentar modelos de desarrollo sostenibles aplicando

medidas de adaptación y mitigación al Cambio Climático” plantea como Política 12.3 “Implementar mejores prácticas ambientales con responsabilidad social y económica, que fomenten la concientización, producción y consumo sostenible, desde la investigación, innovación y transferencia de tecnología [1], se puede señalar que se **justifica** la realización de este trabajo por ser pertinente con los ejes, objetivos y metas que nuestro país tiene en el presente periodo, concomitante con lo señalado es menester referenciar también los Objetivos de Desarrollo Sostenible ODS que en su objetivo 7 “Energía asequible y no contaminante” en su meta 7.2 “De aquí a 2030, aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas” [2], con lo que se demuestra que el presente trabajo tiene relación con los objetivos nacionales de desarrollo y con los objetivos para transformar nuestro mundo al investigar temas que permitan realizar transferencia tecnológica que fomente la concientización para tener mejores prácticas ambientales con el uso de fuentes renovables de energía como lo es la energía solar térmica en el calentamiento de aire.

Adicionalmente a lo expuesto el trabajo que se presenta contribuye en la ejecución de un proyecto de investigación generativa de la Universidad Técnica de Cotopaxi denominado “Análisis de eficiencia en el proceso de secado solar de cacao mediante diferentes formas geométricas en el sistema de captación”, los resultados permite generar un puntual pero al mismo tiempo significativo aporte para la consecución de los objetivos uno y dos de citado proyecto siendo el primer objetivo “Investigar los procesos de captación de la energía solar para el secado y la influencia de las diferentes variables meteorológicas” y el segundo objetivo “Establecer un análisis comparativo del comportamiento de la eficiencia energética en función de las formas geométricas y materiales del absorbedor para la captación de la energía solar”, proyecto que consta en la Resolución 4.1 del Consejo Académico y de Investigación de fecha Latacunga, 13 de octubre del 2021, en la que en sus parte pertinente señala “Aprobar la Convocatoria de Proyectos de Investigación UTC-2019, planteados acorde a las líneas de investigación de las carreras, a ejecutarse en el período 2021-2023”.

La **hipótesis** como proposición tentativa de este trabajo con el apoyo de los conocimientos organizados y sistematizados busca probar que **el uso de vidrio convencional oscuro en la cubierta de un colector solar de placa plana incidirá en la disminución del rendimiento térmico, debido a las pérdidas por absorción y reflexión de la radiación solar incidente.**

CAPITULO I

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

1.1 Introducción y objetivo del capítulo.

En el presente capítulo se detalla la fundamentación teórica relacionada con el uso de los colectores solares de placa plana para el calentamiento del aire, considerando los aspectos más relevantes como principio de funcionamiento, características técnicas, elementos fundamentales, variables incidentes, flujo másico del aire y rendimiento térmico, por lo que se establece un estudio de proyectos precedentes que sustenten teóricamente el objeto de estudio. El objetivo del capítulo es definir las variables ambientales que inciden en el proceso de calentamiento del aire por medio del uso de colectores solares de placa plana.

1.2 Antecedentes de la investigación o fundamentación del estado del arte.

En los diversos casos de estudio que tienen relación con el tema de investigación “Análisis comparativo del rendimiento térmico de un colector solar de placa plana variando el tipo de vidrio en la cubierta” para la descripción de efectos, impactos técnicos y resultados se presentan los siguientes:

En la **Universidad Nacional de Río Cuarto – Argentina**, se presentó un artículo científico para la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente “ASADES” denominado “Evaluación de un sistema de calentamiento de aire apto para secado solar indirecto de perejil”, mencionando que el proceso de secado está formado por tres componentes básicos: un colector de agua, un intercambiador de calor agua-aire y la cámara de secado; el flujo de aire a través del intercambiador es forzado y es impulsado por un ventilador de 12 V, la velocidad del aire a la salida es cercana a los 4 m/s; se determinó que para un aumento de 20 °C en la temperatura

del aire se requiere una variación de temperatura de agua aproximadamente 13 °C, por otra parte, si el aumento en la temperatura del aire es de 30 °C, el colector solar debe proveer una temperatura de agua cercana a los 22 °C [3].

Dentro de la experimentación, se determina que, en un punto de 30 minutos la temperatura del aire de salida comienza a decaer igualándose a la temperatura de entrada o ambiente, es importante destacar que la ubicación de la termocupla en la parte superior del tanque, no es representativa, de la temperatura promedio en el tanque, la transferencia de calor hacia el aire disminuye y la temperatura del aire es menor, finalmente se concluye que el sistema mencionado es capaz de proveer un aumento en la temperatura del aire de 17 °C y que para 1 kg de perejil, se necesita cerca de 5 días para obtener una humedad final del 10 % [3].

En la **Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas – México**, se presentó un proyecto investigativo de titulación denominado “Caracterización térmica y análisis de irreversibilidades en colectores solares de placas planas para calentamiento de aire”, se plantearon dos etapas; en la primera se desarrolló el balance de energía para cada elemento del colector, determinando la exergía de entrada y las destrucciones exergéticas involucradas en el colector; en la etapa 2 se implementó el método de Runge Kutta Fehlberg para obtener el rendimiento exergético del colector, por lo que, en la presentación de los resultados se obtuvieron los efectos de la variación de los materiales en las partes principales de un colector solar de placa plana (cubierta, placa absorbadora y aislante térmico) [4].

Dentro de la cubierta se obtuvo un rendimiento máximo exergético de 52 % en vidrio Pyrex, 48 % en policarbonato, 47 % en acrílico y 40,5 % en vidrio ordinario; en la placa absorbadora se plantearon 3 tipos de materiales con un rendimiento máximo 41,5 % en pintura negra en aluminio, 36,1 % de óxido de cobalto en níquel pulido y 35,1 % de óxido de níquel negro sobre aluminio; como aislante térmico se analizaron 5 tipos de material considerando que el rendimiento exergético máximo utilizando el corcho es de 41,5 %, en poliestireno expandido es de 41,48 %, en lana de vidrio es de 41,47 %, en lana de roca es de 41,475 % y de espuma de poliuretano es de 41,35 %. [2]

En la **Universidad Nacional de Santiago del Estero**, se presentó un artículo científico para el VI Congreso Argentino De Ingeniería Mecánica denominado “Heat Pipe para calentamiento de aire en un colector solar plano” en donde menciona que el sistema de transferencia de calor por cambio de fase en forma cíclica de un fluido de trabajo es una tecnología que domina el mercado por su empleo para el calentamiento de aire, por lo que se analizó un prototipo en escala de un colector solar plano, que se basa en esta tecnología, la toma de datos se desarrolló en la provincia de Santiago del Estero (Argentina) cuyas coordenadas de ubicación geográfica son 27°47'04"S 64°16'01"O; los resultados determinaron lo siguiente: para un grado de llenado del 10 % en volumen, con un valor máximo de radiación de 1100 W/m², se obtuvo un rendimiento medio del 63 %, considerando un flujo másico de aire de 0,012 kg/s, adicional se determinó una diferencia de temperatura promedio del aire de entrada y salida de 10,2 °C, por otra parte, para el caso de estudio con un llenado del 90 % a la misma radiación solar y flujo másico, este rendimiento medio cae hasta los 56 % con diferencias de temperatura de entrada y salida de 5,4 °C [5].

En el **Instituto Politécnico Nacional – México**, se presentó un artículo científico para el Congreso de Avances en Ciencias y Tecnologías del Frío VII denominado “Modelado y simulación del calentamiento de aire en invernaderos utilizando colectores solares planos”, en donde se utilizaron fórmulas matemáticas para determinar el área de captación del colector solar, el flujo másico del aire y la cantidad de calor demandado, los parámetros para la modelación del sistema fueron: área del colector de 2,38 m², temperatura de entrada del aire 15 °C y el rendimiento del colector del 50 % a una radiación solar que varía desde los 585 W/m² hasta 750 W/m²; el invernadero necesita una cantidad de calor de 0,8 kW a 4 kW a diferentes temperatura internas de 5 a 25 °C respectivamente, al utilizar los coelctores solares la cantidad de calor que se genera varía desde los 1,5 kW a 8,5 kW para la misma variación de temperatura con el exterior [6].

En la **Universidad del Atlántico – Colombia**, se presentó un artículo científico para la revista “TecnoLógicas” denominado “Diseño y construcción de un sistema híbrido de calentamiento de aire por combustión de biomasa y radiación solar,

utilizando PCM como fuente de almacenamiento térmico, para secado de yuca”, la investigación recalcó en el diseño, construcción y validación de un sistema híbrido de calentamiento de aire, consistiendo en que si la radiación solar estaba por debajo de $116 \text{ W/m}^2 (\pm 31,94 \text{ W/m}^2)$ se realice la inyección de combustible para mantener la una temperatura de aire a la salida de los dos colectores solares de $46 \text{ }^\circ\text{C} (\pm 4^\circ\text{C})$ y $51 \text{ }^\circ\text{C} (\pm 4,08^\circ\text{C})$ durante 45 minutos, mediante las mediciones realizadas se determinó que la placa absorbidora del colector solar fue el elemento que mayor cantidad de calor se transfirió al aire, seguido de la placa intermediaria y la cubierta de vidrio, finalmente, el rendimiento de los colectores solares fueron de aproximadamente el 43,91 % [7].

En la **Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Bolivariana - Venezuela**, se realizó artículo científico para la Revista Ingeniería UC denominado “Modelo matemático del comportamiento térmico de un colector solar de placas planas inclinadas para calentamiento de aire” el cual mencionó que las consideraciones para el desarrollo del modelo matemático fueron: el colector solar trabaja en condiciones estacionarias, la temperatura del aire puede variar en la dirección del flujo, la conducción de calor en placas es despreciables, toma de valores solamente cuando el colector tenga la presencia de luz solar y la humedad es despreciable por lo tanto, el fluido de trabajo fue aire seco [8].

Se analizó un colector solar de placa plana con un área de 3 m^2 a un ángulo de inclinación de 0° a 60° , a un flujo másico de aire de $0,028 \text{ kg/s}$, a una radiación solar desde las 7h00 hasta las 17h30, obteniendo una temperatura ambiental promedio de $24,75^\circ\text{C}$, cuando el colector solar tiene un ángulo de inclinación de 0° la máxima irradiación es de 630 W/m^2 provocando una temperatura de salida máxima de $55 \text{ }^\circ\text{C}$, mientras que a 60° la máxima irradiación solar fue de 500 W/m^2 obteniendo una temperatura máxima a la salida de $47 \text{ }^\circ\text{C}$ y un rendimiento promedio de 45 % [8].

Como resultados se obtuvieron que los contornos de temperatura del aire en el colector solar fueron los siguientes: una temperatura en el exterior de la cubierta de $27 \text{ }^\circ\text{C}$ y de interior $47 \text{ }^\circ\text{C}$, en el aire interno del colector una temperatura de $67 \text{ }^\circ\text{C}$ y en la placa absorbidora de $107 \text{ }^\circ\text{C}$; los contornos de velocidad de aire en el

exterior de la cubierta son nula y en el interior es de 0,11 m/s, en el aire interno del colector presenta una velocidad de 0,3 m/s que va creciendo hasta los 0,77 m/s, siendo evidente que el aire se traslada en el interior del colector y su temperatura va aumentando como resultado del ascenso del aire y la mezcla del mismo producto de la convección natural [8].

En la **Universidad Continental - Perú**, se realizó un proyecto de titulación denominado “Optimización de un colector solar térmico de aire para mejorar el confort térmico en viviendas alto andinas de la región Junín” el proyecto dio inicio en caracterizar las condiciones del lugar a calefaccionar, el cual presentó un área de 38,92 m² en donde la temperatura de ambiente promedio es de 15,57 °C, se realizó un balance de energía para obtener una temperatura de 22 °C es necesaria la cantidad de calor de 5,62 W en 6 horas de trabajo, el colector solar se ubicó en una inclinación de 7,5° orientado hacia el norte en el hemisferio sur obteniendo una radiación promedio solar de 449,54 W/m² [9].

En la **Universidad de Sonora - México**, se realizó un proyecto de titulación denominado “Evaluación de la eficiencia térmica de un colector solar de tubos evacuados para aire de secado”, el proyecto consistió en la implementación del colector solar y la adquisición de datos de temperatura del aire en la entrada y salida del colector, así como también los valores de flujo másico y la radiación incidente en la placa colectora, con los valores que se obtuvieron se determinó la cantidad de calor útil y el rendimiento instantáneo; el colector solar se desarrolló por medio de tubos evacuados de 1,80 metros que presenta un área de sección transversal de 0,515 m² [10].

Se analizaron durante varios días separándolos por etapas, la primera presentaba un flujo másico de aire de 20,5 kg/h, obteniendo una temperatura de salida de 45 °C hasta los 80 °C con un rendimiento del 60 %, en la segunda etapa se realizó una variación de flujo másico hasta los 30,7 kg/h logrando a la salida de hasta los 90 °C con un rendimiento del 40 %, estos resultados se dieron para una radiación máxima de 1000 W/m² [10].

En la **Universidad Nacional de Salta – Argentina**, se realizó artículo científico para los Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente denominado “Nuevo calentador solar de aire con matriz porosa selectiva desarrollo tecnológico y evaluación experimental” el cual presentó el desarrollo de un prototipo de colector solar para el calentamiento del aire que incluye una placa absorbidora una matriz porosa de acero reciclado de factor 96 % El factor de huecos o porosidad de la matriz es del 96 %; la ubicación del colector fue en la ciudad de Salta con un ángulo de inclinación de 40° en condiciones metereológicas de invierno [11].

Se presentaron tres ensayos a distintos flujos máxicos de 0,065 kg/s, 0,051 kg/s y 0,043 kg/s obteniendo una variación de temperatura de entrada con relación a la salida del colector solar de 16,2 °C, 19 °C y 21 °C respectivamente, mediante una metodología experimental se obtuvieron las curvas de rendimiento instantáneo presentando valores máxicos de 64 %, 55,4 %, y 55,0 %, para los 3 ensayos; la cantidad de energía útil obtenida en promedio fue de 23 MJ; 20,2 MJ y 19,5 MJ [11].

En la **Universidad Nacional del Centro – Perú**, se realizó artículo científico para la revista Ingeniare Revista chilena de ingeniería denominado “Velocidad de secado en tres tipos de secadores solares del Aguaymanto” se construyeron tres tipos de prototipos: directo, indirecto y mixto, los cuales se implementaron en la ciudad de Tarma con una altitud de 3050 msnm, latitud de 11°25’12” y longitud de 75°41’17”, la velocidad del viento es de 1,11 m/s, el promedio de temperatura ambiental varía entre 13 °C a 18 °C con una radiación solar promedio de 5,43 kWh/m² ·día. El proceso de secado fue mediante la radiación solar y la convección natural de aire caliente que son generados por los colectores solares; en las pruebas experimentales se mencionó que la humedad relativa del aire ambiente cambió de 16% a 52%, las velocidades para el secado fueron de: 0,0287; 0,0208 y 0,0407 (kg agua / m²·hora), determinado que los secadores solares son una alternativa viable, natural, económica y de fácil manejo para el deshidratado de los alimentos [12].

En la **Universidad Nacional de Loja – Ecuador**, se presentó un artículo científico para la revista científica “CienciAmérica” denominado “Módulo de aprovechamiento solar para generación de aire caliente”, se utilizó una

investigación teórica – experimental, para proceder a la obtención de parámetros principales del funcionamiento del colector solar de placa plana para el desarrollo de un balance térmico; mediante el uso de un software matemático se ingresaron los valores de datos geométricos del colector solar y del ducto, especificaciones del aislante y características térmicas de radiación de los materiales para realizar una modelación matemática que verifique el comportamiento interno del intercambio de calor del colector solar [13].

Las características del objeto de estudio son las siguientes: área de la placa absorbidora 1 m^2 , compuesta por un conjunto de 13 ductos rectangulares de $38,10 \text{ mm} \times 76,20 \text{ mm}$, una velocidad de aire forzado de $7,2 \text{ m/s}$ con una trayectoria de tipo serpentín; las mediciones experimentales se ejecutaron entre las 11h30 y 13h00 en la ciudad de Catamayo obteniendo una radiación promedio de $923,4 \text{ W/m}^2$, una temperatura ambiente promedio de $30,63 \text{ }^\circ\text{C}$, una temperatura de la placa colectora promedio de $63,75 \text{ }^\circ\text{C}$, una temperatura a la salida del ducto promedio de $35,91 \text{ }^\circ\text{C}$ y una temperatura en la superficie de vidrio promedio de $52,30 \text{ }^\circ\text{C}$; el rendimiento del colector es de $75,7 \%$ manteniendo un caudal másico de $0,0204 \text{ kg/s}$ [13].

En la **Universidad Técnica de Cotopaxi - Ecuador**, se desarrolló un proyecto investigativo de titulación denominado “Análisis comparativo del rendimiento térmico entre un colector solar de placa plana y la adhesión de aletas en la placa absorbente”, mencionando que los factores que inciden en el rendimiento térmico del sistema son: el ángulo de inclinación y el incremento del área total de la placa colectora mediante la adhesión de aletas rectangulares, por lo que se desarrolló un estudio sobre la transferencia de calor por convección forzada utilizando cuatro tipos de flujo de aire diferente, se determinó un análisis de la energía solar térmica en la placa colectora, balance de energía en el sistema, aplicación de fórmulas teóricas de transferencia de calor y la elaboración de tablas con los datos obtenidos, alcanzando como resultados una temperatura de salida promedio del colector de $34,52 \text{ }^\circ\text{C}$, un calor útil de $292,51 \text{ W}$ y un valor medio de rendimiento del $64,76 \%$ [14].

En la **Universidad Internacional SEK - Ecuador**, se realizó un proyecto de titulación denominado “Colector solar térmico con aire de superficie plana para

calefacción y ventilación de áreas internas en viviendas y edificios” el cual inició con el estudio de la energía solar térmica que incide sobre el colector, la aplicación de balances energéticos para el desarrollo de las expresiones matemáticas relacionadas con la transferencia de calor, los parámetros de trabajo del colector solar fueron: área de $9,35 \text{ m}^2$, temperatura ambiental igual a la temperatura de entrada de promedio $17 \text{ }^\circ\text{C}$, potencia del generador de aire 2 HP [15].

Los resultados del proyecto obtuvieron una temperatura variable de $34,6 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta los $94 \text{ }^\circ\text{C}$ a la salida de aire del colector solar con una irradiancia de 298 W/m^2 hasta 810 W/m^2 respectivamente, una cantidad de calor útil generada promedio de $3807,65 \text{ W}$ en la parte interna de la placa absorbadora, como resultado principal final es el rendimiento promedio obtenido del $59,09 \%$ bajo diferentes condiciones meteorológicas que no favorecieron entre los meses de noviembre y diciembre del 2019 [15].

En la **Universidad Técnica de Cotopaxi - Ecuador**, se realizó un proyecto investigativo de titulación denominado “Análisis comparativo del rendimiento térmico de un colector solar de placa plana con la variación de altura en la superficie colectora”, la variación de altura que se consideró para la placa colectora fue de 30 mm y de 50 mm, el colector solar se implementó en la terraza de la Universidad Técnica de Cotopaxi en la ciudad de Latacunga, dentro de sus construcción se consideraron los siguientes parámetros: una estructura metálica de soporte, cubierta de vidrio con 4 mm, como aislador térmico una plancha de poliuretano y una superficie de captación de aluminio; mediante una adquisición de datos de temperatura y radiación solar se determinó que para una variación de altura de 30 mm se tuvo un promedio de temperatura en la cubierta de vidrio de $20,90 \text{ }^\circ\text{C}$, un promedio de temperatura en la placa colectora de $24,3 \text{ }^\circ\text{C}$, un promedio de temperatura a la salida del colector de $20,88 \text{ }^\circ\text{C}$, el calor útil alcanzado fue de $93,88 \text{ W}$ y un promedio del rendimiento del $64,61\%$, por otra parte, variando la altura a 50 mm se obtuvo un promedio de temperatura en la cubierta de $19,78 \text{ }^\circ\text{C}$, un promedio de temperatura en la placa colectora de $22,73 \text{ }^\circ\text{C}$, un promedio de temperatura a la salida del colector de $21,35 \text{ }^\circ\text{C}$, el calor útil alcanzado es de $196,86 \text{ W}$ y un promedio del rendimiento del $63,39 \%$ [16].

1.3 Fundamentación teórica.

En este apartado se mencionan las características teóricas, conjuntos de ideas y definiciones que permitan describir las variables presentes en el objeto de estudio.

1.3.1 Variables ambientales que inciden en el calentamiento del aire.

Este tipo de variables se presentan de manera directa en los colectores solares realizando un cambio en el comportamiento de la temperatura del aire en la salida, estas variables son: posición de los colectores, radiación solar incidente, temperatura ambiente, velocidad del aire y la concentración de humedad [17].

1.3.1.1 Posición de los colectores.

Para obtener una mayor cantidad de calor de aire a la salida de un colector solar, es necesario inclinar el colector solar a un cierto ángulo dependiendo de la zona de ubicación geográfica del mismo como se muestra en la figura 1, así como también la orientación en sentido norte o sur dependiendo de su hemisferio terrestre [18].

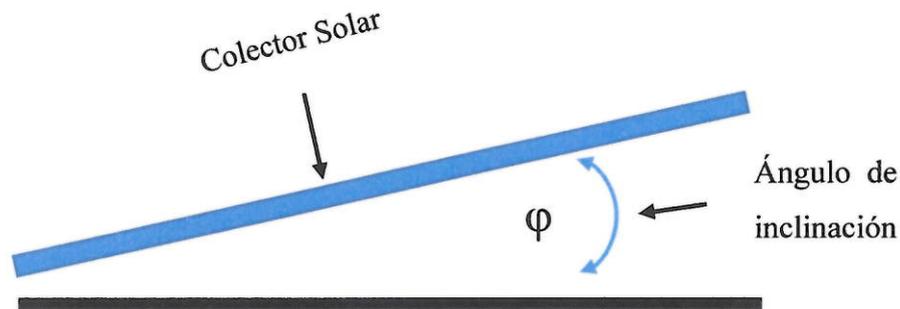


Fig. 1. Ángulo de inclinación.

Para tener un mayor rendimiento de los colectores solares, éstos deben formar una perpendicularidad con los rayos solares, por tal razón se los orienta hacia donde transita el sol, es decir posicionarlos con dirección hacia el Ecuador; por ejemplo si la implementación se desea realizar en el hemisferio norte el colector solar debe orientarse hacia el sur, por lo contrario si se quiere implementar un colector en el hemisferio sur se debe posicionarlo con vista hacia el norte, pero si se instala un colector solar en el Ecuador de manera ideal deben ir acostados sin ninguna inclinación [19].

- **Latitud.**

Es la distancia angular medido desde cualquier punto determinado del planeta tierra en relación con la línea ecuatorial, si este punto se encuentra en el hemisferio norte se designa un rango que va desde 0° hasta 90° positivo, por otra parte, si el sitio (punto) está en el hemisferio sur presenta el mismo rango de manera negativa [9].

- **Longitud.**

Expresa una distancia angular de un punto (lugar/sitio) de la superficie terrestre en relación al meridiano de Greenwich tomado como ángulo 0° , si el lugar de ubicación se encuentra en la parte oriental el ángulo que comprende es de 0° a 180° positivo, mientras que, si se encuentra en la parte occidental el ángulo corresponde el mismo ángulo, pero de forma negativa [9].

1.3.1.2 Radiación solar incidente.

Se conoce como radiación solar a la cantidad de energía que emite el sol propagada en todas las direcciones del espacio por medio de ondas electromagnéticas, este tipo de energía tiene varias aplicaciones dentro de la ingeniería, las cuales se destacan: generación de energía eléctrica y los sistemas de calentamiento térmico mediante el uso de colectores solares [10].

La concentración de la radiación solar que incide sobre cualquier tipo de sistema de captación va a depender de los siguientes parámetros:

- Ubicación geográfica
- Ángulo de inclinación
- Condiciones climáticas
- Metros sobre el nivel del mar.

El instrumento de medición de la radiación solar incidente en una superficie plana se denomina piranómetro.

- **Irradiación.**

Es una magnitud que mide la energía por unidad de superficie de radiación solar que incide en una superficie, o también es la potencia recibida durante un tiempo siendo sus unidades (J/m^2 o Wh/m^2) [6].

- **Irradiancia.**

Se define como la magnitud utilizada para describir la potencia que incide sobre cualquier unidad de superficie, su unidad es (W/m^2) dentro del sistema internacional de unidades, tiende a clasificarse en distintos tipos como: irradiación solar total, directa, difusa y global [13].

En los colectores solares la radiación solar incide sobre la cubierta de vidrio generando dos fenómenos que son: reflexión y refracción; por medio de la reflexión la radiación entra en contacto con la cubierta regresando al punto donde se originó, por otra parte, la refracción traspasa la cubierta de vidrio permitiendo llegar hacia la placa absorbidora de calor y que parte de esa energía que llega se convierte en calor aumentando la temperatura del colector solar. Si en el interior del colector solar pasa un fluido, parte de ese calor generado se transfiere a este, cumpliendo con la primera y segunda ley de la termodinámica. El resto de energía se sigue perdiendo en forma de radiación desde el colector solar hacia el exterior [13].

1.3.1.3 Temperatura ambiente.

La temperatura ambiente es la cantidad de calor presente en un contorno, es muy utilizada como parámetro principal en el diseño e implementación de colectores solares, generalmente se ha considerado que una temperatura ambiente normal para lugares cálidos varía entre 20 y 25 °C. La temperatura ambiental se puede medir por diferentes instrumentos como: termómetro, pirómetro, termopares, termistores, sensores de temperatura electrónicos, entre otros [20].

Utilizando el sistema internacional de unidades, la temperatura se mide en Kelvin (K), sin embargo, dentro de la parte de investigaciones es muy común el uso de Celsius (°C), su diferencia radica en que utilizando la escala Kelvin la medición inicia desde la temperatura absoluta (cero absoluto), mientras que al utilizar grados

Celsius el inicio de la escala viene dado en función a la temperatura de congelamiento del agua es decir que a los 0 °C se obtiene 273,15 K.

1.3.1.4 Velocidad del viento.

Es la velocidad del aire medida en una ubicación específica muy cercana a un sistema de captación solar, se utiliza un instrumento denominado anemómetro para su medición permitiendo el registro de lectura de la señal de salida cada minuto; para encontrar la velocidad promedio del viento se realiza mediante la integración de cada periodo de ensayo con mediciones que permitan una precisión de $\pm 0,80$ m/s [21].

Para determinar el rendimiento térmico de un sistema de captación solar es posible despreciar la velocidad del viento para lugares en donde la velocidad promedio no exceda los 16 km/h, es decir el colector solar permanecería en condiciones cuasi-estacionarias.

1.3.1.5 Concentración de humedad.

La humedad menciona la cantidad de agua en forma de vapor que contiene el aire, se clasifica en dos tipos; humedad absoluta y relativa, ésta última es la humedad de medición de las estaciones meteorológicas. No existe una diferencia entre los modelos matemáticos y los datos reales de un sistema de captación solar para los factores climáticos como: humedad y la dirección del viento, por lo tanto, no son considerables dentro del estudio en colectores solares, de todas maneras, estas variables son mencionadas en relación con el ensuciamiento de la cubierta de vidrio [22].

1.3.2 Flujo másico de aire.

El flujo de másico o caudal másico es la cantidad de masa que se traslada de un punto a otro punto por unidad de tiempo, esta masa viene representando el número de moléculas presentes en cualquier tipo de sustancia, como por ejemplo la masa de un gas no tiene variación en relación a cambio de presión y temperatura por lo que el tiempo es el factor variable. El flujo másico generalmente se representa en kg/s para el sistema internacional o en lb/min para el sistema inglés [9].

Para el cálculo del flujo másico en colectores solares es necesario conocer la densidad del fluido que se transporta, la velocidad y el área de la sección transversal, si no se conocen esos parámetros, mínimo es necesario conocer la densidad y el flujo volumétrico (caudal).

1.3.3 Rendimiento térmico.

Existen varios parámetros y variables que son utilizados para la obtención del rendimiento térmico de un sistema de captación solar, los cuales son: radiación incidente sobre la cubierta de vidrio, temperatura ambiente, temperatura de entrada y flujo másico del aire, por lo tanto, se requiere la medición de manera experimental de la radiación incidente y las temperaturas mencionadas, por cálculo se debe determinar el flujo másico y la cantidad de calor que se genera bajo las condiciones de estado estacionario o cuasi estacionario [10].

Adicional, es necesario realizar ensayos para determinar las características del tiempo de respuesta de un sistema de captación, así como también, el rendimiento en estado estacionario tiende a variar notablemente según los diferentes ángulos que se forman de acuerdo a la radiación solar que incide con respecto al área de apertura del colector solar, utilizando esta metodología se puede obtener una curva de rendimiento bien definida con un mínimo de dispersión de datos [21].

Es importante verificar los siguientes parámetros para definir el rendimiento térmico de un colector solar:

- Fugas de aire por medio de la deformación o roturas de las paredes del colector solar
- Deformación o rotura de la cubierta de vidrio del colector solar
- Deformación o rotura en los puntos de unión de cada uno de los elementos del colector solar.
- Cualquier otra situación anormal que produzca una disminución en el rendimiento del colector o su vida útil.

Para el rendimiento térmico de los colectores solares es necesario determinar la relación que existe entre la cantidad de energía térmica que se genera en el interior

del colector solar en una unidad de tiempo y la radiación que incide sobre toda la placa colectora (Irradiancia) por el área de captación de la cubierta.

1.4 Descripción del objeto de estudio.

A continuación, se describe al objeto de estudio, el principio de funcionamiento, sus componentes de diseño y características técnicas.

1.4.1 Colector solar de placa plana.

El colector solar es un dispositivo de captación solar que transforma la radiación proveniente del sol en energía térmica, generalmente son utilizados como secadores de granos porque aprovechan todo el calor que generan en su interior para el calentamiento del aire operando en una convección natural [23].

Los colectores solares utilizan mayormente vidrio en su cubierta, la temperatura de funcionamiento aproximadamente varía entre 30 ° C y 60 ° C; consiste en una caja aislada cubierta por un vidrio que cumple la función de bloquear la radiación infrarroja y aislar el espacio de aire por encima del absorbente para mantener el calor [17].

La figura 2 muestra un diagrama de un colector de placa plana para el calentamiento de aire, siendo los parámetros principales que intervienen en el proceso de intercambio de calor los siguientes: radiación solar incidente (I_{rr}), flujo másico del aire (\dot{m}), temperatura ambiente (T_a), temperatura de entrada al colector (T_e), temperatura de salida (T_s) y velocidad del aire (v).

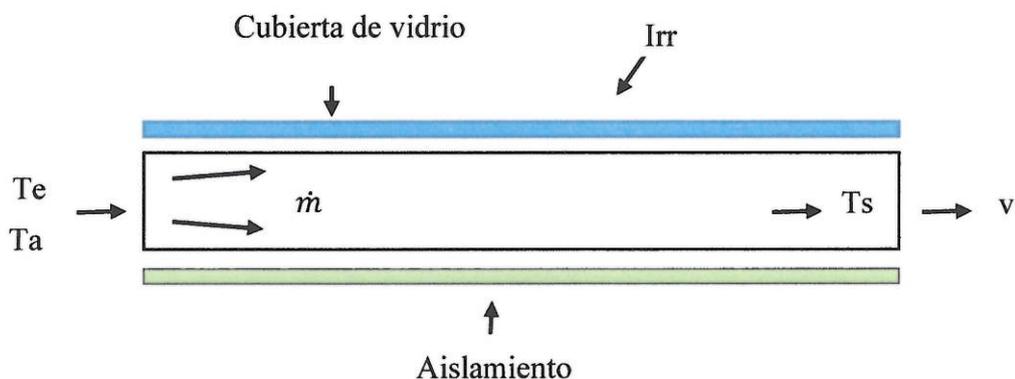


Fig. 2. Diagrama de un colector solar.

1.4.2 Principio de funcionamiento.

El colector solar de placa plana da inicio cuando la radiación térmica incide sobre la placa o cubierta transparente del colector, una parte de esta radiación se refleja en varias direcciones hasta perderse en el ambiente, otra parte de la radiación es absorbida por la cubierta esta cantidad va a depender del tipo de material que se utilice para la cubierta y finalmente el resto de la radiación se transmite al interior del colector solar incidiendo sobre la superficie conocida como placa de absorción provocando un elevado valor de la temperatura. La placa de absorción transmite una de longitud de onda en forma de radiación que es reflejada en su mayoría por la cubierta transparente y nuevamente absorbida por la placa de absorción con la finalidad de reducir las pérdidas por energía térmica hacia el ambiente [8].

Por otra parte, si existe la presencia de un flujo de aire en el interior del colector solar, este se calienta mediante el proceso de transferencia de calor por convección, el flujo de salida de aire caliente puede ser utilizado para diversas aplicaciones específicamente en el secado de granos. El cumplimiento de todo el proceso también va a depender de la correcta selección de los materiales, por ejemplo, el tipo de material para la cubierta debe tener características como: alta transmisividad a la radiación de longitudes de onda corta, baja transmisividad a la radiación de longitudes de onda larga y baja conductividad térmica para menorar las pérdidas de calor por conducción. La placa de absorción se debe considerar materiales con alta absorptividad en un amplio rango de longitud de onda para absorber toda la cantidad de energía solar y de la energía radiante de longitud de onda larga que es emitida por ella misma y reflejada por la cubierta transparente [8].

1.4.3 Partes.

Un colector solar de placa plana está constituido por los siguientes elementos: cubierta transparente, aislante térmico, placa absorbidora y carcasa.

1.4.3.1 Cubierta transparente.

La cubierta de un colector solar permite que la radiación incidente ingrese al colector y disminuya notablemente las pérdidas de energía infrarroja a través de la

radiación, por lo tanto es recomendable utilizar acristalamiento transparente permitiendo transferir la mayor cantidad de energía en forma de calor hacia la placa absorbedora, otra ventaja del uso de cristales transparentes es que reduce las pérdidas por transferencia de calor por convección desde el interior del colector hacia el medio ambiente. Los materiales de acristalamiento que generalmente son utilizados son: vidrio, plásticos, acrílicos, fibra de vidrio, entre otros, colocando al vidrio transparente como material más utilizado [16].

1.4.3.2 Aislamiento.

El funcionamiento del aislante es guardar, ahorrar y concentrar toda la cantidad posible de energía térmica con la finalidad de evitar pérdidas de calor por cualquier parte del colector, dependiendo del tipo de material que se utilice, el rendimiento del colector tenderá ligeramente a variar, este material tiene que tener la capacidad de soportar elevadas temperaturas sin deteriorarse [14].

Los materiales aislantes convencionales se clasifican en materiales fibrosos, celulares, granulares y reflectantes, estos pueden ser: vidrio, fibra, silicato de alúmina, poliuretano, poliestireno y silicato de calcio, entre los cuales la lana de vidrio es mayormente utilizada en la elaboración de los colectores solares de aire. La naturaleza del material, así como sus características esenciales, determinan el valor de su uso, haciendo de estos materiales que sean más o menos favorables en la conductividad térmica y su confortabilidad [24].

1.4.3.3 Carcaza.

La carcaza cumple la función de proteger y resistir a los otros elementos que constituyen el colector solar de placa plana, generalmente es fabricado mediante un tol galvanizado con espesor de 0,9 mm, de tal manera que tenga dureza y robustez en la carcasa del colector [25].

1.4.3.4 Placa absorbente.

La función principal de la placa absorbedora es captar la mayor parte de la radiación solar incidente en el interior del colector para transformarla en calor y cederlo al flujo de aire, generalmente el tipo de material utilizado es el aluminio y siempre se

lo oscurece con una capa de pintura negra calórica, que resista elevadas temperaturas de trabajo aproximadamente los 100°C [26].

CAPITULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Introducción y objetivo.

Una vez definida la fundamentación teórica en el Capítulo I, es necesario detallar la metodología de cálculo, los equipos utilizados y las condiciones experimentales en las que se desarrolla la medición de variables de entrada, salida y aleatorias.

En este capítulo se establece las condiciones experimentales, materiales y método para cumplir con el objetivo de medir las variables ambientales aleatorias y de entrada que inciden en el calentamiento de aire de un colector solar de placa plana.

2.2 Estación experimental.

2.2.1 Ubicación geográfica.

Los colectores solares en estudio están localizados en la Provincia de Cotopaxi, ciudad de Latacunga, de manera específica en el campus Matriz de la Universidad Técnica de Cotopaxi en la terraza del Bloque Administrativo.

TABLA II
UBICACIÓN GEOGRÁFICA

Latitud	- 0,9175
Longitud	- 78,6328
Huso Horario	GMT-05:00

En la figura 3 se presenta la ubicación geográfica de manera referencial, utilizando la App Sun Locator Lite:



Fig. 3. Ubicación geográfica de la estación experimental.

2.2.2 Colectores solares.

La estación experimental del proyecto de investigación denominado “Análisis de eficiencia en el proceso de secado solar de cacao mediante diferentes formas geométricas en el sistema de captación”, cuenta con 6 colectores solares de placa plana como se muestra en la figura 4, a efectos de presentación los módulos han sido numerados desde M_1 a M_6 , este estudio comparativo se lo desarrolla en los módulos M_5 y M_6 de la estación experimental.



Fig. 4. Estación experimental

Cada colector solar de placa plana esta provisto con equipos y accesorios, las características se describen en la tabla 3.

TABLA III
EQUIPOS Y ACCESORIOS DEL COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA

Equipo/ accesorio	Función	Características y/o elementos más importantes		Imagen
Soplador	Utilizado para desplazar el flujo de aire	Flujo máximo	3,5 m ³ /h	
		Potencia	600 W	
		Consumo de operación	0,47946 kW/h	
		Velocidad angular máxima	16000 RPM	
Módulo de adquisición de datos de temperatura y control de flujo	Adquiere datos de 8 sensores de temperatura y controla el flujo de aire.	Termocupla	Tipo K	
		Termistor	NTC 3950	
		Medidor de flujo	MAF	
		Microcontrolador	Arduino Atmega 2560	
		Reloj temporizador	Placa de memoria Beats DS 1307	
Estructura de soporte	Permite regular el ángulo de inclinación deseado y sirve de soporte al colector.	Material	Ángulo de y Tubo de	
		Largo	1 m	
		Ancho	0,50 m	
		Altura	1 m regulable	

Las principales especificaciones constructivas del colector solar de placa plana se describen en la tabla 4.

TABLA IV
ESPECIFICACIONES CONSTRUCTIVAS DEL COLECTOR

Parte del colector	Característica general
Cubierta	Vidrio convencional de espesor de 4 mm, para cada colector oscuro y claro respectivamente, con dimensiones de 46 x 95 cm.
Aislamiento térmico	Poliuretano, espesor de de 3 cm.
Placa absorbedor	Placa de aluminio con espesor de 1,1 mm. Acabado superficial con pintura electrostática color negro.
Carcaza	Lámina de tol galvanizado.

2.2.3 Estación meteorológica.

Para la adquisición de datos de variables ambientales tales como radiación solar incidente y temperatura ambiental se utilizó la estación meteorológica “Ambient Weather WS-2000 Wi-Fi OSPREY”, la instalación se realiza tomando en cuenta recomendaciones del fabricante, sensor a una distancia horizontal de 2 veces la altura del objeto más cercano” y la altura sobre el suelo entre 1,25 m a 2 m.



Fig. 5. Estación meteorológica WS-2000

2.2.4 Equipos auxiliares para validación de datos.

Para asegurar la fiabilidad de datos medidos tanto del módulo de adquisición de datos de temperatura y control de flujo, así como de la estación meteorológica se utilizaron los siguientes equipos cuyas imágenes de referencia se muestra en la tabla 5:

- Solar Power Meter SM 206-SOLAR (Referencia 1)
- Medidor ambiental Kestrel 5500 (Referencia 2)
- Anemómetro HoldPeak HP-866B (Referencia 3)
- Cámara Termográfica SATIR PK-80 (Referencia 4)
- Pirómetro FLUKE (Ref. 5)
- Brújula

TABLA V
EQUIPOS AUXILIARES PARA VALIDACIÓN DE DATOS

Referencia 1	Referencia 2	Referencia 3
		
Referencia 4	Referencia 5	Referencia 6
		

2.2.5 Posición de los colectores.

Los colectores se han ubicado con inclinación hacia el norte, teóricamente su inclinación está dada por la ecuación 1:

$$\alpha = \delta - \varphi \quad (1)$$

Donde:

α : Inclinación diaria del colector

δ : Latitud

φ : Ángulo de declinación diaria del sol

2.2.6 Ubicación de los sensores.

Los sensores de temperatura y flujo están ubicados como se muestra en la tabla 6:

TABLA VI
UBICACIÓN DE LOS SENSORES

Sensor	Ubicación	Imagen
Termocupla, Tipo K	A (Entrada)	<p>El diagrama muestra un colector solar plano rectangular con una cubierta inclinada. Seis flechas naranjas apuntan a diferentes puntos de medición etiquetados como A, B1, B, B2, C, C2, D1, D, D2 y E. El punto A está en la entrada superior izquierda. Los puntos B1, B, B2, C, C2, D1, D, D2 están distribuidos sobre la superficie del colector. El punto E está en la salida inferior derecha.</p>
	B, C, y D	
Termistor, NTC 3950	Cubierta: B1 y D1	
	Placa Absorbente: B2 y D2	
	Salida C2	
Medidor de flujo MAF	E (Salida)	

Para una mejor comprensión de la ubicación de los sensores se utiliza la nomenclatura con letras mayúsculas como se muestra en la tabla 7:

TABLA VII
NOMENCLATURA DE SENSORES

Sensor	Punto de medición	Nomenclatura
A	Temperatura ambiente = Temperatura de entrada	T AMB
B ₁ , D ₁	Temperatura de la cubierta de vidrio	T VID
B, C, D	Temperatura del aire en el interior del colector	T INT
B ₂ , D ₂	Temperatura de la placa colectora de aluminio	T PLACA
C ₂	Temperatura de salida	T SALIDA
E	Valores de flujo - Medidor de flujo MAP	FLUJO

A la nomenclatura citada se le acompaña de “OSC” cuando se trate del vidrio oscuro y “CLA” al referirse al vidrio claro.

2.3 Metodología.

Una vez identificado los fundamentos teóricos el procedimiento empleado para establecer el rendimiento térmico de un colector solar de placa plana variando el tipo de vidrio en la cubierta se estructura de la siguiente manera:

1. Selección y descripción de las variables ambientales que inciden en el calentamiento de aire.
2. Definición de curvas características de los colectores M_5 y M_6 en igualdad de condiciones, es decir, los dos colectores con vidrio convencional claro para definir la variación de temperatura por efectos de construcción.
3. Desarrollo del diseño experimental que permite la comparación de curvas con datos obtenidos utilizando vidrio convencional oscuro y claro con cuatro parámetros definidos (sin aire forzado y con aire forzado a 6,2 m/s, 9,5 m/s y 11,5 m/s)
4. Análisis comparativo de la variación del rendimiento entre cubierta de vidrio convencional oscuro y claro, con y sin aire forzado.

2.3.1 Selección de variables y descripción.

Las variables que inciden en el calentamiento de aire de manera aleatoria son la radiación solar incidente (RSI), temperatura ambiente, velocidad del viento y contenido de humedad, en el presente estudio se asume las dos primeras para la comparación y las otras se consideran despreciables por las condiciones geográficas en el lugar de experimentación, en el caso de la variable de entrada en el análisis se considera el flujo másico de aire y como variable de salida la temperatura resultante del proceso de intercambio térmico que se produce en el proceso, con lo cual se establece el rendimiento térmico del colector, se contextualiza lo señalado en la figura 6.



Fig. 6. Determinación de variables

De acuerdo con lo expuesto, el rendimiento del colector depende de los siguientes variables o factores:

- Temperatura de entrada del aire ($^{\circ}\text{C}$)
- Temperatura de salida del aire ($^{\circ}\text{C}$)
- Flujo másico del aire (kg/s)
- Radiación solar incidente (W/m^2)

La relación matemática de las variables señaladas con el rendimiento de los colectores se establece en las ecuaciones insertas en la metodología.

2.3.2 Curvas comparativas de dos colectores en igualdad de condiciones.

Tomando en cuenta los valores de temperatura, se realiza una comparación entre los colectores usando en los dos casos vidrio convencional claro, para este análisis se toma en cuenta los puntos D_1 , D y D_2 de los colectores solares M_5 y M_6 descritos en el numeral 2.2.6 Ubicación de los sensores del presente capítulo.

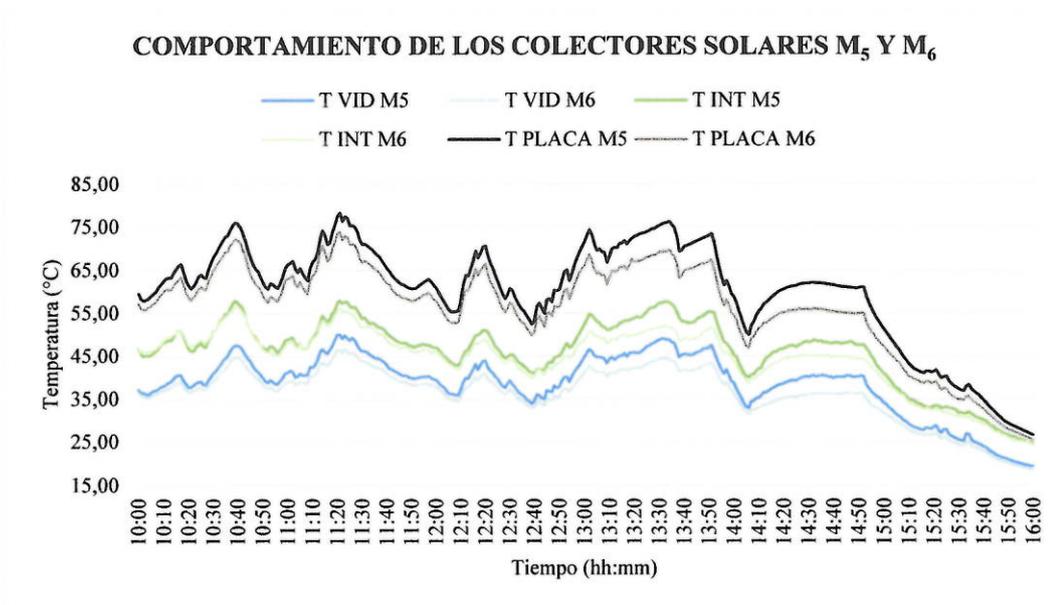


Fig. 7. Comportamiento de los colectores solares M_4 y M_6

2.3.3 Comparación de curvas con datos obtenidos utilizando vidrio convencional oscuro y claro.

2.3.3.2 Número de experimentos.

Se establece el número de experimentos prefijado para cuatro condiciones, el primer experimento permitió hacer un análisis comparativo de comportamiento del proceso de intercambio térmico sin aire forzado entre los módulos M₅ y M₆, con vidrios convencionales oscuro y claro; en el caso de los experimentos número 2, 3 y 4 permitió realizar la comparación del comportamiento de los colectores solares con tres condiciones de flujo de aire como se describe en la tabla 8.

TABLA VIII
NÚMERO DE EXPERIMENTOS

Nº	FLUJO DE AIRE m/s	COLECTOR VIDRIO CLARO	COLECTOR VIDRIO OSCURO	NÚMERO DE EXPERIMENTOS
1	Sin aire forzado	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Temperatura de entrada del aire ▪ Radiación solar incidente ▪ Temperatura de salida el aire 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Temperatura de entrada del aire ▪ Radiación solar incidente ▪ Temperatura de salida el aire 	1 experimentos Medición durante 6 horas, cada minuto
2	6,2 m/s	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Temperatura de entrada del aire ▪ Radiación solar incidente ▪ Temperatura de salida el aire 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Temperatura de entrada del aire ▪ Radiación solar incidente ▪ Temperatura de salida el aire 	1 experimentos Medición durante 6 horas, cada minuto
3	9,5 m/s	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Temperatura de entrada del aire ▪ Radiación solar incidente ▪ Temperatura de salida el aire 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Temperatura de entrada del aire ▪ Radiación solar incidente ▪ Temperatura de salida el aire 	1 experimentos Medición durante 6 horas, cada minuto
4	11,5 m/s	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Temperatura de entrada del aire ▪ Radiación solar incidente ▪ Temperatura de salida el aire 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Temperatura de entrada del aire ▪ Radiación solar incidente ▪ Temperatura de salida el aire 	1 experimentos Medición durante 6 horas, cada minuto
Total de experimentos:				4

2.3.3.2 Técnica experimental.

La recolección de datos se realiza cada minuto durante 6 horas del día. Se inician las mediciones desde las 10H00 hasta las 16H00. Se considera este horario por ser el más óptimo para evitar sombras de las paredes del colector sobre la placa absorbadora de aluminio.

2.3.4 Rendimiento térmico y análisis comparativo.

2.3.4.1 Flujo másico.

Durante la experimentación se consideraron 4 velocidades de flujo de aire, a partir de este valor medido se obtuvo el flujo másico mediante la ecuación 2.

$$\dot{m} = v \cdot A \cdot \rho \quad (2)$$

Donde:

\dot{m} : Flujo másico (kg/s)

v : Velocidad (m/s)

A : Área (m²)

ρ : Densidad de flujo de aire (kg/m³)

La velocidad de flujo es medida en la salida del colector solar, en un área de sección transversal de forma circular, por lo que se utilizó la ecuación 3, para la salida del flujo de aire se utilizó un tubo de 3 pulgadas.

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (3)$$

Donde:

A : Área (m²)

π : Valor constante (3.14)

D : Diámetro (m)

Para obtener el valor de la densidad, se recurre a tablas de valores del libro de la literatura. Para el uso adecuado de los valores fijados se necesita determinar el valor de temperatura media con la ecuación 4.

$$T_{media} = \frac{T_{ambiente} + T_{salida}}{2} \quad (4)$$

Donde:

T_{media} : Promedio de los valores de temperatura (°C)

$T_{ambiente}$: Valor de temperatura de entrada (°C)

T_{salida} : Valor de temperatura de salida (°C)

2.3.4.2 Calor Útil.

Es la cantidad de energía en forma de calor generada por el colector solar de placa plana, se determina con la ecuación 5.

$$Q_{util} = \dot{m} \cdot C_{p\ fluido} \cdot (T_{salida} - T_{ambiente}) \quad (5)$$

Donde:

Q_{util} : Calor útil (W)

\dot{m} : Flujo másico (kg/s)

$C_{p\ fluido}$: Calor específico del aire (J/kg·°C)

$T_{ambiente}$: Temperatura de entrada del aire (°C)

T_{salida} : Temperatura de salida del aire (°C)

Para obtener el valor de calor específico del aire, se recurre a la tabla de valores de la literatura, ver anexo 1, para tener el valor aproximado se utiliza interpolación lineal según ecuación 6.

$$y = Y_0 + \frac{Y_1 - Y_0}{X_1 - X_0} \cdot (X - X_0) \quad (6)$$

2.3.4.3 Incremento del rendimiento térmico considerando calor útil y temperatura de salida.

Para determinar el incremento del rendimiento térmico comparativo entre los colectores solares de placa plana con vidrio convencional y oscuro se utilizó la ecuación 7.

$$\Delta\eta = \frac{Q_{uc} - Q_{uo}}{Q_{uc}} \cdot 100\% \quad (7)$$

Donde:

$\Delta\eta$: Incremento del rendimiento térmico comparativo entre colectores (%)

Q_{uc} : Calor útil del colector con vidrio claro (W)

Q_{uo} : Calor útil del colector con vidrio oscuro (W)

Con las ecuaciones descritas se realiza el análisis comparativo del rendimiento entre los colectores solares pero se ha de considerar la incidencia que tiene la variabilidad de la radiación solar y el comportamiento del proceso de transferencia de calor en un flujo de aire en función del tiempo, para el presente caso de estudio se opta por realizar comparaciones entre colectores solares en relación al calor útil, como aporte a la comparación de manera general también se establece la variación de temperatura en la salida con la ecuación 8 para cada colector:

$$\Delta T = \frac{T_{salida} - T_{entrada}}{T_{salida}} \quad (8)$$

Para la variación de temperatura entre un colector y otro en los diferentes puntos de medición se utiliza la ecuación 9.

$$\Delta T_{M_6, y M_5} = T_{M_6} - T_{M_5} \quad (9)$$

Para los casos de experimentación se consideró las siguientes casuísticas de estudio:

- En igualdad de condiciones con vidrio claro
- Sin aire forzado con vidrio convencional oscuro y claro.
- Con aire forzado a 6,2 m/s con vidrio convencional oscuro y claro
- Con aire forzado a 9,5 m/s con vidrio convencional oscuro y claro
- Con aire forzado a 11,5 m/s con vidrio convencional oscuro y claro

2.3 Conclusiones del Capítulo II.

Se expresa de manera detallada las condiciones experimentales, los equipos y el procedimiento empleado para la comparación de las curvas obtenidas a partir de mediciones de un colector solar de placa plana variando el tipo de vidrio en la cubierta entre vidrio convencional oscuro y claro.

Este capítulo permitió expresar las ecuaciones matemáticas fundamentales para el cálculo de rendimiento térmico del proceso de intercambio de calor en los colectores solares de placa plana en condiciones experimentales permitiendo determinar la incidencia de las variables en el calentamiento del aire.

CAPITULO III

ANÁLISIS DE RESULTADOS

2.1 Introducción y objetivo.

Los Capítulos I y II han permitido identificar los fundamentos teóricos referentes a los colectores solares y las variables a considerar para el calentamiento de aire respectivamente. En base a la aplicación de la metodología descrita en el Capítulo II y los valores obtenidos, el objetivo que persigue este capítulo es comparar las curvas de comportamiento del colector solar de placa plana y el rendimiento alcanzado utilizando vidrio convencional oscuro y claro.

3.2 Análisis de resultados.

Los resultados que se detallan se desarrollaron en la estación experimental del proyecto de investigación denominado “Análisis de eficiencia en el proceso de secado solar de cacao mediante diferentes formas geométricas en el sistema de captación”, se utilizó los módulos M₅ y M₆, la ubicación de estos fue con orientación hacia el norte y un ángulo de inclinación por mantenimiento de 10 ° obtenido a partir de la ecuación 1.

Según se describe en el Capítulo II las variables que se consideraron fueron la temperatura de aire a la entrada y salida, la radiación solar incidente y el flujo másico de aire a diferente velocidad el proceso de intercambio térmico, considérese que la temperatura de entrada corresponde a la temperatura ambiental por ser un sistema abierto.

3.2.1 Variación de temperatura en igualdad de condiciones.

De la figura 7 de las curvas comparativas de los dos colectores en igualdad de condiciones inserta en el apartado 2.3.2, es decir con vidrio claro para los módulos M₅ y M₆, sin flujo de aire forzado durante 6 horas y aplicando de la ecuación 8 se obtiene los siguientes resultados de la tabla 9.

TABLA IX
VARIACIÓN DE TEMPERATURA

PUNTO DE MEDICIÓN	DESCRIPCIÓN	PROMEDIO		VALOR ΔT (°C)
		M ₅ (°C)	M ₆ (°C)	
A	Temperatura de entrada = Temperatura ambiente	25,37	25,37	No Aplica
D ₁	Cubierta de vidrio	38,65	36,28	2,37
D	Aire	46,16	44,50	1,66
D ₂	Placa colectora	60,14	56,24	3,90
E	Temperatura de salida	32,37	30,84	1,53

Lo expuesto en la tabla 9 permite determinar que, aunque los dos colectores se han construido con los mismos materiales, existe una variación de temperatura entre módulos la cual deberá considerarse para el análisis final de las curvas de comparación de rendimiento térmico. Los resultados determinan que el módulo 5 tiene valores de temperatura superior según el ΔT en los tres puntos considerados.

La figura 7 muestra el comportamiento de los colectores M₅ y M₆, por defectos constructivos M₅ es ligeramente más caliente en todos los puntos comparados con respecto a M₆, es decir, es más caliente en la cubierta de vidrio, en el aire del interior del colector, en la placa colectora de aluminio y consecuentemente en la salida, como se demostró en la tabla 9 con el cálculo la variación de temperatura.

Con las condiciones señaladas el porcentaje de variación de temperatura entre M₅ y M₆, para una mejor visualización, los datos se presentan ordenados de manera ascendente, sin considerar el instante de tiempo en la medición para los cuatro

experimentos, esta consideración estará presente en los resultados presentados en los numerales 3.2.2 y 3.2.3 del presente capítulo.

3.2.2 Análisis comparativo de la variación del rendimiento térmico entre cubierta de vidrio convencional oscuro y claro, sin aire forzado.

Experimento N° 1: Para las pruebas experimentales el módulo M₅ se reemplazó el vidrio convencional claro a oscuro. En adelante para la presentación de resultados se denominará conforme nomenclatura de tabla 7. Con el propósito de tener una mejor apreciación de la variación de temperaturas se inserta nuevamente la figura 7 junto a la figura 8.

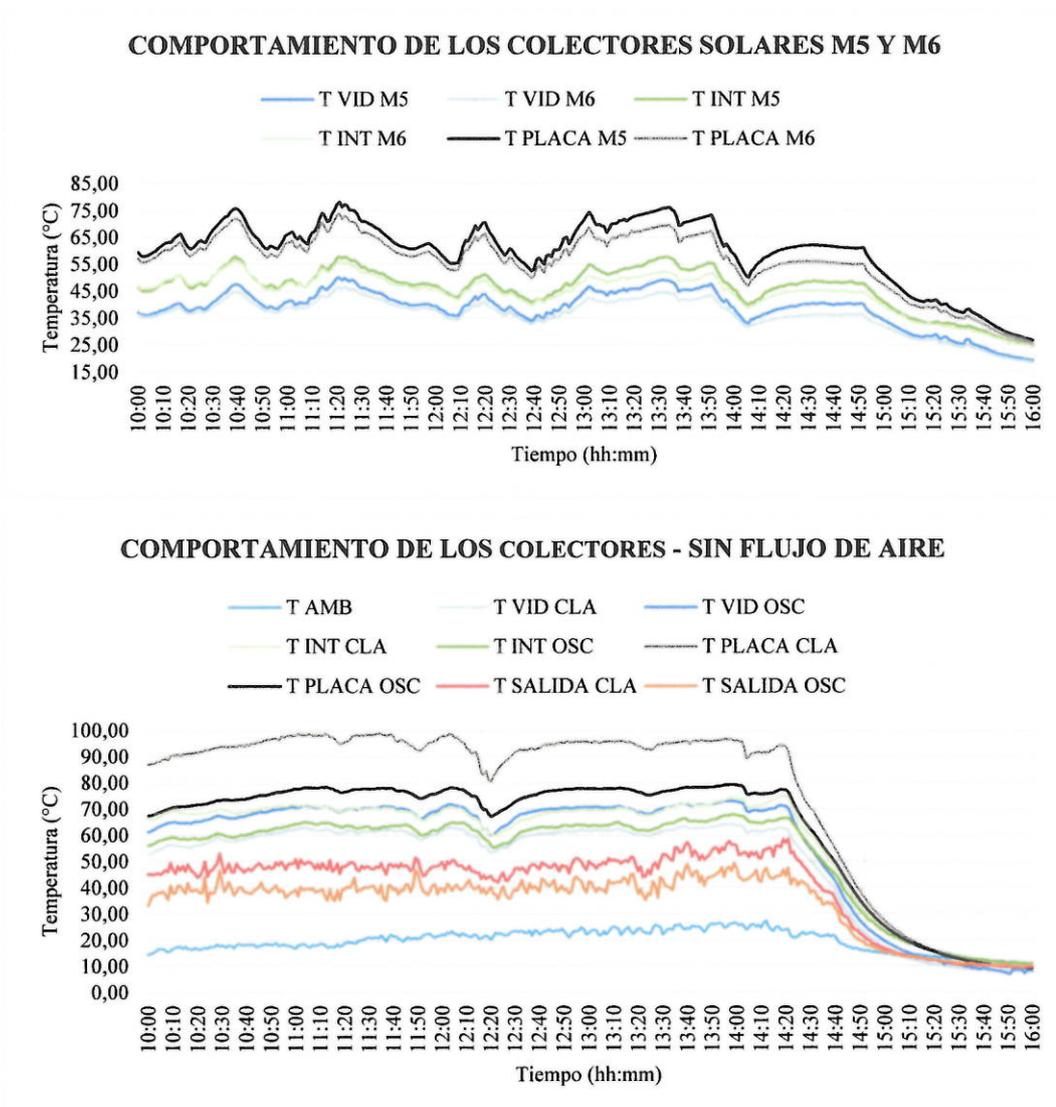


Fig. 8. Comportamiento de los colectores – sin flujo de aire

Con la representación de la figura 7 queda definido las curvas características de comportamiento de los colectores M₅ y M₆ en igualdad de condiciones, es decir, los dos colectores con vidrio convencional claro para definir la variación de temperatura por efectos de construcción; mientras que con la figura 8, se demuestra la variación de temperatura al variar el vidrio en la cubierta.

La comparación de las curvas de los sensores D₁, D, D₂ y C₂ de los colectores solares de placa plana con vidrio convencional oscuro y claro, presenta variaciones significativas, en el caso de la **cubierta** el vidrio que mayor temperatura presenta es el de vidrio oscuro (M₅) mientras que los valores de temperatura del **aire en el interior del colector** y de la **placa colectora** es superior en el módulo con vidrio claro (M₆). En el caso de la **temperatura en la salida** quien mayor valor tiene es el colector con vidrio claro. Los resultados en este experimento se presentan sin flujo de aire forzado.

Al mantener una temperatura superior en el vidrio oscuro, se comprueba que este presenta mayor cantidad de pérdidas por reflexión, así como también absorción de la radiación solar incidente, en consecuencia, el proceso de transferencia de calor interna es menor.

Al comparar las temperaturas entre M₅ y M₆ sin flujo de aire forzado se obtiene una variación de temperatura promedio de 8,26 °C, lo cual se muestra en la figura 9.

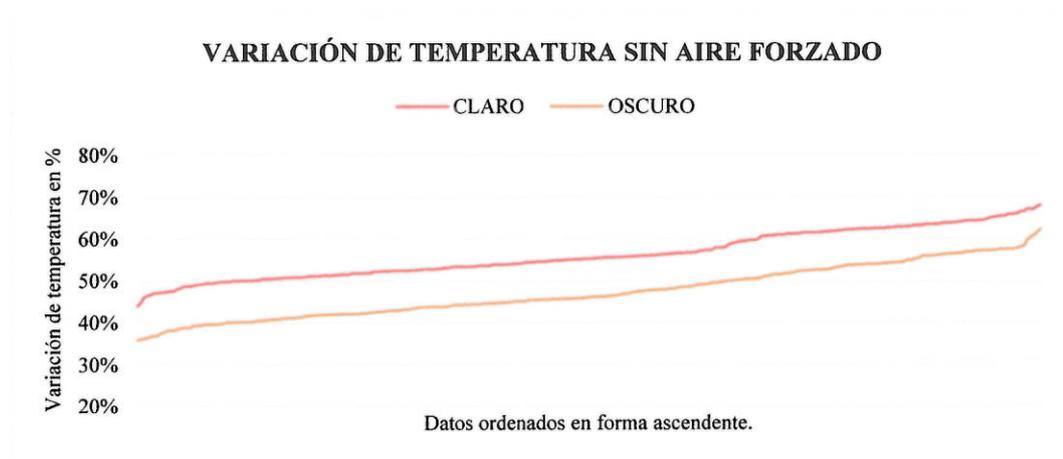


Fig. 9. Variación de temperatura sin aire forzado

3.2.2 Análisis comparativo de la variación del rendimiento térmico entre cubierta de vidrio convencional oscuro y claro, con aire forzado.

Partiendo de los valores de flujo propuestos para la experimentación con aire forzado a 6,2 m/s, 9,5 m/s y 11,5 m/s se encuentra los valores de flujo másico, se calcula el calor útil para cada experimento y se determina el incremento del rendimiento térmico comparativo entre los colectores solares de placa plana con vidrio convencional y oscuro. Para obtener los valores de densidad y calor específico del aire a presión constante se utilizó el método de la interpolación lineal.

3.2.2.1 Experimento N° 2.

El experimento 2 se realiza para un flujo de aire de 6,2 m/s y una sección transversal del colector de 0,00456 m², la curva de funcionamiento de los módulos M5 y M6 , específicamente con los valores de temperatura en la salida se muestra en la figura 10.

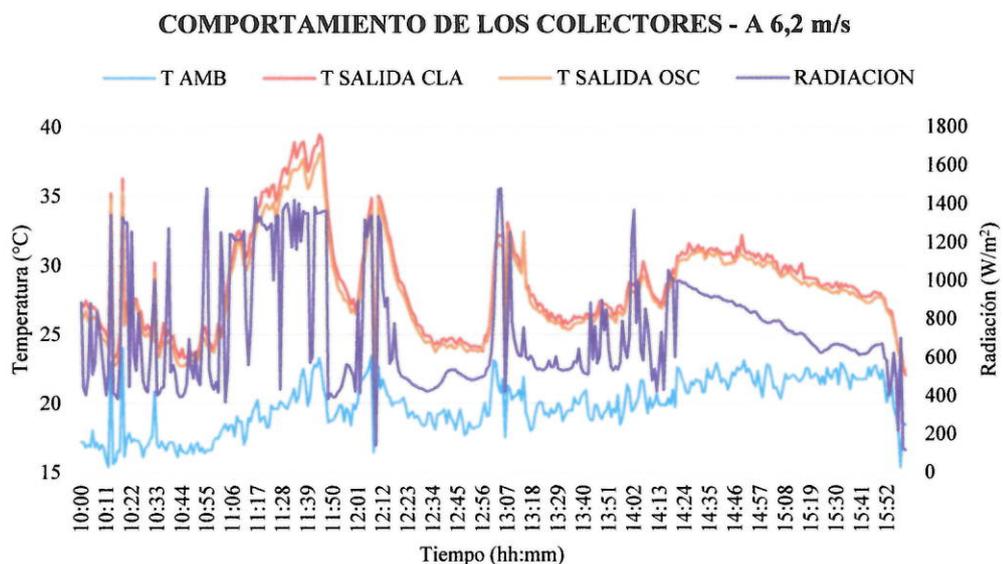


Fig. 10. Comportamiento de los colectores - a 6,2 m/s

Se realizó la comparación de los valores de temperatura media y se determinó la variación de temperatura entre los módulos M₅ y M₆ utilizando las ecuaciones 4 y 9, obteniéndose como resultado una variación promedio de 0,58 °C del módulo

claro con respecto al oscuro, de manera gráfica los resultados se muestran en la figura 11, estos valores se los grafica de manera ordenada ascendente. Este procedimiento tanto de cálculo, así como de la demostración gráfica se lo repite para los experimentos 3 y 4.

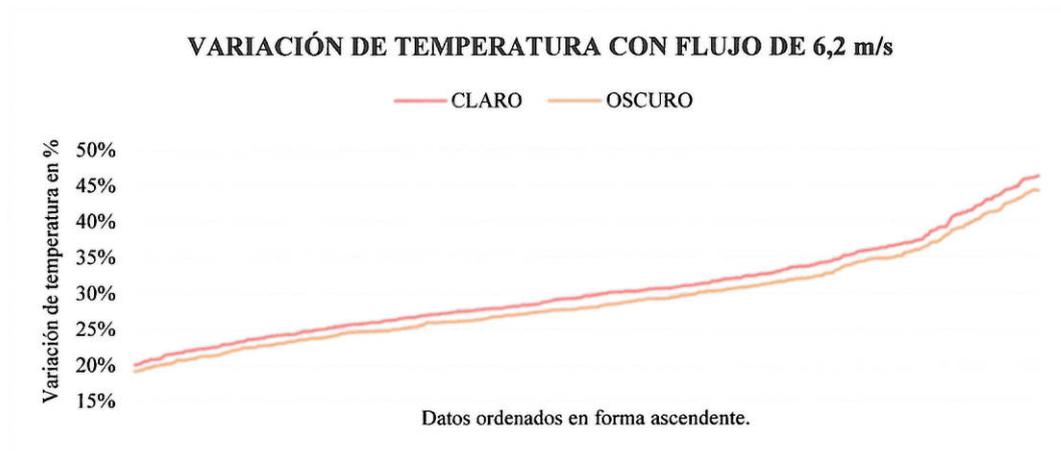


Fig. 11. Variación de temperatura con flujo de 6,2 m/s

Aplicando la ecuación 5 que corresponde a cálculo de calor útil para los módulos M_5 y M_6 se procedió a determinar la comparación de la variación del rendimiento térmico en base al calor útil de los colectores con cubierta de vidrio convencional oscuro y claro mediante la ecuación 7, los resultados se muestran en la figura 12.

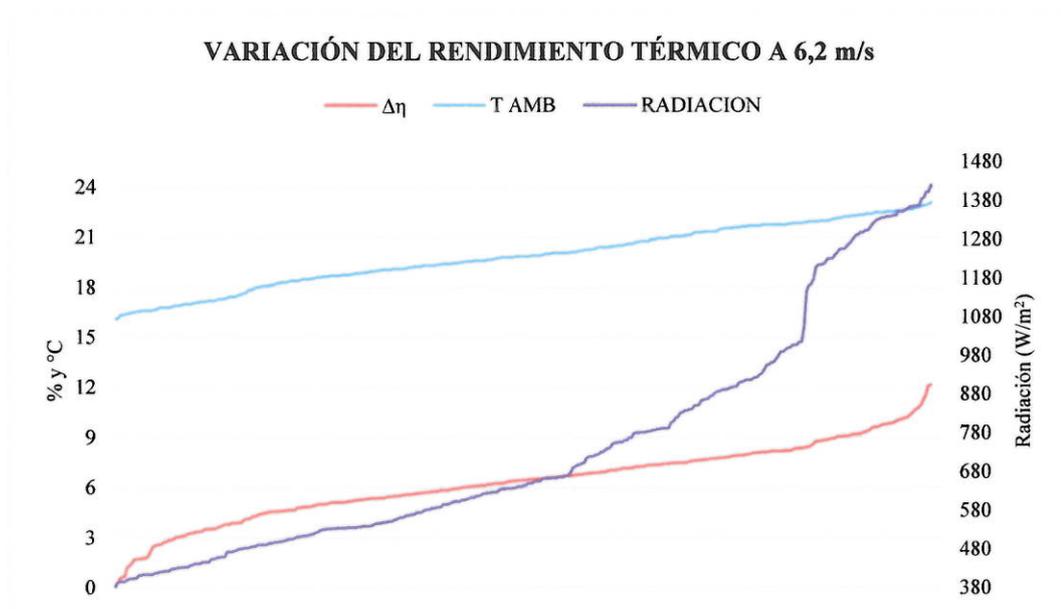


Fig. 12. Variación del rendimiento térmico a 6,2 m/s

De los datos obtenidos se colige que existe una producción de calor a un flujo de 6,2 m/s durante todo el tiempo de mediciones y rango de mediciones de radiación solar incidentes que en este día en particular van desde 383,5 a 1419,4 W/m², en el horario comprendido entre las 10H00 a 16H00; el colector con vidrio claro en la cubierta tiene un rendimiento térmico superior al oscuro, conforme las mediciones esto ocurriría durante todo el tiempo medido, si bien se tiene valores de radiación mínima de 383,5 W/m² es posible que esto ocurra con radiaciones inferiores.

3.2.2.2 Experimento N° 3.

El experimento 3 se realiza para un flujo de aire de 9,5 m/s y una sección transversal del colector de 0,00456 m², la curva de funcionamiento de los módulos M₅ y M₆, específicamente con los valores de temperatura en la salida del colector se muestra en la figura 13.

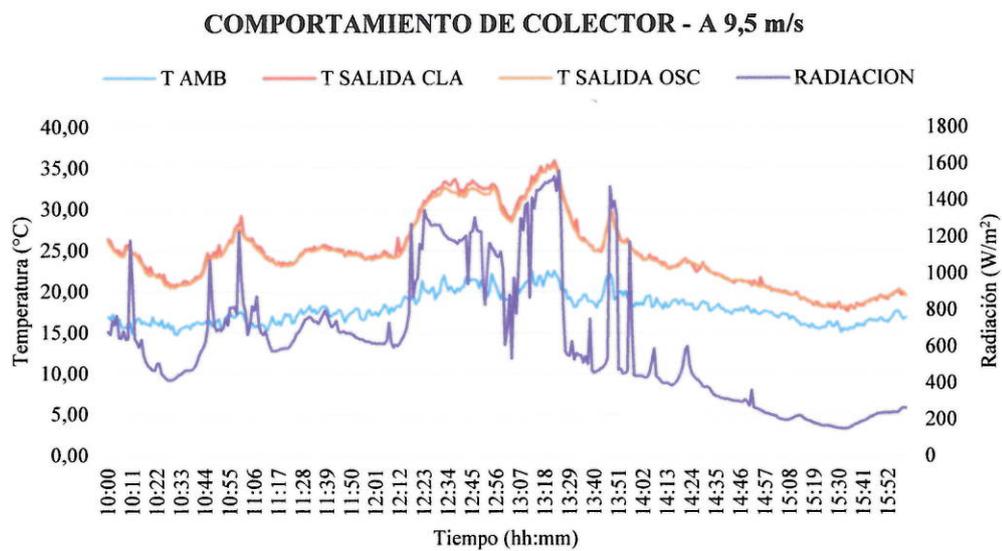


Fig. 13. Comportamiento de colector - a 9,5 m/s

Con los datos obtenidos se aprecia que la temperatura de salida del colector con vidrio claro sigue siendo superior frente al vidrio oscuro, de manera ordenada ascendente se presenta los datos en la figura 14.

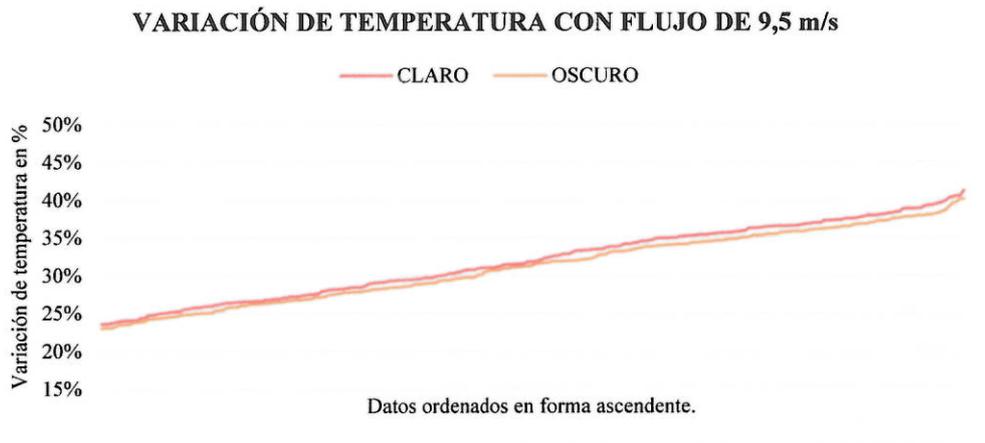


Fig. 14. Variación de temperatura con flujo de 9,5 m/s

El promedio de la variación de temperatura entre los colectores es de 0,28 °C.

En cuanto a la comparación de la variación del rendimiento térmico en base al calor útil de los colectores se expone los resultados en la figura 15.

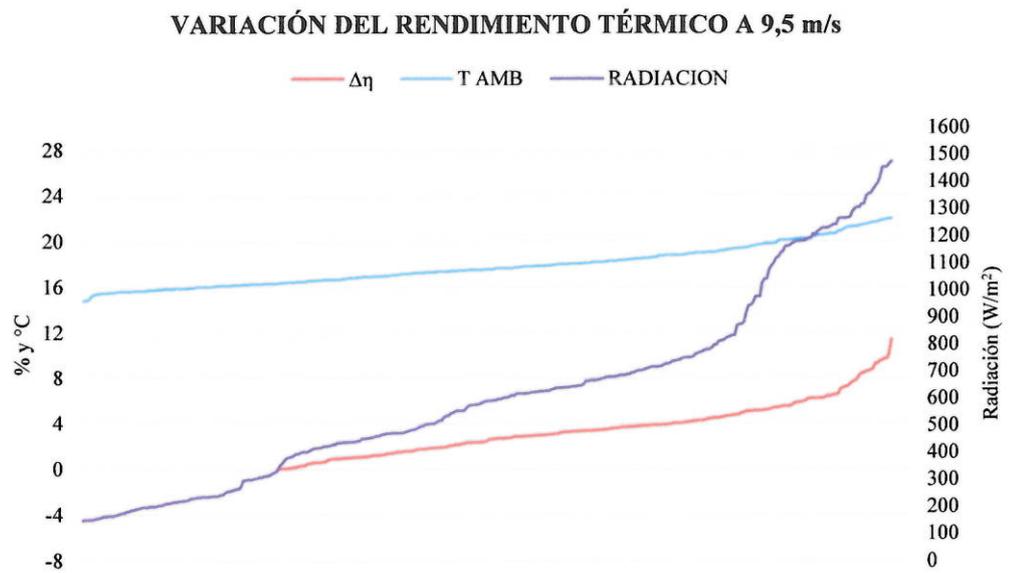


Fig. 15. Variación del rendimiento térmico a 9,5 m/s

Al incrementar el flujo de aire de 6,2 m/s considerado en el Experimento 1 a 9,5 m/s para el experimento 2 la curva de aprovechamiento de radiación solar varía significativamente, es posible definir el rendimiento a partir de radiaciones superiores a 333 W/m², las mediciones del día de experimentación se tiene valores

de radiación mínima de $148,2 \text{ W/m}^2$ y máxima de $1473,8 \text{ W/m}^2$, estas mediciones corresponden a 6 horas de manera ininterrumpida cada minuto.

3.2.2.1 Experimento N° 4.

El experimento 4 se realiza para un flujo de aire de $11,5 \text{ m/s}$ y una sección transversal del colector de $0,00456 \text{ m}^2$, la curva de funcionamiento de los módulos M_5 y M_6 , específicamente con los valores de temperatura en la salida del colector se muestra en la figura 16.

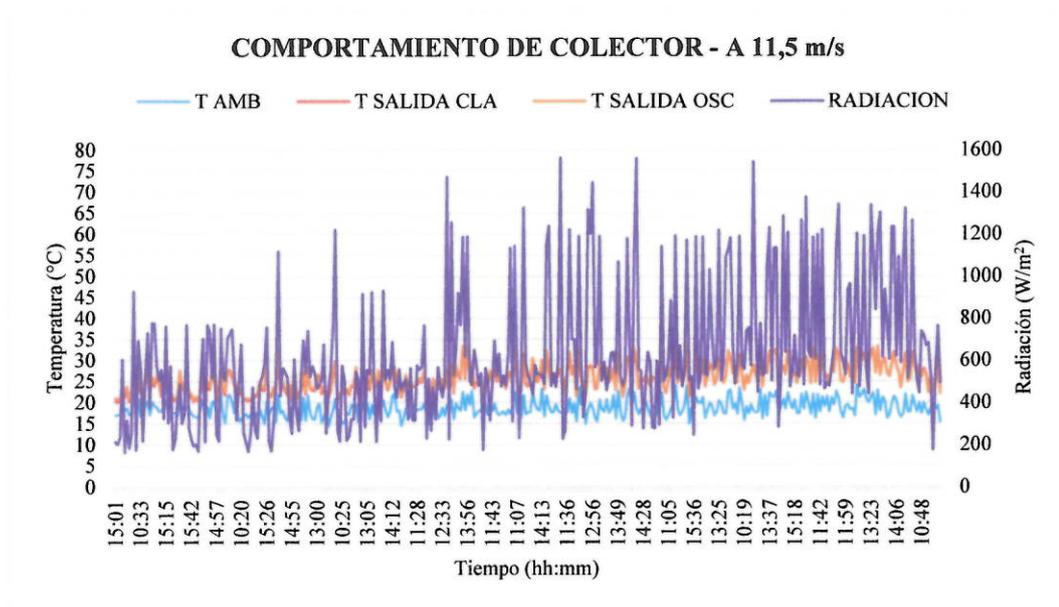


Fig. 16. Comportamiento del colector – $11,5 \text{ m/s}$

En este experimento se observa que la temperatura de salida del colector con vidrio claro vs. el oscuro existe una mínima diferencia, debido al flujo de $11,5 \text{ m/s}$ no se logra obtener un proceso de intercambio térmico que favorezca la producción de calor, al calcular la variación de temperatura se obtiene $0,15 \text{ °C}$ entre el panel claro con respecto al oscuro, la demostración grafica se demuestra en la figura 17.

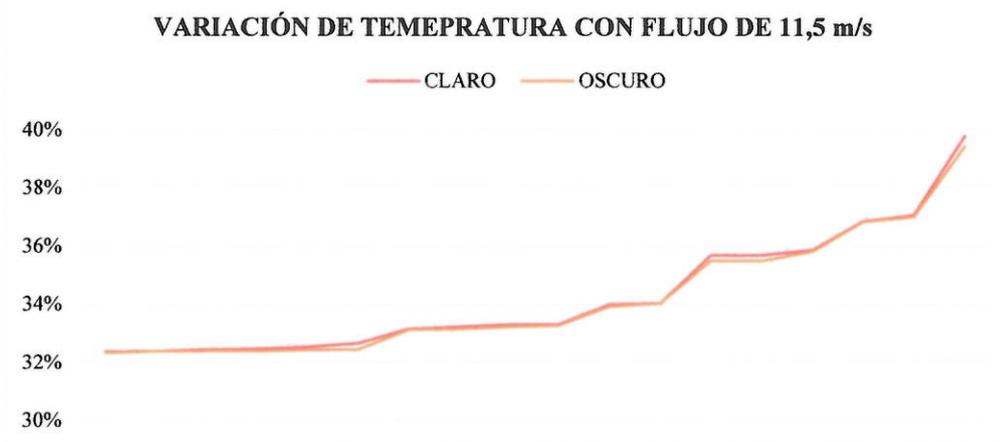


Fig. 17. Variación de temperatura con flujo de 11,5 m/s

En referencia a la comparación de la variación del rendimiento térmico en base al calor útil de los colectores se expone los resultados en la figura 15.

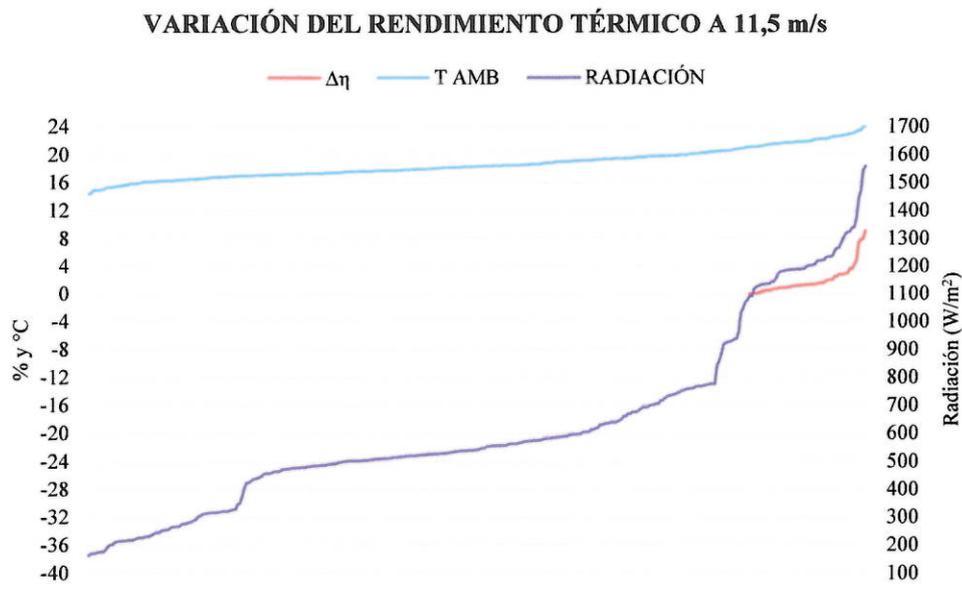


Fig. 18. Variación del rendimiento térmico a 11,5 m/s

Como se puede concluir a un flujo de 11,5 m/s y con la geometría de los colectores descrita, no es factible pretender el aprovechamiento de la energía solar térmica pues se alcanza un rendimiento a partir de una radiación solar relativamente alta

con valores superiores a $1090,1 \text{ W/m}^2$, durante este día se tuvieron mediciones de radiación solar desde $164,2 \text{ W/m}^2$ y una máxima de $1557,9 \text{ W/m}^2$.

3.3 Impacto ambiental

El estudio desarrollado contribuye a implementar mejores prácticas ambientales desde la investigación e innovación, esto en correspondencia con el plan nacional de desarrollo de nuestro país poniendo énfasis en los objetivos de desarrollo sostenible al procurar tener resultados que contribuya al aprovechamiento y generación de energía asequible y no contaminante como meta para el año 2030, este trabajo favorece a posibles alternativas para aumentar considerablemente la proporción de energía renovable de manera específica energía solar térmica en el conjunto de fuentes energéticas.

3.4 Conclusiones del Capítulo III

Este capítulo permitió presentar resultados robustos mediante gráficas y cálculo con las ecuaciones descritas en la metodología del Capítulo II, el análisis de resultados es producto de 5 condiciones de trabajo en igualdad de condiciones y 4 experimentos con diferentes valores de flujo. Los datos expuestos fueron tomados de manera ininterrumpida durante 6 horas al día con mediciones cada minuto con alrededor de mil ochocientas mediciones.

CONCLUSIONES GENERALES

- Las variables que inciden en el proceso de intercambio térmico para el calentamiento de aire en un colector solar de placa plana de manera fundamental son la radiación solar incidente y temperatura ambiental, de la comparación del comportamiento de los colectores sin aire forzado se obtiene mejor rendimiento al utilizar vidrio claro siendo la temperatura de salida mayor con un valor promedio de 8,26 °C con respecto al oscuro; al utilizar aire forzado la variación promedio de temperatura del colector con vidrio claro con respecto al oscuro es de 0,58 °C a 6,2 m/s con valores de radiación medidas desde 383,5 W/m² (puede haber valores inferiores) , 0,28 °C a 9,5 m/s con radiaciones a partir de 333,1 W/m² y 0,15 °C a 11,5 m/s con radiaciones a partir de 1090,1 W/m².
- Para analizar el comportamiento del rendimiento térmico, se consideró la variación de temperatura en la cubierta de vidrio, aire en el interior del colector y la placa colectora, del análisis realizado se observó que la cubierta que mayor temperatura presenta es el vidrio oscuro debido a la reflexión y absorción de la radiación, mientras que, los valores de temperatura del aire en el interior del colector y de la placa colectora es superior en el módulo con vidrio claro, producto de lo cual la temperatura a la salida es mayor.
- Para el análisis del rendimiento térmico de los colectores, se realizaron gráficas comparativas considerando el calor útil de los módulos con vidrio convencional oscuro y claro. Los resultados muestran un incremento de hasta 12,15 % para una velocidad del aire de 6,2 m/s. Con el aumento de la velocidad hasta 9,5 m/s el rendimiento disminuye hasta el 11,45% y en el caso de un flujo del 11,5 m/s el rendimiento es de 9,03 % esto se debe a la reducción del intercambio térmico por convección entre la placa absorbadora y el aire, validándose de esta manera la hipótesis planteada y demostrándose la incidencia que tiene el cambio de vidrio en la cubierta. Debe tomarse en cuenta que para los tres flujos los valores de radiación

mínimos observados son de 383,5 W/m², 333,1 W/m² y 1090,1 W/m² respectivamente, en el primer caso no se registra valores de radiación inferior en el día y hora de experimentación.

RECOMENDACIONES

- En el presente estudio se consideró como variables aleatorias a la radiación solar incidente y temperatura ambiente, sin embargo, es necesario considerar que también puede afectar otras variables como la concentración de humedad en el ambiente o la velocidad del viento, por lo que, se debería investigar como estas inciden en el proceso de intercambio térmico para el calentamiento de un flujo de aire en los colectores solares de placa plana.
- En este trabajo se consideró tres valores de flujo constantes para la comparación, pero debido al alcance no se estimó los valores óptimos de flujo másico máximo con los que se podría trabajar para tener un proceso eficiente de transferencia de calor, se podría investigar este aspecto.
- Debido a los resultados obtenidos para el caso de colectores solares de placa plano no se recomienda implementar vidrio oscuro en la cubierta debido a la disminución del rendimiento térmico.

ANEXO

TABLE A.4 Thermophysical Properties of Gases at Atmospheric Pressure^a

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^7$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
Air, $M = 28.97$ kg/kmol							
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	66.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728
1200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.728
1300	0.2679	1.189	496.0	185.1	82	257	0.719
1400	0.2488	1.207	530	213	91	303	0.703
1500	0.2322	1.230	557	240	100	350	0.685
1600	0.2177	1.248	584	268	106	390	0.688
1700	0.2049	1.267	611	298	113	435	0.685
1800	0.1935	1.286	637	329	120	482	0.683
1900	0.1833	1.307	663	362	128	534	0.677
2000	0.1741	1.337	689	396	137	589	0.672
2100	0.1658	1.372	715	431	147	646	0.667
2200	0.1582	1.417	740	468	160	714	0.655
2300	0.1513	1.478	766	506	175	783	0.647
2400	0.1448	1.558	792	547	196	869	0.630
2500	0.1389	1.665	818	589	222	960	0.613
3000	0.1135	2.726	955	841	486	1570	0.536

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Gabinete de Prensa de la Unión Europea, “Secretaría Nacional de Planificación,” Gob. del encuentro, vol. 0, no. 0, pp. 1–2, 2017.
- [2] Naciones Unidas, “Energía - Desarrollo Sostenible.” [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>.
- [3] J. H. Garnica, A. I. Lema, J. M. Morsetto, M. I. Pontin, and J. M. Lucchini, Evaluación de un sistema de calentamiento de aire apto para secado solar indirecto de perejil, vol. 4. 2017.
- [4] G. Espinoza, “Caracterización térmica y análisis de irreversibilidades en colectores solares de placas planas para calentamiento de aire,” pp. 1–132, 2019.
- [5] J. José -González Bayón and A.-K. Rubén -Borrajó Pérez, “Simulación numérica de un colector solar plano de aire operando en régimen de convección natural,” enero/abril, no. 1, pp. 63–72, 2017.
- [6] A. Zacarías and M. Venegas, “Modelado y simulación del calentamiento de aire en invernaderos utilizando colectores solares planos,” 2014.
- [7] R. Torres, “Internacional Creative Commons Atribución (CC BY) Diseño y construcción de un sistema híbrido de calentamiento de aire por combustión de biomasa y radiación solar, utilizando PCM como fuente de almacenamiento térmico, para secado de yuca.”
- [8] A. Lammardo, “Modelo matemático del comportamiento térmico de un colector solar de placas planas inclinadas para calentamiento de aire,” 2019.
- [9] T. Rony, L. Chambergo, R. Celia, S. Huamanyalli, and M. Z. Mamani, “Optimización de un colector solar térmico de aire para mejorar el confort térmico en viviendas alto andinas de la región Junín,” 2020.

- [10] N. Ari Flores Montijo Hermosillo, "Evaluación de la eficiencia térmica de un colector solar de tubos evacuados para aire de secado," 2018.
- [11] F. López and A. Hernández, "Nuevo calentador solar de aire con matriz porosa selectiva. desarrollo tecnológico y evaluación experimental," vol. 22, pp. 2–37, 2018.
- [12] B. Camayo, "Velocidad de secado en tres tipos de secadores solares del Aguaymanto (*Physalis Peruviana L.*)," 2018.
- [13] M. A. Caraballo, D. Tapia, and B. Solorzano, "Módulo de aprovechamiento solar para generación de aire caliente," 2021.
- [14] M. Xavier Remache Sasig, "Análisis comparativo del rendimiento térmico entre un colector solar de placa plana y la adhesión de aletas," 2021.
- [15] D. Arguello, "Colector solar termico, con aire de superficie plana para calefaccion y ventilacion de areas internas en viviendas y edificios," 2020.
- [16] I. Edison, "Análisis comparativo del rendimiento térmico de un colector solar de placa plana con la variación de altura en la superficie colectora," 2021.
- [17] F. Antonio Nieves, "Estudio experimental de la influencia de los parámetros geométricos y de operación sobre la temperatura de descarga y eficiencia térmica de un colector solar plano de una sola cubierta para calentamiento de aire," doi: 10.13140/RG.2.1.1326.5442.
- [18] J. J. Gonzáles, "Análisis paramétrico del desempeño térmico de colectores solares planos de aire de circulación natural," 2017.
- [19] P. Ramiro, "Diseño y construcción de un sistema híbrido de calentamiento por aire por combustión de biomasa y radiación solar" 2017.
- [20] A. Ávila, "Evaluación energética de un colector solar de placa plana de doble cubierta," 2017.
- [21] NTE INEN, "NTE INEN 2507 Rendimiento térmico de colectores solares.

requisitos y métodos de ensayo,” 2016.

- [22] A. L. Tigse, “Diseño de un sistema de control de flujo de aire en un colector solar.”
- [23] F. García, “Efecto de los factores ambientales en la eficiencia de arreglos de paneles solares fotovoltaicos,” 2018.
- [24] J. Alfredo and R. Encalada, “Evaluación de la eficiencia de un colector solar con tubos al vacío para el precalentamiento de agua para la cocción de alimentos”
- [25] INEN, “Sistemas de calentamiento de agua con energía solar para uso sanitario en el Ecuador,” 2009.
- [26] J. Pérez, “Comparación del rendimiento térmico en la refrigeración de placas solares fotovoltaicas con la de una placa solar térmica de aire,” 2017.