



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTROMECAÁNICA

PROYECTO DE DESARROLLO

Título:

**Análisis comparativo del rendimiento térmico entre colectores solares de
doble y simple flujo de movimiento del aire**

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

Autor:

Marco Patricio Ramos Ramos, Ing.

Tutor:

Mauro Darío Albarracín Álvarez, Mg.

LATACUNGA – ECUADOR

2023

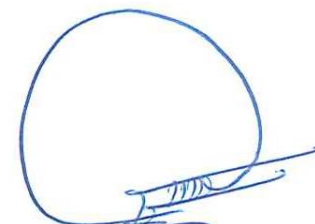
APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación denominado “Análisis comparativo del rendimiento térmico entre colectores solares de doble y simple flujo de movimiento del aire” presentado por Marco Patricio Ramos Ramos, 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, septiembre, 08, 2023



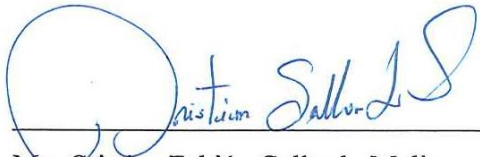
Mg. Mauro Darío Albarracín Álvarez

C.C.:05033113730

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL

El trabajo de Titulación: “Análisis comparativo del rendimiento térmico entre colectores solares de doble y simple flujo de movimiento del aire”, ha sido revisado, aprobado y autorizado para 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, septiembre, 08, 2023



Mg. Cristian Fabián Gallardo Molina

C.C.: 0502847692

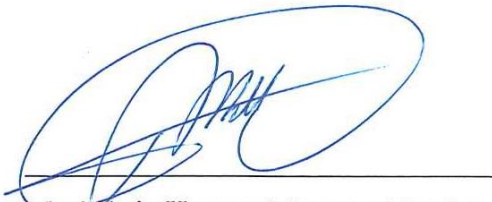
Presidente del tribunal



Mg. Cristian Xavier Espín Beltrán

C.C.: 0502269368

Lector 2



Mg. Edwin Homero Moreano Martínez

C.C.: 0502607500

Lector 3

DEDICATORIA

El presente proyecto de investigación va dedicado a Génesis, mi querida hermana, quien ha sabido ser para mí, la fortaleza más grande en mi vida, aun cuando el mundo parecía derrumbarse, siempre estuvo junto a mí, apoyándome incondicionalmente.

Al esfuerzo de Gloria, mi madre.

Y a mis hijos, Adrián y Mishell, mi inspiración, mi vida.

Marco.

AGRADECIMIENTO

A mi estimado amigo y colega Edison, un gran apoyo moral, ético y profesional, ejemplo de vida y perseverancia, quien ha sabido demostrar con altruistas acciones, su lealtad y apoyo incondicional. Para él, mi admiración y respeto.

A William, querido tío, quien siempre con buen humor y un gran corazón, creyó en mí en cada paso de mi desarrollo profesional.

A mi estimada amiga Jimena, cuya nobleza y empatía no tienen límites. Sin su apoyo, este proyecto no hubiese sido posible.

Gracias.

Marco Ramos.

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

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

Latacunga, septiembre, 08, 2023



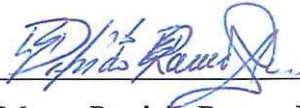
Ing. Marco Patricio Ramos Ramos

C.C.:2100302534

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, septiembre, 08, 2023



Ing. Marco Patricio Ramos Ramos

C.C.:2100302534

AVAL DEL PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Quien suscribe, declara que el presente Trabajo de Titulación: “Análisis comparativo del rendimiento térmico entre colectores solares de doble y simple flujo de movimiento del aire”, contiene las correcciones a las observaciones realizadas por los lectores en sesión científica del tribunal.

Latacunga, septiembre, 08, 2023



Mg. Cristian Fabián Gallardo Molina

C.C.: 0502847692

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTROMECAÁNICA

Título: Análisis comparativo del rendimiento térmico entre colectores solares de doble y simple flujo de movimiento del aire

Autor: Ramos Ramos Marco Patricio, Ing.

Tutor: Albarracín Álvarez Mauro Darío, Mg.

RESUMEN

Al no contar con datos precisos de Eficiencia de los colectores solares de simple y doble flujo de movimiento de aire, se planteó en el presente proyecto, realizar un análisis comparativo del Rendimiento Térmico entre dichos colectores, mediante datos de temperatura obtenidos en pruebas experimentales, en similares condiciones ambientales y constructivas; dichos datos fueron tomados durante 11 horas consecutivas el 29 de junio del año 2023, desde las 07h00 hasta las 18h00. Para dicho objetivo, se empleó un módulo colector de datos, al cual se conectaron veinte termistores distribuidos en puntos estratégicos del colector para la toma de datos de Temperatura de Entrada, Interna y de Salida del colector, así como un anemómetro ubicado a la salida del colector, para la toma de datos de la velocidad del aire forzado; así mismo se empleó un soplador para la circulación del aire por el interior de cada colector. También se empleó una estación meteorológica, que permitió tomar datos en tiempo real de la Temperatura Ambiental y la Radiación Solar a la cual estuvieron expuestos los colectores. Una vez registrados los datos, se procedió a realizar un análisis comparativo del Rendimiento Térmico entre los dos colectores, concluyendo que el colector de doble flujo puede generar mayores Temperaturas de Salida, siendo 35,13°C la Máxima Temperatura registrada por el colector de doble flujo y de 33,56°C registrada por el colector de simple flujo. Así mismo se obtuvo un Rendimiento Térmico Promedio de 51% y 27% de los colectores de doble y simple flujo respectivamente, con una Radiación Solar promedio de 461,76 W/m² y Temperatura Ambiental Promedio de 15,53 °C.

PALABRAS CLAVE: Colector solar, Placa absorbente, Simple flujo, Energía solar, Doble flujo, Análisis comparativo, Rendimiento.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTROMECAÁNICA

Title: “Thermal performance comparative analysis between solar collectors with double and simple flow of air movement”.

Autor: Ramos Ramos Marco Patricio

Tutor: Mauro Darío Albarracín Álvarez, Mg.

ABSTRACT

At not counting with precise data about the solar collector’s efficiency with single and double air movement flows, it was set out in this project to made a Thermal Performance comparative analysis between said collectors, through temperature data got in experimental tests, in similar environmental and constructive conditions; said data were taken during 11 consecutive hours on June 29, 2023, from 07:00 a.m. to 06:00 p.m. For said aim, it was used a data collector module, which was connected twenty thermistors distributed at collector strategic points for taking data on the collector Inlet, Internal and Outlet Temperature, as well as an anemometer located at the collector outlet, for data collection from forced air velocity; likewise, it was used a blower to the circulation the air inside each collector. It was also used a weather station, which allowed to be taken real-time data about the Ambient Temperature and Solar Radiation, which were exposed the collectors. Once, it was recorded the data, were performed a Thermal Performance comparative analysis between the two collectors, concluding, what the double flow collector can generate higher Outlet Temperatures, being at 35.13°C, the Maximum Temperature recorded by the double flow collector and 33.56°C, it recorded by the simple flow collector. Also, it was got an Average Thermal Performance 51% and 27% for the double and single flow collectors, respectively, with an average Solar Radiation 461.76 W/m² and Average Environment Temperature 15.53 °C.

KEYWORDS: Solar collector, absorber plate, simple flow, solar energy, double flow, comparative analysis, yield.

Yo, Marco Paúl Beltrán Semblantes con cédula de identidad número: 0502666514 Magíster en Lingüística Aplicada en la enseñanza del Idioma Inglés como Lengua Extranjera con número de registro de la SENESCYT ; 1020-2021-2354162: ; **CERTIFICO** haber revisado y aprobado la traducción al idioma Inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: “ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RENDIMIENTO TÉRMICO ENTRE COLECTORES SOLARES DE DOBLE Y SIMPLE FLUJO DE MOVIMIENTO DEL AIRE” de: Ramos Ramos Marco Patricio, aspirante a Magíster en Electromecánica.

Atentamente,



Mg. Marco Paúl Beltrán Semblantes
DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS-UTC
CC: 0502666514



**CENTRO
DE IDIOMAS**

Latacunga, Septiembre del 2023.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|--|---|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| Planteamiento del problema: | 2 |
| Formulación del problema: | 2 |
| Objetivos | 2 |
| Justificación y/o importancia de la investigación: | 4 |

CAPÍTULO I

| | |
|--|----|
| MARCO TEÓRICO REFERENCIAL PARA ANÁLISIS DE COLECTORES SOLARES | 6 |
| 1.1 Introducción: | 6 |
| 1.2 Antecedentes de la investigación relacionados con los colectores solares para el calentamiento de aire: | 6 |
| 1.3 Fundamentación teórica de la investigación | 10 |
| 1.4 Parámetros de rendimiento de los colectores | 28 |
| 1.5 Conclusiones del Capítulo I | 31 |

CAPÍTULO II

| | |
|--|----|
| MATERIALES Y MÉTODOS RELACIONADOS CON LOS COLECTORES SOLARES DE PLACA PLANA | 32 |
| 2.1 Introducción: | 32 |
| 2.2 Justificación y objetivo..... | 32 |
| 2.3 Datos geográficos y parámetros climáticos del lugar de pruebas del colector: | 32 |
| 2.4 Datos obtenidos de la Estación meteorológica:..... | 35 |

| | |
|---|----|
| 2.5 Construcción de un colector de placa plana de simple y doble flujo para la recolección de datos: | 38 |
| 2.6 Elementos eléctricos y electrónicos del colector..... | 44 |
| 2.7 Conclusiones del Capítulo II..... | 49 |

CAPÍTULO III

| | |
|---|------|
| ANÁLISIS DE RESULTADOS | 50 |
| 3.1 Introducción: | 50 |
| 3.2 Análisis comparativo de Temperaturas del colector de doble flujo.... | 49 |
| 3.3 Análisis comparativo de Temperaturas del colector de simple flujo...49 | |
| 3.4 Análisis comparativo de Temperaturas de los colectores de simple y doble flujo: | 50 |
| 3.5 Análisis comparativo del rendimiento de los colectores de simple y doble flujo: | 55 |
| 3.6 Análisis comparativo del rendimiento de los colectores de simple y doble flujo vs Radiación Solar: | 55 |
| 3.7 Conclusiones del Capítulo III..... | 587 |
| RECOMENDACIONES | 60 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 61 |
| ANEXOS | 66 |
| ÍNDICE DE CONTENIDOS | xi |
| ÍNDICE DE TABLAS | xiii |
| INDICE DE FIGURAS | xiv |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1: Sistema de tareas en relación con los objetivos específicos | 3 |
| Tabla 2: Datos geográficos de Latacunga | 33 |
| Tabla 3: Histórico climático para la ciudad de Latacunga..... | 34 |
| Tabla 4: Datos de Temperatura Ambiental y Radiación Solar obtenidos de la estación meteorológica correspondientes al 29/06/2023 | 37 |
| Tabla 5: Datos de calor específico para los valores de temperatura registrados el 29-06-2023 en la ciudad de Latacunga | 38 |
| Tabla 6: Parámetros fundamentales de los colectores solares de simple y doble flujo | 39 |
| Tabla 7: Datos de Temperatura y Flujo de Aire de los colectores solares de doble y simple flujo correspondientes al día 29/06/2023 | 47 |
| Tabla 8: Cálculo de la Eficiencia térmica de los colectores solares de doble y simple flujo correspondientes al día 29/06/2023 | 48 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Fig. 1. Irradiación solar aprovechada para la producción de energía eléctrica..... | 10 |
| Fig. 2. Operación básica de un colector solar plano | 11 |
| Fig. 3. Colectores solares usados como deshidratadores de alimentos..... | 12 |
| Fig. 4. Uso de colectores solares a nivel industrial..... | 14 |
| Fig. 5. Estructura básica de un colector solar | 14 |
| Fig. 6. Componentes de un colector solar empleado para calentar agua | 15 |
| Fig. 7. Cubierta de vidrio usada para un colector solar | 15 |
| Fig. 8. Placa absorbidora para un colector solar | 17 |
| Fig. 9. Área de una placa plana de un colector solar | 17 |
| Fig. 10. Aislamiento térmico de fibra de vidrio, inyectado y de poliuretano | 18 |
| Fig. 11. Carcaza de un colector solar | 20 |
| Fig. 12. Flujo de aire de un colector solar..... | 21 |
| Fig. 13. Colector solar plano..... | 22 |
| Fig. 14. Colector solar de tubos al vacío..... | 23 |
| Fig. 15. Colector parabólico compuesto | 24 |
| Fig. 16. Colector solar de alta temperatura | 24 |
| Fig. 17. Ángulo de inclinación de un colector solar. | 25 |
| Fig. 18. Colector solar de doble flujo | 28 |
| Fig. 19. Insolación junio 2023 | 29 |
| Fig. 20. Ubicación geográfica de Latacunga | 33 |
| Fig. 21. Intensidad de radiación solar máxima promedio..... | 34 |
| Fig. 22. Estación meteorológica recolectando datos del clima; módulo para toma de datos de la estación meteorológica..... | 35 |
| Fig. 23. Archivo *.TXT con datos climatológicos de la estación meteorológica. | 36 |
| Fig. 24. Cubierta de vidrio transparente de 4mm de espesor..... | 39 |
| Fig. 25. Estructura del colector de doble flujo y placas absorbedoras..... | 41 |
| Fig. 26. Estructura del colector de doble flujo y placas absorbedoras..... | 41 |
| Fig. 27. Perforación de entradas y salidas del flujo de aire del colector..... | 42 |
| Fig. 28. Instalación del aislante térmico en las paredes del colector | 42 |
| Fig. 29. Proceso de soldadura de la estructura del colector | 42 |

| | |
|--|----|
| Fig. 30. Identificación de termistores del colector. Colocación de placas planas. | 43 |
| Fig. 31. Ubicación de termistores | 43 |
| Fig. 32. Fijación de termistores en la estructura del colector. | 43 |
| Fig. 33. Sellado del vidrio del colector con silicón industrial | 44 |
| Fig. 34. Traslado de Colectores de doble y simple flujo al laboratorio de energías renovables ubicado en la terraza de la Universidad Técnica de Cotopaxi | 44 |
| Fig. 35. Soplador y termistores del colector | 45 |
| Fig. 36. Módulo recolector de datos del colector..... | 45 |
| Fig. 37. Sensor Anemómetro | 45 |
| Fig. 38. Termistores para toma de datos de temperatura de los colectores | 46 |
| Fig. 39. Archivo *.TXT; datos de temperatura y flujo de aire del colector de doble flujo, correspondientes al 29/06/2023 desde las 07h00 hasta las 19h00..... | 46 |
| Fig. 40. Temperaturas del colector de doble flujo | 51 |
| Fig. 41. Temperaturas del colector de simple flujo | 52 |
| Fig. 42. Temperatura de Salida del colector de doble flujo vs el colector de simple flujo y Temperatura Ambiente | 53 |
| Fig. 43. Temperatura de Salida del colector de doble flujo vs el colector de simple flujo y Temperatura Ambiente | 55 |
| Fig. 44. Eficiencia térmica del colector doble flujo y simple flujo vs Radiación Solar | 56 |
| Fig. 45. Eficiencia térmica del colector doble flujo vs simple flujo | 57 |

INTRODUCCIÓN

Antecedentes: La utilización de recursos renovables hoy en día se ha convertido en uno de los sistemas de mayor apogeo. El continuo crecimiento poblacional y a su vez económico demanda un incremento en el consumo energético. Ya sea para uso doméstico, industrial o científico, las fuentes de energía son indispensables. En todos estos casos durante décadas se ha usado energía de fuentes no renovables como son el petróleo, carbón y gas. Sin embargo, actualmente su consumo ha ido en declive no solo por cuestión ecológica sino también monetaria [1]. Las energías renovables más usadas son la solar y la eólica, principalmente la solar para refrigeración y calefacción. Debido a que es considerada como una energía abundante, inagotable, de bajo costo de inversión y no contaminante [2]. Por tales razones la energía solar fue utilizada desde hace varios siglos, desde el año 2000 a.C. se prendía fuego con espejos curvos, ya en (1740-1800) Nicholas de Saussure fabricó el primer colector solar plano utilizado para calentar alimentos, lo que empezó con algo tan sencillo como una caja, poco a poco al pasar los años se convirtió en equipos más complejos para diferentes fines [3].

Posteriormente, a pesar de todos los estudios que se dieron, la energía solar fue poco aprovechada. Cuando el combustible bajó de precio después de la I Guerra Mundial, este tuvo su gran auge. No es sino hasta en 1973 que se vive la primera crisis del petróleo cuando varios científicos advierten su cantidad limitada y de las consecuencias de este sistema energético, así que se promulga el uso de energías renovables [4]. No obstante, los colectores solares cambiaron de modelo, material, costo, principio y hasta capacidad. Consistiendo en transformar la energía solar incidente en otra forma de energía útil, en su mayoría estudiados para calentar agua. La constante evolución en la adecuación de los colectores se basó principalmente en conseguir una mejor eficiencia [5].

Como consecuencia, debido al incremento en sus aplicaciones, al presente los colectores solares son estudiados para mejorar su rendimiento térmico y rentabilidad. Basándose en el diseño de las actividades que realiza, estas son:

colectar, absorber y transferir. Todo para que su aprovechamiento sea ideal en sus aplicaciones [6].

Es así como se planteó realizar un análisis comparativo del rendimiento térmico entre colectores solares de doble y simple flujo de movimiento del aire.

Planteamiento del problema: Se tiene dos colectores solares, de similares características en su construcción y dimensionamiento, expuestos a condiciones ambientales y circulación forzada de aire iguales, ubicados en un mismo lugar y tiempo y con sensores de temperatura instalados en puntos específicos, de los cuales, se requiere obtener datos de sus Temperaturas, que permitan realizar un análisis comparativo entre dichos colectores en cuanto a su Rendimiento Térmico.

Formulación del problema: Inexistencia de datos de Rendimiento Térmico de los colectores solares de simple y doble flujo de movimiento de aire, que permitan realizar un análisis comparativo entre dichos colectores.

Objeto y campo de acción: El objeto del presente proyecto, se enfoca en analizar el Rendimiento Térmico entre los colectores solares de simple y doble flujo, durante el proceso de calentamiento del aire.

El campo de acción es el proceso de calentamiento del aire, aprovechando la Radiación Solar como fuente de energía y utilizando colectores solares, expuestos a iguales condiciones ambientales, en una misma ubicación y tiempo.

Objetivos

Objetivo General: Realizar un análisis comparativo del Rendimiento Térmico entre los colectores solares de doble y simple flujo de movimiento del aire, mediante datos de temperatura obtenidos en pruebas experimentales.

Objetivos Específicos:

- Construir los colectores solares de doble y simple flujo con placas absorbedoras planas, empleando materiales de similares características y aislantes para evitar pérdidas de temperatura.

- Obtener mediante pruebas experimentales datos de Temperatura de Entrada y Salida entre colectores solares de doble y simple flujo con absorbedor plano, para realizar un análisis de Rendimiento Térmico.
- Determinar el Rendimiento Térmico entre los colectores de doble y simple flujo con los datos de temperatura obtenidos, mediante gráficas comparativas, que nos permitan un análisis concluyente.

Sistemas de tareas en relación con los objetivos específicos: Las actividades a desarrollarse para dar cumplimiento a cada objetivo específico planteado son las siguientes:

Tabla 1: Sistema de tareas en relación con los objetivos específicos

| Objetivos específicos | Actividades | Resultado | Descripción de la actividad |
|--|--|---|--|
| <p>Construir los colectores solares de doble y simple flujo con placas absorbedoras planas, empleando materiales de similares características y aislantes para evitar pérdidas de temperatura.</p> | <p>Investigación de temas relacionados con el diseño, construcción y rendimiento de los colectores solares de doble flujo con placa plana.</p> <p>Adquisición de los respectivos materiales y construcción de los colectores solares con dimensiones similares</p> | <p>Equipos colectores solares de doble y simple flujo con placas planas y aislamiento térmico en sus costados</p> | <p>Técnica:</p> <p>Recopilación y análisis de documentos, tesis, libros digitales y artículos referentes a los fundamentos de los colectores.</p> <p>Construcción de los colectores con características dimensionales similares.</p> <p>Instrumentos:</p> <p>Dobladora de tol Soldadora Mig Compresor Taladro manual Amoladora Herramientas manuales</p> |

| | | | |
|---|---|--|---|
| <p>Obtener mediante pruebas experimentales datos de temperatura de entrada y salida entre colectores solares de doble y simple flujo con absorbedor plano, para realizar un análisis de rendimiento</p> | <p>Recolección de datos de medio ambiente de la estación meteorológica y de los colectores, expuestos a similares condiciones de tiempo y medio ambiente, durante las horas de sol de un día específico</p> | <p>Datos de temperatura medio ambiental, velocidad del viento, radiación solar.</p> <p>Datos de temperatura de entrada, interna y de salida de los colectores de doble y simple flujo.</p> | <p>Técnica: Observación y experimentación</p> <p>Instrumentos: Estación Meteorológica Sopladores de aire Módulos colectores de datos de temperatura Colector solar de doble flujo Colector solar de imple flujo Computador portátil</p> |
| <p>Determinar el rendimiento entre los colectores de doble y simple flujo con los datos de temperatura obtenidos, mediante gráficas comparativas, que nos permitan un análisis concluyente</p> | <p>Elaboración de un análisis comparativo entre los colectores solares objeto de nuestro estudio, con los datos obtenidos de temperatura de salida de los colectores.</p> | <p>Gráficas comparativas de temperatura y rendimiento térmico de los colectores solares.</p> <p>Análisis y conclusiones del estudio.</p> | <p>Técnica: Cálculo y análisis</p> <p>Instrumento: Software Microsoft Excel Computador portátil</p> |

Justificación y/o importancia de la investigación: La energía solar supera ampliamente otras fuentes de energía, sin mencionar su suministro seguro, inagotable y gratuito. Una de las ventajas de nuestro país, para este fin, es la perpendicularidad de los rayos solares que recibimos, por lo que este recurso natural, bien puede aprovecharse en su máxima efectividad [7].

La energía proveniente del sol requiere sistemas de captación y almacenamiento eficientes. Equipos con un control adecuado mejorarán las condiciones de funcionamiento y aprovecharán mucho mejor la fuente de energía disponible.

Los procesos de diseño y dimensionamiento de colectores solares deben atender la necesidad de incrementar las tasas de flujo de calor sin que esto signifique un incremento desproporcionado de las pérdidas por fricción.

Es oportuno realizar un análisis energético del comportamiento de los colectores solares de doble flujo, por ser estos uno de los más eficaces desde el punto de vista energético, así mismo los resultados obtenidos, permitirán reforzar futuros estudios e investigaciones concernientes al campo energético, rendimiento de colectores y proyectos que busquen aprovechar la energía solar como fuente de energía limpia y segura.

Así mismo, podremos orientar los resultados hacia el diseño macrométrico de colectores, es decir, a nivel industrial, con mejoras en su proceso productivo.

El presente proyecto es un aporte al Proyecto de Investigación: “Análisis de eficiencia en el proceso de secado solar de cacao mediante diferentes formas geométricas en el sistema de captación” de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Mediante el análisis comparativo, se busca obtener datos concluyentes que permitan la selección del colector con mejor rendimiento.

Hipótesis: Un colector solar de doble flujo de placas planas tiene un mejor Rendimiento Térmico que un colector solar de simple flujo de placa plana.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO REFERENCIAL PARA ANÁLISIS DE COLECTORES SOLARES

1.1 Introducción: En el presente capítulo se abordan los conceptos fundamentales relacionados con los colectores solares de placa plana y el uso de fuentes renovables de energía para el calentamiento de aire. El diseño de los equipos es también un ámbito trascendental. Siempre hay posibilidades de implementar mejoras; alivianar materiales, optimizar el rendimiento energético, instalar sensores y mecanismos de control, automatizar, etc. Para ello es indispensable experimentar y obtener datos relevantes entre los equipos que se están comparando. Esto nos permitirá obtener conclusiones objetivas que nos permitirán tomar decisiones que mejoren, cambien u optimicen las características iniciales de un equipo.

El objetivo del capítulo es establecer los fundamentos teóricos relacionados con el proceso de calentamiento del aire utilizando colectores solares, específicamente aquellos de doble y simple flujo con placa absorbadora plana.

1.2 Antecedentes de la investigación relacionados con los colectores solares para el calentamiento de aire: La radiación solar que alcanza la Tierra ha sido aprovechada por los humanos desde épocas pasadas, la misma que ha evolucionado con el tiempo debido a la implementación de varias tecnologías. En la actualidad, el calor y la luz del sol son captadas por medio de células fotovoltaicas, helióstatos

o colectores térmicos, que pueden transformarla en energía térmica o eléctrica. Es una de las llamadas energías renovables o energías limpias, que puede hacer considerables contribuciones para resolver algunos de los problemas más urgentes que afronta la humanidad. Las tecnologías, en función de la forma en que capturan, convierten y distribuyen la energía solar se clasifican en pasivas o activas. Las tecnologías activas incluyen el uso de paneles fotovoltaicos y colectores térmicos para recolectar la energía. Entre las tecnologías pasivas, se encuentran diferentes técnicas enmarcadas en la arquitectura bioclimática: la orientación de los edificios al Sol, la selección de materiales con una masa térmica favorable o que tengan propiedades para la dispersión de luz, así como el diseño de espacios mediante ventilación natural [8].

La Agencia Internacional de la Energía en el año 2011, expresó lo siguiente: “el desarrollo de tecnologías solares limpias, baratas e inagotables supondrá un enorme beneficio a largo plazo”. La seguridad energética de los países aumentará mediante el uso de una fuente de energía local, inagotable y, aún más importante, independiente de importaciones, aumentará la sostenibilidad, reducirá la contaminación, disminuirá los costos de la mitigación del cambio climático, y evitará los excesos en los precios de los combustibles; los costos deben ser considerados inversiones para su incentivo y desarrollo; se debe realizar de manera sabia y debe ser ampliamente difundido, en la actualidad la fuente de energía solar más desarrollada es la fotovoltaica. Los informes de la organización ecologista Greenpeace revelan que, la energía solar fotovoltaica podría suministrar electricidad a dos tercios de la población en el año 2030 [9].

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 °C, un calor útil de 292,51 W y un valor medio de rendimiento del 64,76 % [10].

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 °C, un promedio de temperatura en la placa colectora de 24,3 °C, un promedio de temperatura a la salida del colector de 20,88 °C, el calor útil alcanzado fue de 93,88 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 °C, un promedio de temperatura en la placa colectora de 22,73 °C, un promedio de temperatura a la salida del colector de 21,35 °C, el calor útil alcanzado es de 196,86 W y un promedio del rendimiento del 63,39 % [11].

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 variando el tipo de vidrio en la cubierta”, en cuyo 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 [12].

En el artículo de la **Academia Mundial de Ciencia, Ingeniería y Tecnología, de la Revista Internacional de Energía e Ingeniería de Energía** titulado: **“Análisis de rendimiento basado en exergía del calentador de aire solar de doble flujo con absorbedor corrugado”** se presenta el rendimiento, basado en la exergía de análisis de calentadores de aire solares de doble flujo con placa corrugada y placa plana. Un modelo matemático de calentador de aire solar de doble flujo basado sobre ecuaciones de balance de energía ha sido presentado y los resultados obtenidos se han comparado con el de una placa plana convencional de un calentador de aire solar. El calentador de aire solar de absorción corrugada de doble flujo funciona térmicamente mejor que el doble flujo de placa plana y calentador de aire solar de placa plana convencional bajo las mismas condiciones de funcionamiento. Sin embargo, el absorbedor corrugado conduce a una mayor caída de presión, aumentando así la potencia de bombeo. Los resultados revelaron que la eficiencia energética y exergética del absorbedor corrugado de doble flujo del calentador de aire solar es mucho más alto que el calentador de aire solar convencional con el concepto de aumento en el área de superficie de transferencia de calor y turbulencia en el flujo de aire. Los resultados indican que la eficiencia energética aumenta, sin embargo, la eficiencia exergética disminuye con el aumento de la masa en su tasa de flujo [13].

1.3 Fundamentación teórica de la investigación

1.3.1 Energía Solar: Es la energía que se adquiere aprovechando la radiación electromagnética que proviene del Sol.

Aproximadamente la mitad de la energía que alcanza la superficie terrestre proviene del Sol. La Tierra recibe 174 petavatios (1015 vatios) de radiación solar entrante (insolación) desde la capa más alta de la atmósfera. Aproximadamente el 30% es reflejada de vuelta al espacio mientras que el resto es absorbido por las nubes, los océanos y las masas terrestres. El espectro electromagnético de la luz solar en la superficie terrestre está ocupado principalmente por luz visible y rangos de infrarrojos con una pequeña parte de radiación ultravioleta. La potencia de la radiación varía según el momento del día; las condiciones atmosféricas que la amortiguan y la latitud. Se puede asumir que en buenas condiciones de radiación el valor es de aproximadamente 1000 W/m^2 en la superficie terrestre. A esta potencia se la conoce como irradiación y tiene varias aplicaciones; una de ellas se muestra en la Fig. 1.



Fig. 1. Irradiación solar aprovechada para la producción de energía eléctrica [8]

Los componentes directa y difusa de la radiación son aprovechables, o la suma de ambas. La radiación directa es la que llega del foco solar, sin reflexiones o refracciones intermedias. La difusa es la que emite la bóveda celeste diurna gracias a los múltiples fenómenos de reflexión y refracción solar en la atmósfera, en las nubes y el resto de los elementos terrestres y atmosféricos. La radiación directa puede concentrarse y reflejarse para su utilización, mientras que la luz difusa que proviene de todas las direcciones no es posible concentrar. La irradiación directa

normal (o perpendicular a los rayos solares) fuera de la atmósfera, se le conoce como constante solar y tiene un valor medio de 1366 W/m^2 (corresponde a un valor máximo en el perihelio de 1395 W/m^2 y un valor mínimo en el afelio de 1308 W/m^2). La radiación absorbida por los océanos, las nubes, el aire y las masas de tierra incrementan la temperatura de éstas. El aire calentado contiene agua evaporada que asciende de los océanos, y también de los continentes, causando convección o circulación atmosférica. Cuando el aire sube a las capas altas, donde la temperatura es demasiado baja, éste disminuye su temperatura hasta que el vapor de agua se condensa y forma nubes. El calor latente de la condensación del agua amplifica la convección, produciendo fenómenos como el viento, anticiclones y borrascas. La energía solar absorbida por las masas terrestres y océanos mantiene la superficie a 14°C .

1.3.2 Constante solar: La irradiación normal directa fuera de la atmósfera es conocida como constante solar (G_{sc}) y su valor medio es de $1353 \text{ [W/m}^2]$ (que corresponde a un valor máximo en el perihelio de $1395 \text{ [W/m}^2]$ y un valor mínimo en el afelio de $1308 \text{ [W/m}^2]$), también se le puede definir como energía instantánea proveniente del sol.

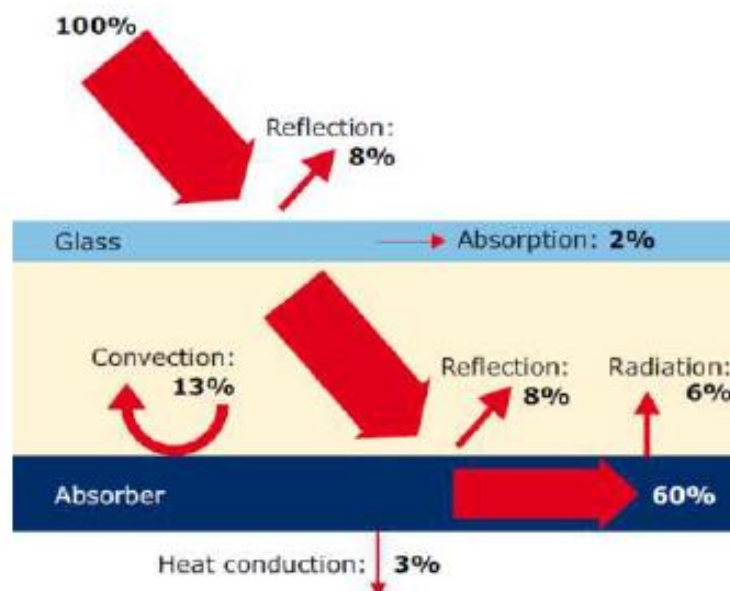


Fig. 2. Operación básica de un colector solar plano [14]

Por unidad de tiempo, recibida sobre una superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación, a una distancia de 1 UA (Unidad Astronómica)

(1,495x10¹¹ Km) del sol y fuera de la atmosfera terrestre. Esta cantidad es muy utilizada en la energía solar. Su valor es estimado con un error de $\pm 1,5\%$:

$$G_{sc} = 1353 \frac{w}{m^2} = 4872 \frac{KJ}{hm^2} \quad (1)$$

1.3.3 Colectores solares: Son conocidos también como captadores de sol, dispositivos diseñados para recolectar la energía irradiada por el sol y luego convertirla en energía térmica. Los colectores se dividen en dos grandes grupos de acuerdo con la temperatura que alcanza el fluido de trabajo: los captadores de baja temperatura, utilizados primordialmente en sistemas domésticos de calefacción y los colectores de alta temperatura, conformados mediante espejos, que son utilizados para producir energía eléctrica.

Los colectores solares, son dispositivos que tienen como función principal convertir la radiación solar incidente en calor y transferirlo a un fluido para su aprovechamiento. La selección del fluido de trabajo sea gas o líquido, depende de las propiedades químicas, físicas y la forma de calentamiento puede ser directa o indirecta, en función de las condiciones de operación.

La superficie con capacidad absorbente de la radiación solar es el componente principal del colector solar, en donde se incrementa la energía y permite elevar la temperatura. Los componentes restantes, son materiales que disminuyen las pérdidas acumuladas de energía térmica. El efecto invernadero se produce cuando la cubierta transparente permite el paso de la radiación de la onda corta, pero no de la radiación de la onda larga.



Fig. 3. Colectores solares usados como deshidratadores de alimentos [21]

La mayor parte de los estudios de los captadores solares se destinan para el calentamiento del agua, para uso sanitario. Existe gran potencial de desarrollo de colectores solares para el calentamiento del aire, sin embargo, estos sistemas representan una parte muy pequeña del mercado mundial de las tecnologías solares. Existen varias aplicaciones basadas en el acondicionamiento térmico de espacios (secado de alimentos, incubación, agricultura protegida, salas climatizadas, calentamiento de espacios habitacionales y laborales).

Las tres funciones principales de uso del colector solar son: coleccionar, absorber y transferir la energía solar. Transfieren el poder calorífico al fluido caloportador que transporta la energía de un lugar a otro, lo cual permite aprovecharla idealmente en cualquier aplicación.

Un colector solar capta la energía solar y la transforma en otra forma de energía que pueda ser utilizada por el ser humano.

Un colector solar no es un intercambiador de calor convencional debido a que este último ejecuta intercambios de calor entre fluidos con altos coeficientes de transferencia térmica. Al contrario del colector solar, que transfiere la energía tomada de la fuente solar hacia un fluido sin concentración de energía solar [14].

Cuando hablamos de colector solar nos referimos a un dispositivo especialmente diseñado para obtener la energía de los rayos del sol y de esta manera aumentar la temperatura o nivel térmico de algún fluido o proceso [15]. Un colector solar térmico intercambia radiación solar incidida sobre este en energía térmica útil. Hay varios tipos de colectores solares térmicos, los cuáles pueden diferir en material, diseño y principio [16].

1.3.4 Aplicaciones del colector solar: Los colectores solares principalmente se usan para la calefacción y refrigeración del agua de las casas o edificios, para el calentamiento de piscinas o para calentar el aire. También se usa en la parte industrial como secadores o deshidratadores de alimentos y para generar energía eléctrica.



Fig. 4. Uso de colectores solares a nivel industrial [21]

1.3.5 Estructura del colector solar: Los colectores solares poseen una estructura por capas, su diseño más simple se conforma con una primera capa de material transparente que puede ser una lámina de vidrio, la segunda capa que actúa como placa receptora que absorbe el calor, conocida como cuerpo negro y finalmente una capa con aisladores térmicos.

El funcionamiento del colector solar comienza cuando el fluido que puede ser aire ingresa por un ducto al colector, mientras pasa por él, el fluido va absorbiendo energía térmica formada por la radiación solar absorbida. Al salir el fluido del colector, este posee un aumento de temperatura con respecto a la ambiental.

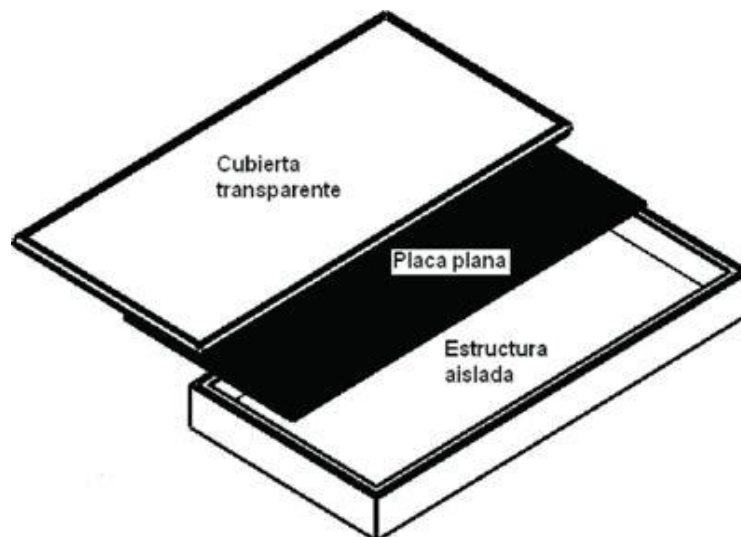


Fig. 5. Estructura básica de un colector solar [9]

1.3.6 Componentes principales de los colectores solares: Los componentes de un colector solar dependen de su aplicación u objetivo. Principalmente tienen los siguientes elementos:

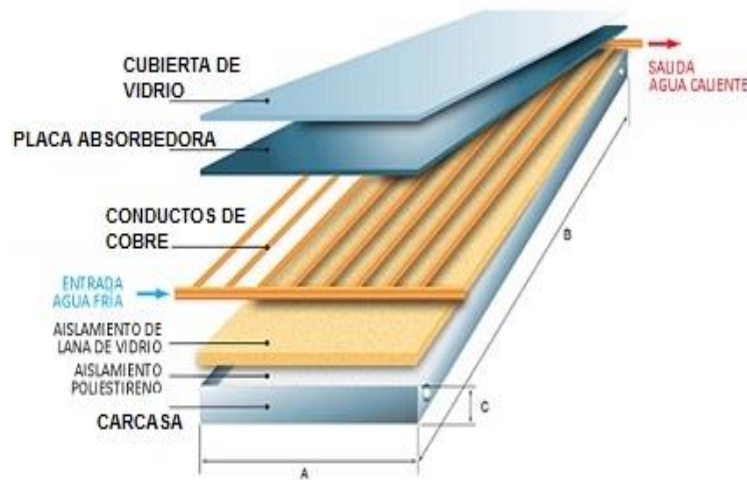


Fig. 6. Componentes de un colector solar empleado para calentar agua [16]

1.3.6.1 Cubierta de vidrio: Referente a la superficie superior del colector y es la tapa de la carcasa; es el primer componente sobre el cual incide la radiación solar. Entre las principales funciones tiene: generar el efecto invernadero y reducir las pérdidas por convección al mismo tiempo, permitir la estabilidad térmica del colector con los sellos en las uniones de la carcasa y las juntas, y proteger la superficie absorbente del exterior.



Fig. 7. Cubierta de vidrio usada para un colector solar [23]

La cubierta transparente de mayor recomendación por costos y tiempo de duración es el vidrio templado o normal, cuya alta lucidez se determina por su contenido bajo de hierro. Se puede utilizar plásticos como el policarbonato en placa, o el acrílico; pero este último con el tiempo pierde resistencia, por lo que puede romperse con algún impacto debido a la expansión provocada por altas temperaturas. Además, los plásticos se ven afectados por la radiación ultravioleta (UV) o por variaciones

fuertes de temperatura, por lo que deben estar protegidos de la contaminación, condensación y altas humedades.

En la mayoría de las investigaciones citadas la cubierta de los colectores es de vidrio simple entre 3mm y 6 mm de espesor y es la encargada de retener el calor en la cámara. También, tiene funciones tales como [6]:

- a) Resguardar la placa absorbadora y el aislamiento térmico que en nuestro caso será poliuretano por su baja conductividad térmica, dentro de la carcasa frente a todo efecto perjudicial del medio ambiente, forma parte de la protección del colector y compone estanqueidad del sistema permitiendo el efecto invernadero en la cámara del colector, admite la entrada de radiación solar de onda corta y evita la salida de radiación de onda larga.
- b) Refleja una pequeña cantidad de radiación en su plano y absorber la mínima posible en su interior, de modo tal que aproximadamente toda la radiación solar incida en el absorbedor.
- c) Tiene una vida útil extensa, con baja adherencia a la suciedad y fácil limpieza.
- d) La cubierta más utilizada es el vidrio transparente por tener uno de los mejores valores de transmisibilidad.

1.3.6.2. Superficie absorbadora: Componente principal del colector que es el encargado de transformar la radiación solar incidente en calor y luego transmitirlo al aire que es el fluido transportador de calor. Un parámetro importante es una alta absorción de la radiación de onda corta, como el caso de un recubrimiento con una pintura de tono oscuro (no necesariamente negra, ya que el efecto de otros colores oscuros es muy similar). La pérdida térmica por radiación se puede mermar si se modifica la estructura de la superficie, añadiendo materiales que disminuyan la emisividad (ϵ) y dándole al absorbente un carácter selectivo. Por lo general se pueden obtener absorción (α) entre 0,85 y 0,90 y rangos de emitancia menores a 0,15.

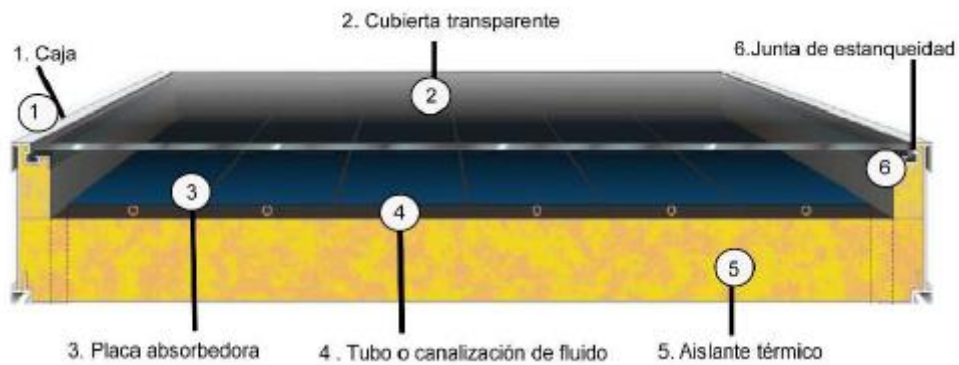


Fig. 8. Placa absorbidora para un colector solar [23]

Es mejor edificar el absorbente con materiales metálicos para que la alta conductividad térmica y rigidez sea aprovechada. Lo que se debe considerar del absorbente es su estabilidad química, mecánica y térmica, así como también, cubrir los aspectos de seguridad con relación a la exposición al fuego y no representar ningún riesgo en su manejo.

Para mejorar las condiciones de transferencia de calor, es posible aumentar el área superficial de intercambio, aplicando una rugosidad artificial, o modificar las estructuras en diferentes formas geométricas: cuadradas, rectangulares, triangulares, trapezoidales, onduladas, aletadas, entre otras, o materiales porosos, como fibras naturales o minerales.

Cálculo de la superficie absorbidora: las placas de los colectores solares de placa plana son usualmente rectangulares, por lo que el cálculo de su área se determina de manera sencilla.

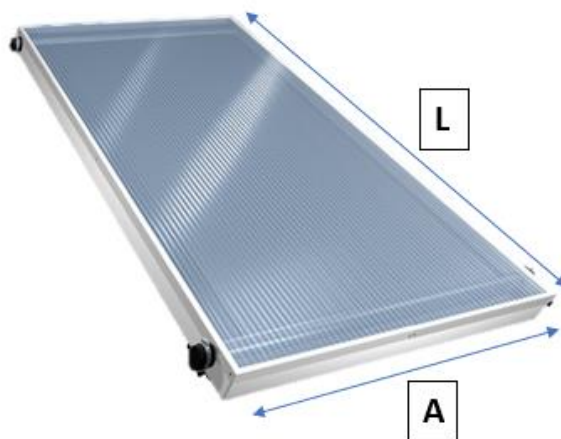


Fig. 9. Área de una placa plana de un colector solar [23]

Con las dimensiones de la longitud y ancho de la placa absorbidora se puede obtener al cálculo del área efectiva de captación de la placa colectora.

Ecuación 1: Área placa colectora.

$$A_c = L * A \quad (2)$$

Donde:

A_c = Área efectiva de la placa colectora, (m²).

L = Longitud de placa colectora, (m).

A = Ancho de placa colectora, (m).

1.3.6.3 Aislamiento térmico: Su objetivo es reducir las pérdidas de la energía captada. Es instalado entre la placa absorbente y la carcasa, en la parte posterior y en las partes laterales del colector. Los aislantes deben ser resistentes a la humedad y a altas temperaturas. Se pueden utilizar todos los tipos disponibles en el mercado, los que tienen mejores propiedades son: las lanas de vidrio, o también el poliestireno o espumas plásticas, aunque deben protegerse de la exposición directa a la radiación ultravioleta y en algunos casos de las altas temperaturas para evitar su fusión, y fuga de gases. En el caso de las fibras vegetales o minerales, hay que evitar que se humedezcan porque el agua disminuye el efecto aislante.

El material más utilizado es el poliuretano por poseer características de alto desempeño de protección contra el fuego, ya que puede resistir temperaturas de 120-200°C, su índice de conductividad térmica es de 0.02 W/m.K, es reciclable libre de CFC (Clorofluorocarburos), HCFC (Hidroclorofluorocarburos), HFC (hidrofluorocarburos) [9].



Fig. 10. Aislamiento térmico de fibra de vidrio, inyectado y de poliuretano [26]

Cálculo del aislante térmico: Para calcular el flujo de calor que circula a través del colector, se tiene la siguiente ecuación:

Ecuación 2: Flujo de calor [14].

$$Q_c = m_a * C_{aire} * (T_{a2} - T_{a1}) \quad (3)$$

Donde:

Q_c = Flujo de calor, (W).

m_a = Flujo masico de aire, (kg/s).

C_{aire} = Capacidad calorífica del aire, (kJ/kg.K)

T_{a1} = Temperatura de entrada del aire al colector, (K).

T_{a2} = Temperatura de salida del aire del colector, (K).

Teniendo el flujo de calor se procede al cálculo de la conducción de calor.

Ecuación 3: Conducción de calor de una pared plana [8].

$$Q_c = \frac{T_{a1} - T_{a2}}{R_{pared}} \quad (4)$$

Donde:

R_{pared} = Espesor del aislamiento, (m).

Ecuación 4: Resistencia térmica a la conducción de la pared plana [14].

$$R_{pared} = \frac{L}{K * A} \quad (5)$$

Donde:

L = Espesor, (m).

K = Conductividad térmica, (W/m.K).

A = Área interior de la pared, (m²).

Sustituyendo las ecuaciones (3) y (4) en (2), se tiene:

$$Q_c = \frac{T_{a1} - T_{a2}}{\frac{L}{K * A}} = \frac{K * A}{L} (T_{a1} - T_{a2}) \quad (6)$$

Despejando L , se tiene la ecuación para el cálculo del espesor del aislante térmico poliuretano:

$$L = \frac{K * A * (T_{a1} - T_{a2})}{Q_a} \quad (7)$$

1.3.6.4 Carcasa y sellos: Es el componente que contiene el captador o absorbedor y lo protege de agentes externos, el mismo debe ser rígido, resistente a las variaciones de temperatura y a las corrosiones, por lo mismo se utilizan como material, el acero inoxidable, acero galvanizado y el aluminio.

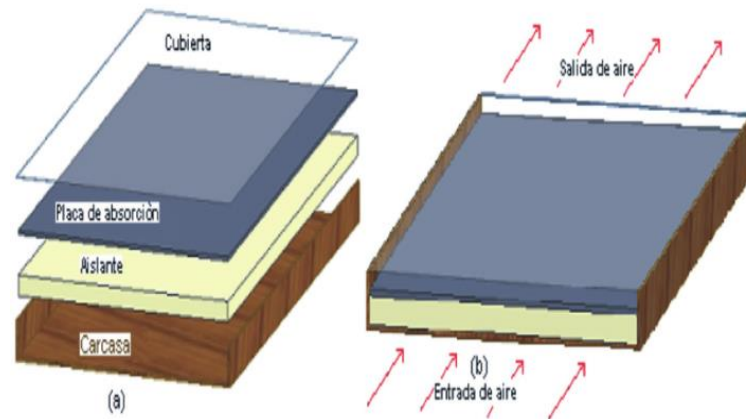


Fig. 11. Carcasa de un colector solar [27]

La función principal del sello es impedir el ingreso de agua y evitar las fugas de aire. Es necesario que los sellos sean elásticos, resistentes a la temperatura y a la radiación ultravioleta para que, de esta manera poder garantizar un buen sellado entre la superficie transparente y la estructura del captador.

1.3.6.5 Trayectorias del flujo de aire: El modo en que fluye el aire en los conductos de un calentador solar de aire, es uno de los aspectos más importantes relacionado a los colectores solares que afecta predominantemente su rendimiento térmico.

Desde hace varios años, para extraer el calor de la placa absorbente, se ha utilizado colectores solares de un solo flujo, pero a medida que pasa el tiempo se ha ejecutado investigaciones en donde se demuestra que un colector solar de un solo paso de flujo de aire no puede extraer el calor del absorbente, por lo tanto, muchos investigadores sugieren algunos patrones de flujo adicionales para mejorar la tasa de extracción del calor de la placa absorbente. Sobre la base del patrón de flujo de aire se tiene a los colectores solares de doble paso o conducto, los cuales se clasifican colectores solares de doble paso de flujo paralelo, de flujo en contracorriente y de flujo con reciclado.

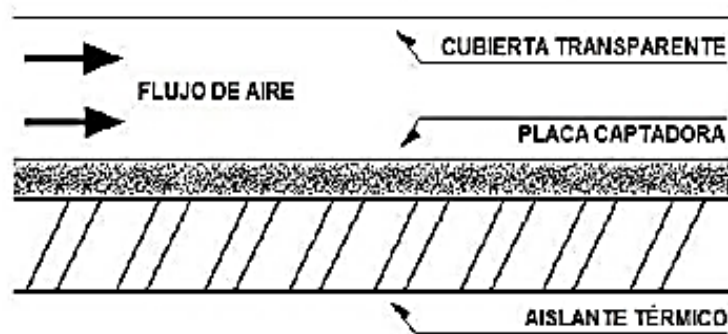


Fig. 12. Flujo de aire de un colector solar [5]

1.3.7 Tipos de colector: Existen diferentes maneras de clasificar a los colectores solares, se pueden tomar en cuenta varios elementos como el tipo de colector solar empleado, la temperatura de operación del colector o según la aplicación final de la energía térmica obtenida [16]. Existen dos tipos elementales de colectores solares, estos son los de alta y baja temperatura.

1.3.7.1 Colectores de temperatura baja

Los colectores de temperatura baja son aquellos que estamos más acostumbrados a ver, aquí incluyen los sistemas de calefacción usados en diferentes medios. Se los ubica de manera fija y no realizan seguimiento al sol [16].

Colectores solares de placa plana: Los colectores solares planos trabajan a temperaturas menores a los 70 °C. Pueden variar en la manera que son construidos en cuanto a materiales y aislamientos, pero no en geometría. Su característica principal consiste en la captación de la radiación solar por una superficie plana que llega a un cabezal de distribución que lo lleva hasta unos tubos elevadores, que posteriormente descargan el fluido en otro cabezal que lo lleva a la salida del colector [17]. Por el hecho de ser modernos, estos colectores permiten obtener la energía térmica para ser usada mayormente en el área de la construcción. Este tipo de colector radica principalmente en una superficie plana por la misma que pasa una tubería que conduce el agua que se va a calentar.

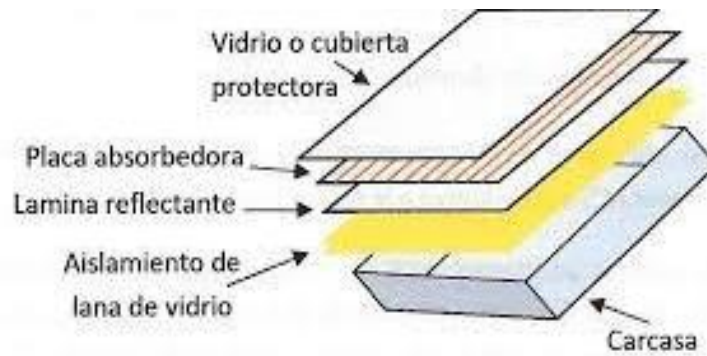


Fig. 13. Colector solar plano [5]

Colector solar plano protegido: Se le conoce también como captador vidriado, tiene un vidrio fino en su cubierta, el mismo que se encarga de minimizar las pérdidas de calor y maximiza la captación por efecto invernadero, un invernadero no es más que un edificio cerrado con cristales, en donde el interior se calienta debido a que el vidrio tiene un efecto selector de la radiación.

Los vidrios actúan como filtros para algunas longitudes de onda de la luz solar: a su vez esta deja pasar principalmente la luz visible, y es muy poco transparente a la radiación infrarroja de mayor longitud de onda. El vidrio es un buen conductor térmico y por esa razón, el líquido que circula por los conductos se calienta por encima de la temperatura exterior.

Colector solar plano no protegido: Es conocido como captador no vidriado, se diferencia del colector solar protegido porque no tiene ningún vidrio protector, lo que hace que el efecto invernadero no sea aprovechado, su temperatura sube simplemente porque la radiación de los rayos del sol calienta una superficie oscura que otra de color. Este tipo de artefactos tienen eficiencia limitada, por esta razón siempre necesitará una superficie más grande para conseguir las prestaciones deseadas.

Colectores de tubos al vacío: Los colectores de tubos al vacío pueden alcanzar temperaturas de más de 100°C, lo que representa temperaturas mayores con respecto a los colectores de placa plana. Sin embargo, esto se ve reflejado en su alto costo. Estos colectores no poseen cubierta exterior, sino está formada por los propios tubos hechos al vacío lo que no permite el intercambio de calor con el exterior [18].

Los colectores de tubos al vacío son conocidos por su mayor eficiencia energética y captación de radiación solar. Esto ocurre gracias al vacío que se da en la región anular de los tubos. Comparando la eficiencia energética con los colectores planos convencionales con tubería de cobre, los colectores de tubos al vacío los superan en un 35%, y los que son con cubierta de vidrio con 15%.



Fig. 14. Colector solar de tubos al vacío [16]

Algunos de los tipos de colectores al vacío se clasifican en:

- Heat pipe
- Flujo directo
- Sydney
- Achott
- Captadores CPC

Colector parabólico compuesto: El colector parabólico compuesto forma parte del tipo de colectores concentradores que no genera imágenes. Su forma peculiar le permite desde varios ángulos aprovechar la radiación solar hacia superficies más reducidas.

En la antigüedad se crearon receptores solares planos, pero con el pasar del tiempo los cambiaron por tubos que permiten el uso de fluidos líquidos.

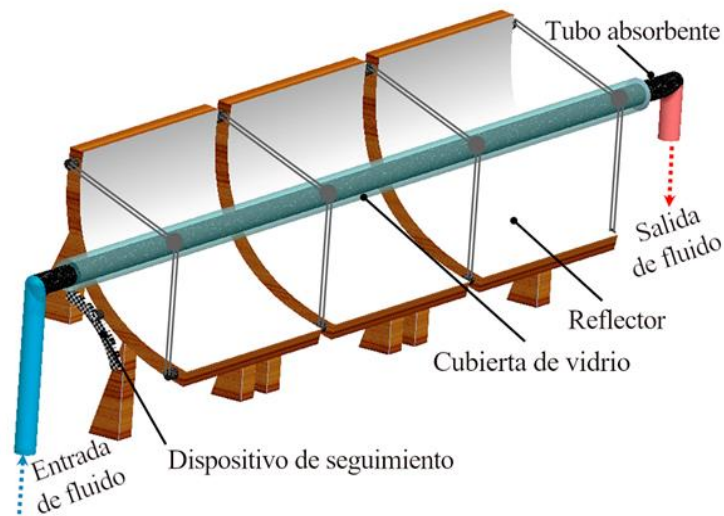


Fig. 15. Colector parabólico compuesto [16]

1.3.7.2 Colectores de alta temperatura: Son sistemas que permiten obtener temperaturas mayores a los 500°C , conocidos también como hornos solares. Son usados para calentar aceites o sales, en lugares donde no existen demasiados días nublados. Los colectores de alta temperatura están formados por espejos, se usan para producir vapor y esto ayuda a que las turbinas encargadas de generar energía eléctrica se muevan.

Actualmente son fabricados con campos de espejos planos que dirigen el reflejo y lo concentran únicamente en una torre, en la cual se va generando vapor de agua que sirve para producir energía eléctrica. Existe una amplia variedad de colectores solares adicionales a los dos tipos que se han mencionado.

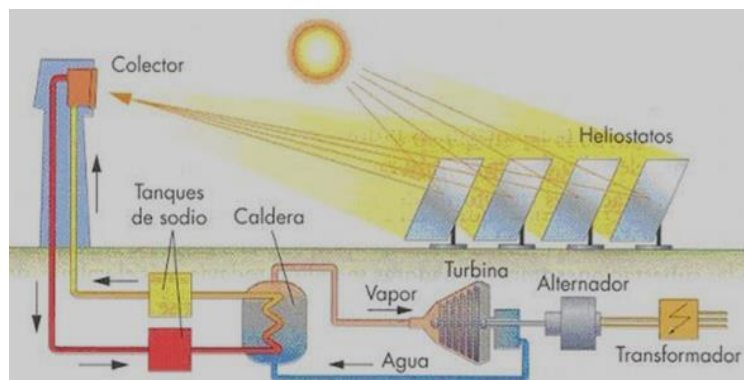


Fig. 16. Colector solar de alta temperatura [16]

1.3.8 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, así como también la orientación en sentido norte o sur dependiendo de su hemisferio terrestre [17].

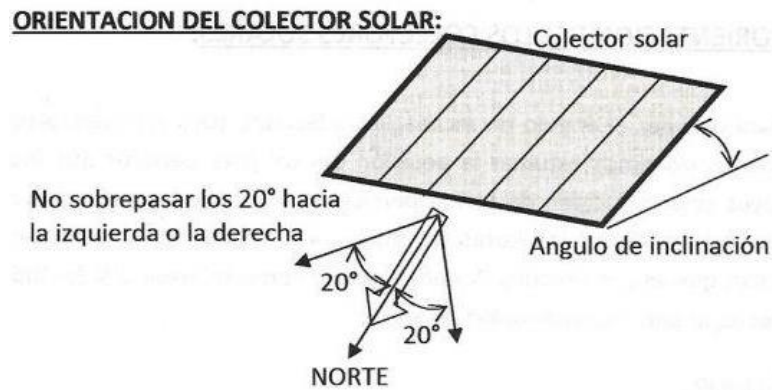


Fig. 17. Ángulo de inclinación de un colector solar [31]

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 con 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].

1.3.9 Rendimiento de los colectores solares: El rendimiento de los colectores solares se define como la cantidad de calor que se obtuvo, dividida por la cantidad de calor que se incidió en la capa receptora [19]. Es decir, la capacidad del colector para transformar la energía solar en calor. Para el incremento de la eficiencia en los diseños de colectores solares se utilizan herramientas informáticas de simulación para variar los diferentes parámetros. Los factores que determinan el rendimiento teórico de los colectores solares son: la temperatura del aire como la del fluido, y la radiación solar.

El rendimiento de los colectores solares depende de diferentes situaciones, entre ellas, la insolación, lo cual tiene que ver con la situación geográfica y las horas de sol. Otro factor es la colocación del colector, no puede estar bajo sombra y debe tener una inclinación exacta. De esta manera se puede decir que mejora el rendimiento cuando hay menor temperatura fría en el ambiente [17].

Hoy, los sistemas solares térmicos, suelen reconocerse como uno de los métodos más eficaces para aprovechar la energía solar. Entre varios sistemas térmicos, los calentadores de aire solares son más populares para el uso de calefacción de aire, mediante el uso de energía solar debido a su simplicidad en el diseño y economía.

Es mejor para aplicaciones de temperatura del aire bajas a moderadas, como calefacción de espacios, secado de productos agrícolas, secado de madera y mucho más. En general la eficiencia del calentador de aire es baja, debido a la baja capacidad térmica del aire y al bajo coeficiente de transferencia de calor entre el absorbedor y el aire que fluye. Para mejorar la eficiencia, muchos investigadores desarrollaron varios diseños, como el colector de panel, el empaque del conducto de aire, el absorbente de superficie extendida, la rugosidad artificial en el absorbente.

El análisis de la primera ley de la termodinámica se basa en el método del balance de energía. Sin embargo, la segunda ley de la termodinámica involucra el proceso de reversibilidad o irreversibilidad que es muy importante para el análisis energético de un sistema de energía. El análisis energético es un método efectivo para el diseño y evaluación del desempeño de sistemas de energía.

Para calcular el rendimiento térmico de un colector se debe tomar en cuenta la siguiente fórmula:

$$\eta_T = \frac{m_a C_p (T_{sal} - T_{ent})}{I_c A_c} \quad (8)$$

Donde:

m_a = Flujo de aire de secado (kg/s)

C_p = Calor específico del aire (J/Kg*K)

T_{ent} = Temperatura de entrada del aire (°C)

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

I_c = Radiación solar (W/m²)

A_c = Área del colector (m²)

η_T = Eficiencia térmica (adimensional)

1.3.9 Descripción de los colectores solares de doble flujo con absorbedores de placa plana: Los colectores solares han sido estudiados durante muchos años y los investigadores han orientado su atención en aumentar su rendimiento térmico y rentabilidad. Se ha observado que la desventaja del colector solar de absorbente plano, es su baja eficiencia a causa de la escasa capacidad calorífica del aire y la formación de una subcapa laminar viscosa sobre la superficie absorbente que causa la baja transferencia del calor por convección entre la placa absorbente y el aire que fluye [7].

Para mejorar el rendimiento del colector solar se ha desarrollado diversas técnicas y teorías como, por ejemplo, proporcionar una rugosidad artificial en la parte inferior o superior de la placa absorbente para romper la subcapa laminar, hacer fluir el fluido a ambos lados de la placa absorbente, inducir en la transferencia de calor por convección forzada, reciclar el aire, unir las aletas o deflectores a la placa absorbente o corrugar la placa absorbente e incorporar materiales porosos.

La literatura demuestra que el colector solar de doble paso del aire ya sea en flujo paralelo o en contraflujo puede proporcionar un rendimiento térmico mayor en comparación con el colector solar de único paso de aire para las mismas condiciones de operación. El principal inconveniente de un calentador solar de aire de flujo paralelo es que para alcanzar tal eficiencia requiere usar una fuente con una

capacidad de potencia de bombeo muy alta para reducir pérdidas de calor. Sin embargo, en colectores solares de contraflujo el factor más indeseable es que además de requerir una fuente de bombeo también aumenta la caída de presión durante el funcionamiento [5].

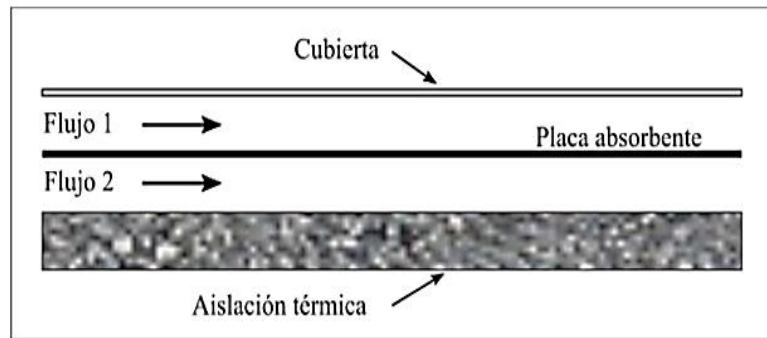


Fig. 18. Colector solar de doble flujo [5]

Aunque existen investigaciones de los colectores solares que operan por flujo forzado por su mayor eficiencia, se tiene interés por estudiar los colectores solares que funcionan por convección natural, porque son independientes de las fuentes de energía externas para impulsar el aire, reduciendo el costo de operación y mantenimiento. Analizaron numéricamente un nuevo diseño de colectores solares de doble flujo en paralelo, multiuso de libre convección con placa absorbente plana en forma de V. El rendimiento térmico promedio del calentador de aire diseñado es 60,4% para las horas pico de sol, y concluyeron que el dispositivo puede reducir significativamente los costos de calefacción y proteger el medio ambiente [6].

Hernández y Quiñonez, estudiaron analítica y experimentalmente un colector solar de doble flujo en paralelo que funciona por convección natural con placa absorbente en forma de V, ellos observaron que los valores diarios de eficiencia oscilaron entre 48 % y 50 % durante los días soleados.

1.4 Parámetros de rendimiento de los colectores

1.4.1 Parámetros meteorológicos: A mayor radiación incidente se tiene como resultado que la temperatura del aire sea más alta en la salida, pero también aumenta las pérdidas de calor radiantes a través de la cubierta de cristal.

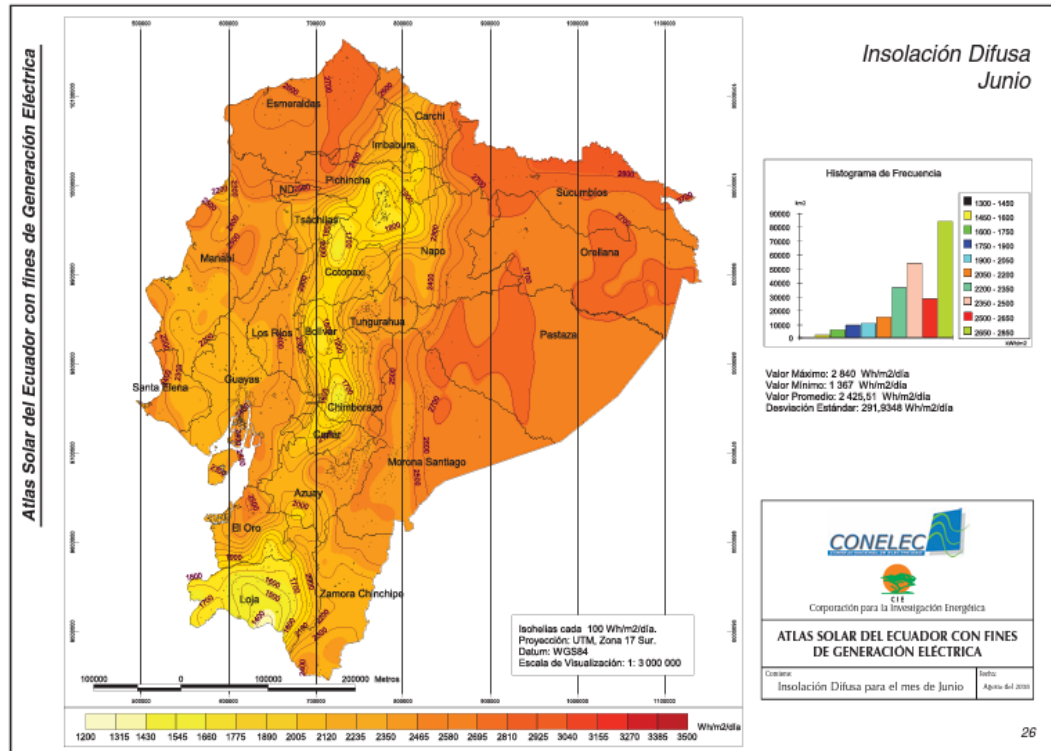


Fig. 19. Insolación junio 2023 [12]

Por otra parte, algunos estudios informaron que una pequeña disminución en la eficiencia térmica disminuye la temperatura de salida en el fluido. La Temperatura ambiente afecta al rendimiento del colector indirectamente a través de las pérdidas de calor. Para una temperatura de salida dada, la baja temperatura del ambiente da como resultado una baja eficiencia y viceversa. La transferencia de calor convectivo desde la placa de cubierta al aire del ambiente significativamente depende de la velocidad del viento. A mayor velocidad del viento la pérdida térmica es mayor, de modo que hace que la eficiencia del colector disminuya.

1.4.2 Los parámetros de operación: El mayor número de cubiertas de vidrio reduce las pérdidas térmicas, pero al mismo tiempo el producto global de la transmitancia - absorción también se reduce y por lo tanto el calor absorbido por la placa disminuye. Así, la elección del número de cubiertas depende de la temperatura de salida deseada y por tanto la temperatura del absorbente.

La superficie de la placa absorbente debe tener las características de un alto valor de la capacidad de absorción para la radiación solar entrante y bajo valor de emisividad para la radiación saliente, son deseables de esta forma, debido a que

estos maximizan la absorción de la energía solar y minimizar las pérdidas por radiación.

Las superficies del absorbente solar selectivos generalmente obtienen mediante revestimiento. El recubrimiento que no se degradan ópticamente significativamente durante el tiempo de vida del colector y también soportar la temperatura de estancamiento y la humedad es necesaria.

Los colectores están diseñados para operar en ubicaciones, inclinaciones y en condiciones de servicio diferentes, un valor óptimo de separación entre la placa de absorción y la cubierta de cristal inferior es difícil para especificar, sin embargo, los valores típicos que utilizan generalmente son de 1-6 cm.

La temperatura de entrada del fluido tiene mucha importancia en la eficiencia del colector de la placa. La eficiencia del colector disminuye con el aumento del valor de la temperatura de entrada del fluido [6].

Un aumento de la velocidad del fluido o flujo másico aumenta el valor de la eficiencia del colector. Esto se debe a que el aumento de la velocidad de flujo del fluido disminuye la temperatura de la placa del colector y por lo tanto disminuye las pérdidas de calor a los alrededores. También, al mismo tiempo, aumenta la caída de presión, que aumenta la potencia de bombeo.

1.4.3 Técnicas de mejora de rendimiento para colectores solares de flujo

doble: El rendimiento de un colector ya sea operado bajo pase de aire simple o doble, dependerá de la intensidad de la radiación solar incidente, las pérdidas de la superficie del absorbente y la tasa de transferencia de calor de la placa de absorción de aire. Las siguientes son algunas de las técnicas de mejora del rendimiento para los calentadores solares de aire:

a) *Mejora de la intensidad de la radiación solar incidente* sobre el colector solar. El rendimiento de los colectores puede ser mejorada de manera significativa por la adición de deflectores, que aumentan la superficie total del colector de modo que la relación de concentración puede ser de hasta 4 y la temperatura se puede logra hasta de 180°C.

b) *Aumento de la transferencia de calor de la placa de absorción.* La baja tasa de transferencia de calor desde la placa de absorción de aire en el

conducto es relativa a la alta temperatura de la placa de absorción, que conduce a pérdidas térmicas mayores para el medio ambiente. Estas pérdidas pueden reducirse disminuyendo la temperatura de la placa de absorción mediante el aumento de la transferencia de calor entre la placa absorbente y aire. Este objetivo se puede lograr mediante el uso de superficies extendidas sobre la placa de absorción, rugosidad artificial y materiales porosos en el conducto de flujo.

1.5 Conclusiones del Capítulo I

El presente capítulo presentó inicialmente una recopilación de información basada en investigaciones relacionadas con el análisis energético de diferentes colectores solares realizadas en los últimos 5 años. Seguidamente incluyó una base teórica de conocimientos sobre los colectores solares de manera general en la que se incluyó su función, elementos, fórmulas y aplicaciones. Finalmente exhibió los principales factores que afectan al rendimiento de estos equipos. En definitiva, este capítulo brindó una referencia de la literatura que ayuda al entendimiento del tema a desarrollar y contribuye en su realización.

CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS RELACIONADOS CON LOS COLECTORES SOLARES DE PLACA PLANA

2.1 Introducción: En el presente capítulo se procede a realizar una descripción mediante tablas e ilustraciones de datos reales de los colectores construidos en base a la fundamentación teórica revisada en el Capítulo I. Además, se indica el procedimiento empleado para la construcción de los colectores solares. Así mismo se indica los cálculos matemáticos realizados y los datos obtenidos que posteriormente permitieron realizar las curvas para un análisis del rendimiento entre los colectores solares de simple y doble flujo de placa plana.

2.2 Justificación y objetivo: Mediante la respectiva construcción y puesta en sitio de los colectores y la estación meteorológica se busca obtener datos de Temperatura de Entrada, Interna y de Salida de los colectores de doble y simple flujo, así como los datos de Temperatura de Medio Ambiente y Radiación Solar, que permitan realizar los cálculos y gráficas del Rendimiento Térmico de los colectores.

2.3 Datos geográficos y parámetros climáticos del lugar de pruebas del colector: El estudio se ejecuta en la ciudad de Latacunga localizada en el centro norte del callejón interandino conocida como región sierra centro ubicada en la provincia de Cotopaxi con sus límites:

- Al norte: Cantón Mejía y Sigchos
- Al Sur: Salcedo Y Pujilí
- Al Este: Archidona y Tena
- Al Oeste: Saquisilí, Pujilí y Sigchos

La ciudad de Latacunga está formada por 1386.3 km² de superficie irregulares, el área montañosa con un área 0.14895 km² equivale 10.74%, área plana o casi plana 0.13751 km² que representa el 9.92%, suave o ligeramente ondulado 0.18794 con un 13.56%, moderadamente ondulado 0.34296 km² el 24.74%, las colinas con un área de 0.29428 km² el 21.23%, escarpado 0.2522562 km² el 18.20%, Nieve 0.0205895 km² el 1.49% y suelo urbano 1.8186 km² el 0.13%, la temperatura media promedio es de 13°C, el volumen de precipitación anual de 500 a 1000 mm. Los datos geográficos de la ciudad de Latacunga, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2: Datos geográficos de Latacunga [12]

| PARÁMETRO: | DETALLE: |
|------------------------------|------------------------|
| Altitud | 2769 msnm |
| Coordenadas | 0°56'47''S-78°37'14''W |
| Superficie | 1386.3 km ² |
| Clima | Templado y frio |
| Temperatura promedio | 13°C |
| Velocidad media viento anual | 6 km/h |



Fig. 20. Ubicación geográfica de Latacunga [12]

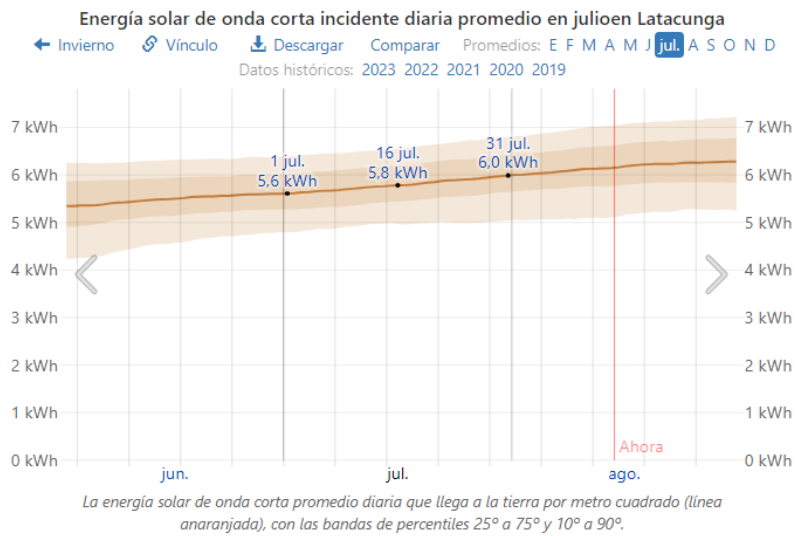


Fig. 21. Intensidad de radiación solar máxima promedio [12]

Así mismo consideraremos los valores históricos de temperatura promedio, máximo y mínimo de Latacunga, así como la velocidad del viento, esto como referencia para los valores reales que obtendremos desde la estación meteorológica, instalada en nuestro laboratorio.

A continuación, se indican los valores históricos respectivos:

Tabla 3: Histórico climático para la ciudad de Latacunga [12]

| Año | T [°C] | TM [°C] | Tm [°C] | V[km/h] |
|------|--------|---------|---------|---------|
| 2006 | 13,90 | 19,20 | 8,60 | 12,50 |
| 2007 | 13,70 | 19,30 | 8,60 | 12,30 |
| 2008 | 13,50 | 18,70 | 8,40 | 11,00 |
| 2009 | 14,10 | 20,10 | 8,90 | 14,40 |
| 2010 | 14,00 | 20,20 | 8,40 | 14,40 |
| 2011 | 14,30 | 19,90 | 8,40 | 14,40 |
| 2012 | 14,10 | 20,70 | 8,60 | 15,50 |
| 2013 | 13,10 | 20,70 | 8,60 | 15,50 |
| 2014 | 13,00 | 20,10 | 8,60 | 14,60 |
| 2015 | 13,20 | 20,80 | 8,70 | 16,40 |
| 2016 | 13,40 | 20,90 | 8,50 | 14,30 |
| 2017 | 13,00 | 19,60 | 8,40 | 13,00 |
| 2018 | 12,90 | 20,00 | 8,40 | 14,60 |
| 2019 | 11,70 | 18,40 | 7,40 | 14,60 |
| 2020 | 12,40 | 18,20 | 6,70 | 15,70 |
| 2021 | 11,20 | 17,79 | 6,70 | 12,90 |
| 2022 | 12,00 | 18,50 | 6,00 | 13,50 |

Donde:

T = temperatura promedio

TM = temperatura media alta

Tm = temperatura media baja

V = velocidad del viento

2.4 Datos obtenidos de la Estación meteorológica: Este equipo nos permite realizar la toma de datos del medio ambiente, como son temperatura ambiental, humedad, velocidad del viento y radiación solar, de manera automática. Dichos datos son tomados en fechas y horas simultáneas a los datos obtenidos en los módulos de los colectores, que posteriormente emplearemos para el cálculo del rendimiento de estos.

Características:

Rango de sensor de temperatura exterior: -40 a 149 °F

Precisión de temperatura exterior: ± 2 °F

Rango de humedad exterior: De 10 a 99%.

Precisión de humedad exterior: $\pm 5\%$

Rango de velocidad del viento: 0 a 100 mph (operativo)

Precisión de velocidad del viento: ± 2.2 mph o 10% (lo que sea mayor)



Fig. 22. Estación meteorológica recolectando datos del clima; módulo para toma de datos de la estación meteorológica

Se procedió a instalar la estación meteorológica, misma que registró los datos del medio ambiente de manera permanente y automática; así, se obtuvo los siguientes datos de Temperatura Ambiental y Radiación Solar, correspondientes al día 29-06-2023 en la ciudad de Latacunga, mismos que se empleó posteriormente para obtener los valores de Calor Específico.

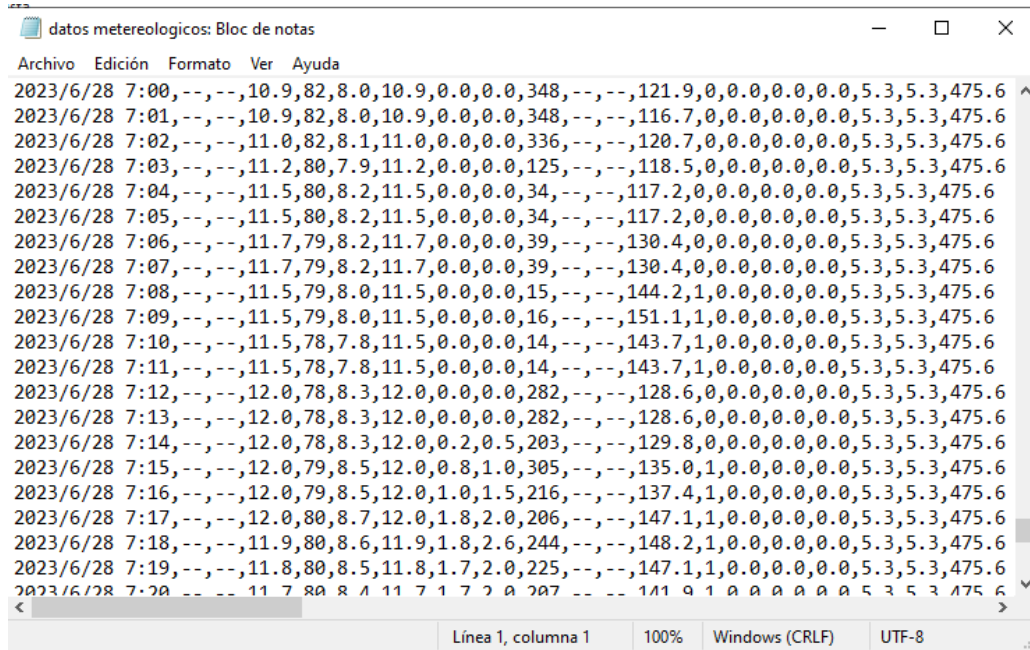


Fig. 23. Archivo *.TXT con datos climatológicos de la estación meteorológica

Al igual que el módulo colector de datos de temperatura, la estación meteorológica registra los datos en un archivo básico de texto de tipo *.TXT, siendo complicada su lectura y procesamiento, por lo que posteriormente se procede a exportar a un archivo de Excel para facilitar el manejo de los datos. De esta manera se pueden organizar y clasificar los datos necesarios para el cálculo del rendimiento térmico de los colectores objetos del presente proyecto, como son Temperatura Ambiental y Radiación Solar.

Cabe indicar que, la estación meteorológica registra los datos medio ambientales de manera automática, con una frecuencia de una vez por minuto; sin embargo, con fines ilustrativos, se muestra en la tabla siguiente, únicamente los datos correspondientes a una frecuencia de un dato por cada media hora del registro total obtenido.

Tabla 4: Datos de Temperatura Ambiental, Radiación Solar y Velocidad del Viento obtenidos de la estación meteorológica correspondientes al 29/06/2023

| TIEMPO | TEMPERATURA AMBIENTAL | RADIACIÓN SOLAR | VELOCIDAD DEL VIENTO |
|---------------------|------------------------------|------------------------|-----------------------------|
| Fecha / Hora | °C | W/m2 | m/s |
| 29/6/2023 7:00 | 11,2 | 40,5 | 27 |
| 29/6/2023 7:30 | 11,6 | 218,6 | 52 |
| 29/6/2023 8:00 | 12,3 | 182,6 | 52 |
| 29/6/2023 8:30 | 13,9 | 555,9 | 37 |
| 29/6/2023 9:00 | 13,9 | 569,7 | 37 |
| 29/6/2023 9:30 | 13,9 | 294,2 | 37 |
| 29/6/2023 10:00 | 14,3 | 381,9 | 37 |
| 29/6/2023 10:30 | 14,7 | 483,1 | 37 |
| 29/6/2023 11:00 | 16,7 | 617,8 | 39 |
| 29/6/2023 11:30 | 15,9 | 631,5 | 29 |
| 29/6/2023 12:00 | 17,4 | 527,2 | 29 |
| 29/6/2023 12:30 | 16,9 | 610,8 | 29 |
| 29/6/2023 13:00 | 17,5 | 1043,8 | 29 |
| 29/6/2023 13:30 | 16,7 | 549 | 29 |
| 29/6/2023 14:00 | 17,1 | 504,4 | 29 |
| 29/6/2023 14:30 | 16,9 | 554,8 | 13 |
| 29/6/2023 15:00 | 17,2 | 361,8 | 13 |
| 29/6/2023 15:30 | 17,9 | 374,9 | 13 |
| 29/6/2023 16:00 | 16,7 | 720,2 | 13 |
| 29/6/2023 16:30 | 16,1 | 140,1 | 13 |
| 29/6/2023 17:00 | 15,7 | 93,3 | 13 |
| 29/6/2023 17:30 | 15,0 | 33,7 | 13 |
| 29/6/2023 18:00 | 14,2 | 21,6 | 47 |
| 29/6/2023 18:30 | 13,2 | 0,0 | 47 |
| 29/6/2023 19:00 | 12,8 | 0,0 | 47 |

Para continuar con el cálculo de la Eficiencia Térmica de los colectores, se empleó la siguiente tabla, para obtener los valores de “Cp” Calor Específico, mismos que se obtienen en base a la Temperatura Ambiente en °C.

Con los datos de la Tabla 8 y utilizando el **ANEXO 02**, acorde a los valores de Temperatura Ambiental, obtenemos los valores de Calor Específico, mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 5: Datos de calor específico para los valores de temperatura registrados el 29-06-2023 en la ciudad de Latacunga

| Tiempo | Temperatura | Radiación Solar | Calor específico |
|-----------------|-------------|-----------------|------------------|
| Fecha / Hora | °C | w/m2 | J/Kg K |
| 29/6/2023 7:00 | 11,2 | 40,5 | 1006 |
| 29/6/2023 7:30 | 11,6 | 218,6 | 1006 |
| 29/6/2023 8:00 | 12,3 | 182,6 | 1006 |
| 29/6/2023 8:30 | 13,9 | 555,9 | 1007 |
| 29/6/2023 9:00 | 13,9 | 569,7 | 1007 |
| 29/6/2023 9:30 | 13,9 | 294,2 | 1007 |
| 29/6/2023 10:00 | 14,3 | 381,9 | 1007 |
| 29/6/2023 10:30 | 14,7 | 483,1 | 1007 |
| 29/6/2023 11:00 | 16,7 | 617,8 | 1007 |
| 29/6/2023 11:30 | 15,9 | 631,5 | 1007 |
| 29/6/2023 12:00 | 17,4 | 527,2 | 1007 |
| 29/6/2023 12:30 | 16,9 | 610,8 | 1007 |
| 29/6/2023 13:00 | 17,5 | 1043,8 | 1007 |
| 29/6/2023 13:30 | 16,7 | 549,0 | 1007 |
| 29/6/2023 14:00 | 17,1 | 504,4 | 1007 |
| 29/6/2023 14:30 | 16,9 | 554,8 | 1007 |
| 29/6/2023 15:00 | 17,2 | 361,8 | 1007 |
| 29/6/2023 15:30 | 17,9 | 374,9 | 1007 |
| 29/6/2023 16:00 | 16,7 | 720,2 | 1007 |
| 29/6/2023 16:30 | 16,1 | 140,1 | 1007 |
| 29/6/2023 17:00 | 15,7 | 93,3 | 1007 |
| 29/6/2023 17:30 | 15,0 | 33,7 | 1007 |
| 29/6/2023 18:00 | 14,2 | 21,6 | 1007 |
| 29/6/2023 18:30 | 13,2 | 0,0 | 1007 |
| 29/6/2023 19:00 | 12,8 | 0,0 | 1007 |

2.5 Construcción de un colector de placa plana de simple y doble flujo para la recolección de datos: Con el fin de lograr un análisis lo más asertivo posible, se diseñó y construyó los colectores de simple y doble flujo de placas planas, bajo similares parámetros de construcción, que permitan realizar un análisis comparativo lo más asertivo posible; así mismo se emplearon materiales de iguales características, como se puede apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 6: Parámetros fundamentales de los colectores solares de simple y doble flujo

| Parámetro | Simple flujo | Doble flujo |
|---|--------------|-------------|
| Longitud del colector (L) | 1060 mm | 1060 mm |
| Longitud de placa (l) | 1000 mm | 1000 mm |
| Ancho del colector (A) | 560 mm | 560 mm |
| Ancho de placa (a) | 500 mm | 500 mm |
| Altura del colector (H) | 130 mm | 260 mm |
| Inclinación del colector (θ) | 15° | 15° |
| Espesor de la lámina placa colectora aluminio (δA) | 1,5 mm | 1,5 mm |
| Espesor de la lámina base del colector tol galvanizado (δG) | 1,5 mm | 1,5 mm |
| Distancia entre el absorbente y el vidrio (h) | 80 mm | 80 mm |
| Espesor del vidrio (e_v) | 4 mm | 4 mm |
| Flujo del aire a través de la cámara del colector (m_a) | 18 - 23 | 18 - 23 |
| Conductividad térmica del aislante (K) | 0,020 W/m K | 0,020 W/m K |
| Espesor del aislante térmico (e_t) | 30 mm | 30 mm |

Una vez descritas las características fundamentales, se procede a indicar los principales elementos empleados para la construcción de los colectores solares:

2.5.1 Cubierta y Sello: Para nuestro proyecto se realizó la adquisición de 1 vidrio rectangular transparente de dimensiones 1030 mm por 530mm con espesor de 4mm. Para aislar, juntar y sellar se utilizó silicón industrial de color negro, en tubo y de aplicación manual.



Fig. 24. Cubierta de vidrio transparente de 4mm de espesor

En la Tabla 6, se aprecia que la carcasa del colector ensamblado tiene 1,06 m de largo por 0,56 m de ancho, mientras que la placa colectora posee 0,5 m de ancho por 1 metro de largo teniendo un área efectiva de colección de 0,5 m².

Con las dimensiones de la longitud y ancho de la Tabla 6, de la placa absorbadora se procede al cálculo del área efectiva de captación, empleando la Ecuación 1:

$$\begin{aligned}
 A_c &= L * A \\
 A_c &= 1 \text{ m} * 0,56 \text{ m} \\
 \mathbf{A_c} &= \mathbf{0,5m^2} \qquad \qquad \qquad (9)
 \end{aligned}$$

2.5.2 Aislamiento térmico: Para su cálculo, emplearemos la Ecuación 6.

Reemplazando los valores, tenemos:

Conductividad térmica del poliuretano prefabricado $K = 0,028 \text{ W/m.K}$

Área del colector solar $A = 0,5 \text{ m}^2$

Temperatura de entrada al colector es $T_{a1} = 373,15\text{K}$

Temperatura ambiente estimada $T_{a2} = 293,15\text{K}$

Flujo de calor asumido $Q_a = 40\text{W}$

$$\begin{aligned}
 L &= \frac{K * A * (T_{a1} - T_{a2})}{Q_a} \\
 L &= \frac{0,028 \frac{\text{W}}{\text{m} * \text{K}} (0,5\text{m}^2) (373,15\text{K} - 291,15\text{K})}{40\text{W}} \\
 \mathbf{L} &= \mathbf{0,03\text{m}} \qquad \qquad \qquad (10)
 \end{aligned}$$

En base al cálculo realizado, se procede a colocar poliuretano con un espesor de 3cm en las paredes del colector y en la base de la placa absorbadora.

2.5.3 Carcasa: La estructura que soporta los elementos internos, se construyó con una plancha de tol galvanizado de 1220mm por 2440mm, con un espesor de 1,5mm. Es trascendental que los colectores sean de similares características constructivas para poder realizar la respectiva obtención de datos de temperatura de manera adecuada y poder realizar la respectiva comparación y análisis del rendimiento térmico lo más precisamente posible.

Se procede con la adquisición de los materiales y la respectiva construcción, como se detalla a continuación:

- a) Para el soporte, se corta y suelda tubo cuadrado de $\frac{3}{4}$ " que servirán como patas de apoyo para los colectores, tomando en cuenta que uno de los extremos debe ser regulable, para darle la inclinación respectiva.



Fig. 25. Estructura del colector de doble flujo y placas absorbedoras

- b) Una vez trazadas las dimensiones sobre las planchas de aluminio y tol galvanizado, se procede a cortar el material empleando una zizalla de tol, tijeras y una amoladora con disco de corte, tratando de modelar el colector de manera que tenga la menor cantidad de puntos de fuga posibles.
- c) Empleando una dobladora de tol, se procede a dar la forma respectiva al contorno y las placas de los colectores.



Fig. 26. Estructura del colector de doble flujo y placas absorbedoras

- d) Se realizan las perforaciones en los extremos de los colectores para entrada y salida de aire.
- e) Perforación de agujeros para paso de cableado de sensores termistores, en las placas planas y estructura del colector.



Fig. 27. Perforación de entradas y salidas del flujo de aire del colector

- f) Se instala el aislante térmico en las paredes y contornos de los colectores.



Fig. 28. Instalación del aislante térmico en las paredes del colector

- g) Empleando proceso de pintura electroestática, se procede a pintar las placas planas de color negro.



Fig. 29. Proceso de soldadura de la estructura del colector

- h) Se instalan las placas absorbedoras de material aluminio en el interior del cuerpo de los colectores.



Fig. 30. Identificación de termistores del colector. Colocación de placas planas.

- i) Una vez dimensionados los conductores, se procede a cortar y a ubicarlos distributivamente a través de las perforaciones realizadas en los puntos estratégicos del colector.
- j) Utilizando tornillos autoperforantes y un taladro manual, se procede a ensamblar el cuerpo del colector.

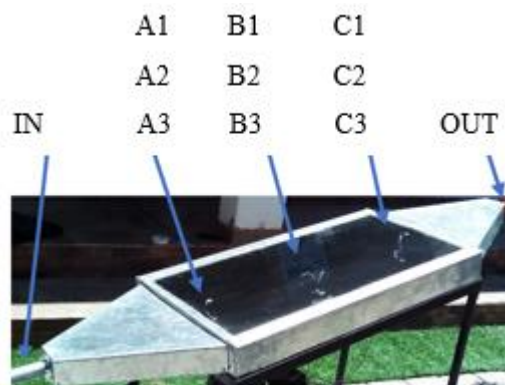


Fig. 31. Ubicación de termistores

- k) Se procede a fijar los termistores en la superficie de las placas absorbedoras, así como en la superficie del vidrio, distribuyendo los sensores en tres puntos estratégicos de las placas y el vidrio. Para este fin, se empleó cinta plástica para invernaderos.



Fig. 32. Fijación de termistores en la estructura del colector.

- l) Se procede a instalar la tubería de PVC en la entrada y salida de los colectores con sus termistores y el sensor anemómetro.
- m) Utilizando una pistola para tubo silicón industrial, se aplica el respectivo sellante y se ubica el vidrio sobre la estructura del colector.



Fig. 33. Sellado del vidrio del colector con silicón industrial

- n) Utilizando una pistola para tubo silicón industrial, se aplica el respectivo sellante y se ubica el vidrio sobre la estructura del colector.
- o) Finalmente se trasladan y se ubican los colectores en el Laboratorio de Energías Renovables, en la terraza del Bloque “B” de la Universidad Técnica de Cotopaxi para las pruebas respectivas.



Fig. 34. Traslado de Colectores de doble y simple flujo al laboratorio de energías renovables ubicado en la terraza de la Universidad Técnica de Cotopaxi

2.6 Elementos eléctricos y electrónicos del colector: Una vez construida la parte estructural, instalamos los elementos que permiten la circulación de aire forzado y la toma de datos respectivamente. Para ello se colocaron los siguientes equipos:

- a) Instalación 1 de acometida a 110V~ para alimentación eléctrica de los equipos.
- b) Instalación 1 de soplador de aire (blower) acoplado en el tubo de PVC a la entrada de los colectores solares.



Fig. 35. Soplador y termistores del colector

Características técnicas (ANEXO 01):

Flujo máximo: $3,5 \text{ m}^3/\text{min} = 123,62 \text{ cfm} = 58,3 \text{ lt/s} = 0,0754 \text{ Kg/s}$

- c) Instalación de 1 módulo recolector de datos de temperatura y flujo de aire.



Fig. 36. Módulo recolector de datos del colector (ANEXO 03)

- d) Conexión de 1 anemómetro en la tarjeta del controlador, para medir el flujo másico de aire que circula a la salida de los colectores.



Fig. 37. Sensor Anemómetro

- e) Conexión de 20 termistores en la tarjeta del controlador, para medir la temperatura de entrada y salida de los colectores, así como las temperaturas internas de las placas y de la cubierta de vidrio.

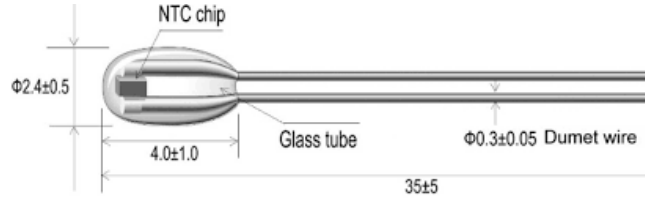


Fig. 38. Termistores para toma de datos de temperatura de los colectores [9]

- f) Calibración y pruebas de funcionamiento del módulo colector de datos.
- g) Monitoreo y toma de datos de temperatura y flujo másico de aire de los colectores de simple y doble flujo, durante los días 29-30 de junio y 5-7 de julio de 2023, desde las 07h00 hasta las 19h00.

Los datos tomados por el módulo colector son almacenados en una memoria extraíble tipo Tarjeta SD, mediante un archivo de texto básico *.TXT.

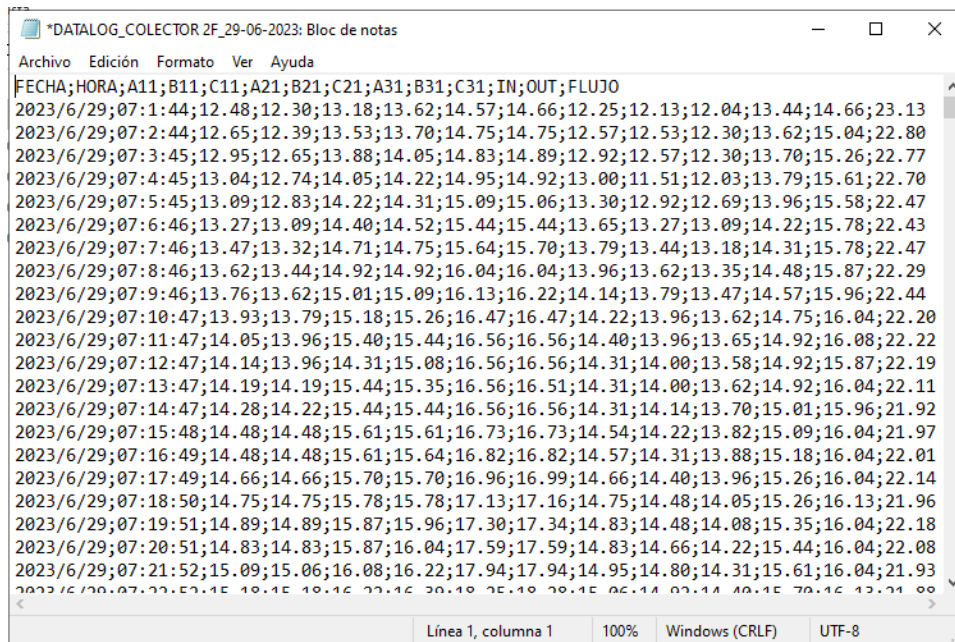


Fig. 39. Archivo *.TXT; datos de temperatura y flujo de aire del colector de doble flujo, correspondientes al 29/06/2023 desde las 07h00 hasta las 19h00.

Estos datos se los exporta a un archivo de Excel *.xlsx para facilitar su manejo.

Cabe indicar que, los datos que obtiene el módulo son recolectados cada minuto. Sin embargo, con fines ilustrativos se muestran los datos tomados con intervalos de cada media hora en la siguiente tabla:

Tabla 7: Datos de Temperatura y Flujo de Aire de los colectores solares de doble y simple flujo correspondientes al día 29/06/2023

| TIEMPO | | | | COLECTOR DOBLE FLUJO | | | | | | | | | | | | | COLECTOR SIMPLE FLUJO | | | | | | | | |
|--------|-----|------|-------|----------------------|----------------|-------|-------|----------------|-------|-------|--------|-------|-------|-----------|-----------|---------------------|-----------------------|-------|-------|--------|-------|-------|-----------|-----------|---------------------|
| | | | | °T AMB | PLACA INFERIOR | | | PLACA SUPERIOR | | | VIDRIO | | | °T ENT | °T SAL | FLUJO DE AIRE | PLACA ÚNICA | | | VIDRIO | | | °T ENT | °T SAL | FLUJO DE AIRE |
| | | | | | BAJO | MEDIO | ALTO | BAJO | MEDIO | ALTO | BAJO | MEDIO | ALTO | | | | BAJO | MEDIO | ALTO | BAJO | MEDIO | ALTO | | | |
| DÍA | MES | AÑO | HORA | AMB | A11 | B11 | C11 | A21 | B21 | C21 | A31 | B31 | C31 | IN | OUT | AIRE | A1 | B1 | C1 | A2 | B2 | C2 | IN | OUT | AIRE |
| 29 | 6 | 2023 | 7:00 | 11,20 | 12,48 | 12,30 | 13,18 | 13,62 | 14,57 | 14,66 | 12,25 | 12,13 | 12,04 | 11,20 | 13,94 | 23,13 | 14,31 | 14,31 | 14,14 | 14,48 | 12,30 | 12,42 | 11,20 | 14,14 | 22,31 |
| 29 | 6 | 2023 | 7:30 | 11,60 | 16,99 | 17,08 | 17,72 | 18,63 | 21,82 | 22,68 | 17,08 | 17,11 | 16,47 | 11,60 | 18,78 | 21,53 | 20,43 | 22,16 | 22,68 | 19,92 | 17,82 | 18,02 | 11,60 | 19,40 | 21,19 |
| 29 | 6 | 2023 | 8:00 | 12,30 | 22,08 | 22,25 | 24,43 | 24,30 | 33,37 | 36,01 | 22,86 | 23,47 | 23,82 | 12,30 | 25,02 | 20,10 | 24,56 | 31,66 | 33,75 | 23,95 | 23,12 | 24,08 | 12,30 | 23,90 | 20,42 |
| 29 | 6 | 2023 | 8:30 | 13,90 | 27,44 | 27,71 | 28,25 | 28,43 | 39,20 | 42,91 | 24,96 | 26,19 | 27,62 | 13,90 | 28,66 | 19,73 | 27,44 | 36,62 | 39,44 | 26,19 | 25,48 | 27,08 | 13,90 | 26,37 | 19,93 |
| 29 | 6 | 2023 | 9:00 | 13,90 | 23,90 | 23,73 | 22,34 | 22,81 | 26,46 | 26,95 | 19,96 | 20,18 | 20,18 | 13,90 | 22,54 | 20,42 | 23,73 | 26,24 | 25,79 | 22,68 | 20,87 | 21,21 | 13,90 | 21,95 | 20,47 |
| 29 | 6 | 2023 | 9:30 | 14,00 | 21,82 | 21,82 | 21,64 | 22,30 | 25,40 | 25,75 | 19,66 | 19,75 | 19,75 | 14,00 | 21,71 | 20,39 | 23,47 | 25,31 | 24,78 | 22,34 | 20,57 | 20,78 | 14,00 | 21,68 | 20,43 |
| 29 | 6 | 2023 | 10:00 | 14,30 | 22,86 | 22,90 | 23,29 | 24,34 | 28,98 | 29,43 | 21,13 | 21,47 | 21,38 | 14,30 | 23,36 | 20,23 | 25,13 | 28,29 | 27,66 | 23,77 | 21,99 | 22,34 | 14,30 | 23,12 | 20,43 |
| 29 | 6 | 2023 | 10:30 | 14,60 | 24,69 | 24,78 | 25,31 | 28,07 | 34,53 | 34,33 | 23,90 | 24,69 | 24,74 | 14,60 | 25,81 | 19,79 | 28,25 | 33,91 | 32,51 | 26,55 | 24,60 | 25,04 | 14,60 | 25,70 | 20,16 |
| 29 | 6 | 2023 | 11:00 | 16,60 | 29,89 | 30,12 | 27,62 | 27,35 | 31,75 | 32,70 | 23,82 | 24,87 | 25,00 | 16,60 | 27,32 | 19,34 | 28,07 | 30,91 | 30,49 | 26,24 | 24,87 | 25,53 | 16,60 | 25,66 | 19,99 |
| 29 | 6 | 2023 | 11:30 | 15,90 | 30,86 | 31,56 | 33,75 | 40,05 | 52,63 | 53,78 | 31,43 | 33,23 | 33,62 | 15,90 | 34,35 | 18,53 | 37,19 | 47,69 | 48,32 | 34,33 | 31,90 | 32,89 | 15,90 | 32,98 | 19,27 |
| 29 | 6 | 2023 | 12:00 | 17,30 | 33,27 | 33,85 | 31,75 | 32,60 | 39,73 | 40,91 | 27,17 | 28,66 | 28,61 | 17,30 | 31,32 | 19,07 | 32,41 | 37,63 | 37,29 | 29,80 | 28,20 | 29,25 | 17,30 | 29,07 | 19,63 |
| 29 | 6 | 2023 | 12:30 | 16,80 | 28,71 | 28,89 | 28,25 | 29,80 | 35,51 | 35,87 | 25,44 | 26,10 | 26,19 | 16,80 | 28,30 | 19,89 | 30,45 | 34,79 | 33,37 | 28,34 | 26,42 | 26,91 | 16,80 | 27,49 | 19,91 |
| 29 | 6 | 2023 | 13:00 | 17,40 | 30,45 | 30,63 | 28,61 | 29,48 | 35,02 | 35,32 | 25,13 | 25,93 | 26,02 | 17,40 | 28,39 | 19,48 | 30,08 | 33,95 | 32,98 | 27,98 | 25,97 | 26,46 | 17,40 | 27,04 | 20,15 |
| 29 | 6 | 2023 | 13:30 | 16,70 | 26,99 | 27,08 | 26,82 | 28,71 | 33,95 | 33,56 | 24,65 | 25,13 | 24,96 | 16,70 | 27,14 | 20,34 | 29,57 | 33,46 | 31,66 | 27,53 | 25,40 | 25,66 | 16,70 | 26,64 | 20,15 |
| 29 | 6 | 2023 | 14:00 | 17,10 | 27,17 | 27,17 | 26,15 | 26,73 | 30,72 | 31,00 | 23,38 | 23,77 | 23,64 | 17,10 | 26,16 | 20,24 | 27,62 | 30,17 | 29,48 | 26,28 | 24,25 | 24,52 | 17,10 | 25,48 | 20,07 |
| 29 | 6 | 2023 | 14:30 | 17,00 | 26,55 | 26,73 | 27,62 | 29,62 | 35,61 | 34,14 | 25,31 | 25,66 | 25,22 | 17,00 | 27,76 | 19,81 | 29,80 | 33,41 | 31,56 | 27,89 | 25,84 | 25,93 | 17,00 | 27,17 | 19,81 |
| 29 | 6 | 2023 | 15:00 | 17,20 | 25,22 | 25,26 | 25,79 | 28,16 | 32,79 | 30,72 | 24,43 | 24,60 | 24,17 | 17,20 | 26,12 | 20,33 | 29,02 | 33,08 | 29,34 | 27,44 | 25,75 | 25,93 | 17,20 | 26,73 | 19,52 |
| 29 | 6 | 2023 | 15:30 | 17,80 | 25,84 | 25,84 | 24,96 | 26,10 | 29,38 | 28,25 | 23,73 | 23,77 | 23,38 | 17,80 | 25,97 | 20,59 | 27,35 | 30,72 | 27,71 | 26,46 | 24,96 | 25,13 | 17,80 | 25,84 | 20,25 |
| 29 | 6 | 2023 | 16:00 | 16,80 | 25,13 | 25,13 | 24,56 | 25,13 | 28,52 | 27,17 | 22,68 | 22,77 | 22,68 | 16,80 | 24,58 | 20,78 | 26,46 | 28,39 | 26,99 | 25,57 | 23,64 | 23,64 | 16,80 | 24,87 | 20,42 |
| 29 | 6 | 2023 | 16:30 | 16,10 | 21,99 | 21,82 | 21,90 | 21,68 | 23,12 | 22,94 | 20,30 | 20,00 | 19,49 | 16,10 | 21,75 | 21,49 | 23,38 | 23,60 | 23,38 | 23,03 | 21,16 | 20,95 | 16,10 | 22,42 | 20,71 |
| 29 | 6 | 2023 | 17:00 | 15,70 | 19,83 | 19,75 | 19,83 | 19,40 | 20,00 | 20,04 | 18,20 | 17,85 | 17,34 | 15,70 | 19,56 | 22,25 | 21,47 | 21,21 | 21,08 | 21,30 | 19,14 | 18,97 | 15,70 | 20,69 | 21,11 |
| 29 | 6 | 2023 | 17:30 | 14,90 | 18,20 | 18,11 | 18,37 | 17,97 | 18,32 | 18,20 | 16,87 | 16,30 | 15,70 | 14,90 | 18,18 | 22,57 | 20,26 | 19,75 | 19,57 | 20,26 | 17,97 | 17,59 | 14,90 | 19,61 | 21,31 |
| 29 | 6 | 2023 | 18:00 | 14,20 | 17,08 | 16,96 | 17,34 | 16,82 | 16,90 | 16,82 | 15,99 | 15,44 | 14,92 | 14,20 | 17,15 | 22,83 | 19,11 | 18,37 | 18,33 | 19,06 | 17,13 | 16,73 | 14,20 | 18,45 | 21,71 |

Para el cálculo de la eficiencia térmica, previamente es necesario realizar la conversión de unidades del Flujo de Aire. El módulo colector de datos está programado para obtener los datos de Flujo de Aire en lt/s. Se requiere obtener el equivalente en Kg/s para lo cual se emplea el factor de conversión 0,0012928.

Una vez obtenidos los datos de Temperatura de los colectores y su respectivo flujo de aire, procedemos a calcular el rendimiento empleando las Ecuaciones (7) y (9), junto con los datos de las Tablas 5 y 7, obteniendo así la siguiente tabla de valores:

Tabla 8: Cálculo de la Eficiencia térmica de los colectores solares de doble y simple flujo correspondientes al día 29/06/2023

| Área del colector (m ²) | | 0,56 | COLECTOR DOBLE FLUJO | | | | | COLECTOR SIMPLE FLUJO | | | | |
|-------------------------------------|------------------|------------------|----------------------|--------|---------------|------|---------------------|-----------------------|--------|---------------|------|---------------------|
| Tiempo | Radiación Solar | Calor específico | °T ENT | °T SAL | FLUJO DE AIRE | | RENDIMIENTO TÉRMICO | °T ENT | °T SAL | FLUJO DE AIRE | | RENDIMIENTO TÉRMICO |
| Fecha / Hora | w/m ² | J/Kg K | °C | °C | l/s | Kg/s | adimensional | °C | °C | l/s | Kg/s | adimensional |
| 29/6/2023 7:00 | 40,50 | 1.006,00 | 11,20 | 13,94 | 23,13 | 0,03 | -0,57 | 11,20 | 14,14 | 22,31 | 0,03 | -1,49 |
| 29/6/2023 7:30 | 218,60 | 1.006,00 | 11,60 | 18,78 | 21,53 | 0,03 | 0,52 | 11,60 | 19,40 | 21,19 | 0,03 | 0,10 |
| 29/6/2023 8:00 | 182,60 | 1.006,00 | 12,30 | 25,02 | 20,10 | 0,03 | 0,80 | 12,30 | 23,90 | 20,42 | 0,03 | 0,46 |
| 29/6/2023 8:30 | 555,90 | 1.007,00 | 13,90 | 28,66 | 19,73 | 0,03 | 0,67 | 13,90 | 26,37 | 19,93 | 0,03 | 0,40 |
| 29/6/2023 9:00 | 569,70 | 1.007,00 | 13,90 | 22,54 | 20,42 | 0,03 | 0,62 | 13,90 | 21,95 | 20,47 | 0,03 | 0,23 |
| 29/6/2023 9:30 | 294,20 | 1.007,00 | 14,00 | 21,71 | 20,39 | 0,03 | 0,54 | 14,00 | 21,68 | 20,43 | 0,03 | 0,18 |
| 29/6/2023 10:00 | 381,90 | 1.007,00 | 14,30 | 23,36 | 20,23 | 0,03 | 0,50 | 14,30 | 23,12 | 20,43 | 0,03 | 0,25 |
| 29/6/2023 10:30 | 483,10 | 1.007,00 | 14,60 | 25,81 | 19,79 | 0,03 | 0,62 | 14,60 | 25,70 | 20,16 | 0,03 | 0,42 |
| 29/6/2023 11:00 | 617,80 | 1.007,00 | 16,60 | 27,32 | 19,34 | 0,03 | 0,83 | 16,60 | 25,66 | 19,99 | 0,03 | 0,37 |
| 29/6/2023 11:30 | 631,50 | 1.007,00 | 15,90 | 34,35 | 18,53 | 0,02 | 0,79 | 15,90 | 32,98 | 19,27 | 0,02 | 0,60 |
| 29/6/2023 12:00 | 527,20 | 1.007,00 | 17,30 | 31,32 | 19,07 | 0,02 | 0,60 | 17,30 | 29,07 | 19,63 | 0,03 | 0,32 |
| 29/6/2023 12:30 | 610,80 | 1.007,00 | 16,80 | 28,30 | 19,89 | 0,03 | 0,47 | 16,80 | 27,49 | 19,91 | 0,03 | 0,23 |
| 29/6/2023 13:00 | 1.043,80 | 1.007,00 | 17,40 | 28,39 | 19,48 | 0,03 | 0,57 | 17,40 | 27,04 | 20,15 | 0,03 | 0,29 |
| 29/6/2023 13:30 | 549,00 | 1.007,00 | 16,70 | 27,14 | 20,34 | 0,03 | 0,46 | 16,70 | 26,64 | 20,15 | 0,03 | 0,26 |
| 29/6/2023 14:00 | 504,40 | 1.007,00 | 17,10 | 26,16 | 20,24 | 0,03 | 0,49 | 17,10 | 25,48 | 20,07 | 0,03 | 0,18 |
| 29/6/2023 14:30 | 554,80 | 1.007,00 | 17,00 | 27,76 | 19,81 | 0,03 | 0,34 | 17,00 | 27,17 | 19,81 | 0,03 | 0,17 |
| 29/6/2023 15:00 | 361,80 | 1.007,00 | 17,20 | 26,12 | 20,33 | 0,03 | 0,47 | 17,20 | 26,73 | 19,52 | 0,03 | 0,28 |
| 29/6/2023 15:30 | 374,90 | 1.007,00 | 17,80 | 25,97 | 20,59 | 0,03 | 0,51 | 17,80 | 25,84 | 20,25 | 0,03 | 0,23 |
| 29/6/2023 16:00 | 720,20 | 1.007,00 | 16,80 | 24,58 | 20,78 | 0,03 | 0,26 | 16,80 | 24,87 | 20,42 | 0,03 | 0,11 |
| 29/6/2023 16:30 | 140,10 | 1.007,00 | 16,10 | 21,75 | 21,49 | 0,03 | 0,20 | 16,10 | 22,42 | 20,71 | 0,03 | -0,10 |
| 29/6/2023 17:00 | 93,30 | 1.007,00 | 15,70 | 19,56 | 22,25 | 0,03 | -0,38 | 15,70 | 20,69 | 21,11 | 0,03 | -0,89 |
| 29/6/2023 17:30 | 33,70 | 1.007,00 | 14,90 | 18,18 | 22,57 | 0,03 | -1,73 | 14,90 | 19,61 | 21,31 | 0,03 | -2,66 |
| 29/6/2023 18:00 | 21,60 | 1.007,00 | 14,20 | 17,15 | 22,83 | 0,03 | -8,64 | 14,20 | 18,45 | 21,71 | 0,03 | -10,83 |

2.7 Conclusiones del Capítulo II:

- En la construcción del colector solar de doble flujo de dimensiones 1060mm x 560mm x 260mm y del colector solar de simple flujo de dimensiones 1060mm x 560mm x 130mm, se utilizó placas absorbedoras planas de aluminio de dimensiones 1000mm x 500mm x 1,5mm tratadas con pintura electroestática de color negro. Para el aislamiento térmico se utilizó espuma de poliuretano con una conductividad térmica de 0,020 W/m K, lo que permitió una mejor conservación de la Temperatura Interna de los colectores.
- Para que el Rendimiento Térmico de los colectores sea efectivo, es decir que sus valores sean mayores a cero, se requirió una Radiación Solar de 202,0 W/m² para el caso del colector de simple flujo y una Radiación Solar de 132,2 W/m² para el caso del colector de doble flujo. Valores inferiores a la Radiación indicada, dan como resultado valores de Rendimiento negativos, es decir, el colector solar, en lugar de calentar el aire, tiende a enfriarlo, por lo que dichos valores no fueron considerados para el cálculo del Rendimiento Térmico.
- Los valores de Rendimiento Térmico Efectivo se obtuvieron entre las 07h20 y 16h39 para el caso del colector de doble flujo y entre las 07h25 y 16h08 para el caso del colector de simple flujo; es decir se tiene un mayor rango de tiempo de Rendimiento Térmico Efectivo para el caso del colector de doble flujo y un rango menor para el colector de simple flujo.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Introducción: En los capítulos que anteceden se describen los principios del funcionamiento de los colectores solares, expresiones matemáticas para el cálculo del rendimiento térmico, rendimiento de colectores de doble flujo, colector solar con absorbente de placas planas, entre otros conocimientos fundamentales; el objetivo de este capítulo es analizar el rendimiento térmico de un colector solar de doble flujo con placas planas y comparar los datos obtenidos con los datos de un colector de simple flujo de placa plana.

El alcance del capítulo 3 consiste en evaluar los resultados obtenidos mediante una comparación de datos y curvas, verificar los fundamentos de cálculo presentados procediendo con la interpretación de las irregularidades observadas en la toma de datos que nos llevarán a las respectivas conclusiones a satisfacción de la necesidad planteada.

3.2 Análisis comparativo de Temperaturas del colector de doble flujo: Para entender el comportamiento del colector de doble flujo, con respecto a sus Temperaturas de Trabajo, se realiza la siguiente gráfica, en donde se indican las Temperaturas de Entrada, Temperaturas de Placa Superior e Inferior, Temperaturas de Salida y Temperaturas de Medio Ambiente, mismas que fueron tomadas el día 29 de junio del año 2023, desde las 07h00 hasta las 18h00, durante 11 horas de manera consecutiva.

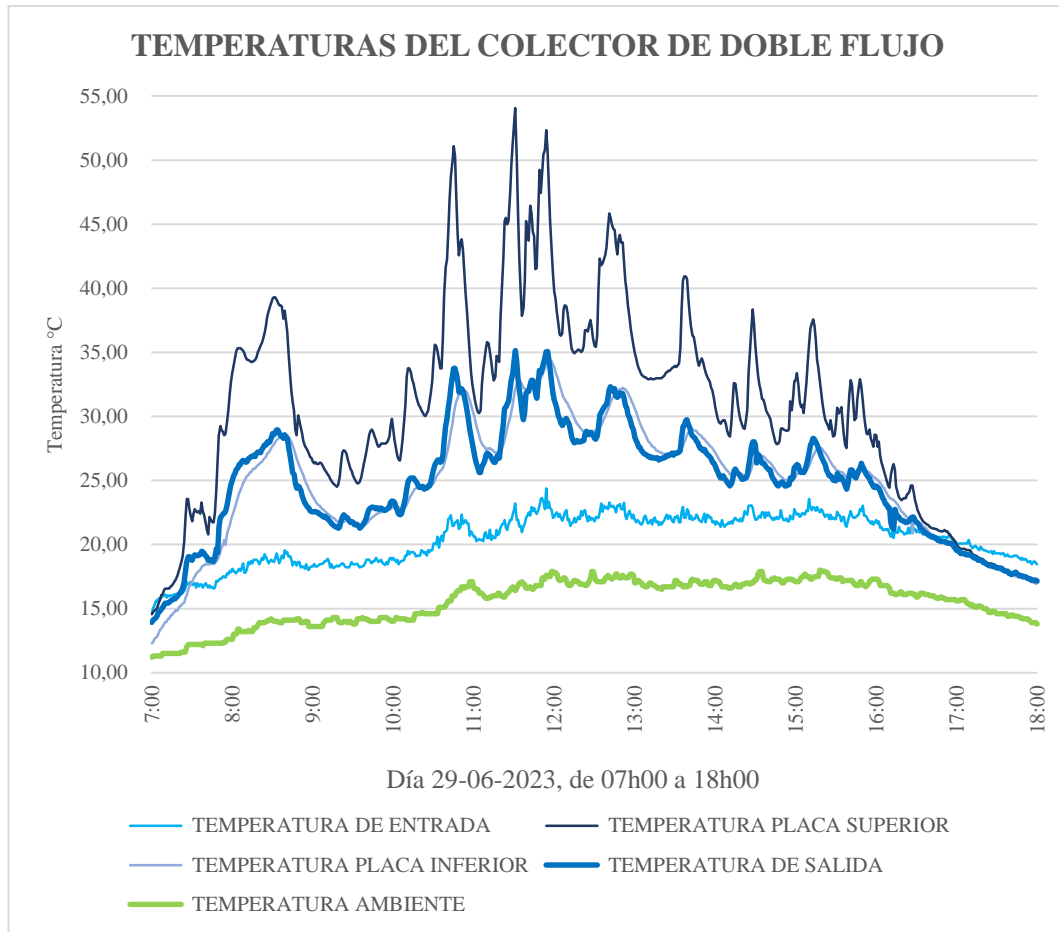


Fig. 40. Temperaturas del colector de doble flujo

En la Fig. 40 se puede observar que la curva con mayores valores de Temperatura corresponde a la Placa Superior. La Temperatura de Entrada es la curva con menores valores respecto a las demás Temperaturas internas del colector. Así mismo se puede apreciar que la Temperatura de Salida se encuentra comprendida entre los valores de la Temperatura de Placa y la Temperatura de Entrada al colector.

El máximo valor de Temperatura de Placa del colector de doble flujo es de 54,07°C, mismo que se registra a las 11h31 del día 29-06-2023; así mismo el mínimo valor de Temperatura de Placa es de 14,57, mismo que se registra a las 07h00.

En el colector de doble flujo, la Temperatura promedio de la placa superior es de 30,50°C, mientras que el valor promedio de Temperatura de la placa inferior es de 24,79 °C.

La curva de valores de Temperatura de Entrada al colector es paralela a la curva de Temperatura Ambiental, pero con una diferencia promedio de 4,89°C

3.3 Análisis comparativo de Temperaturas del colector de simple flujo: Para entender el comportamiento del colector de simple flujo, con respecto a sus Temperaturas de Trabajo, se realiza la siguiente gráfica, en donde se indican las Temperaturas de Entrada, Temperaturas de Placa Única, Temperaturas de Salida y Temperaturas de Medio Ambiente.

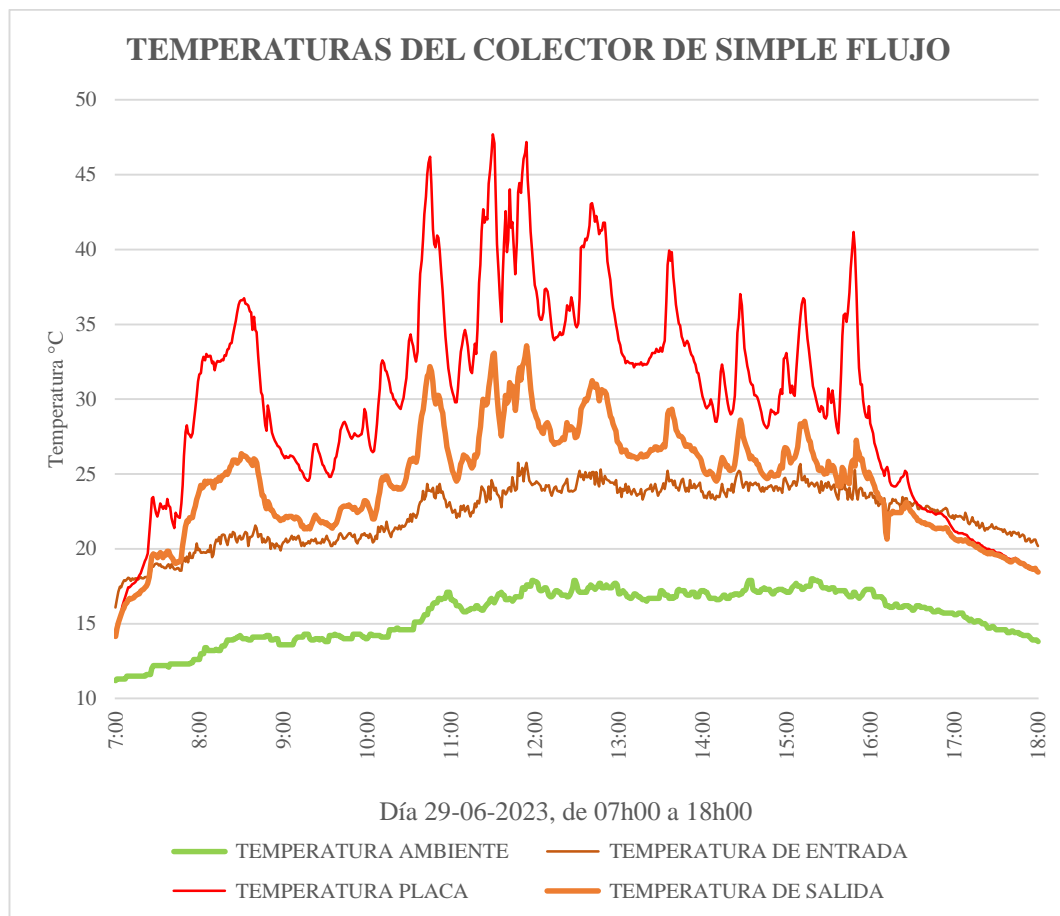


Fig. 41. Temperaturas del colector de simple flujo

En la Fig. 41 se puede observar que la curva con mayores valores de Temperatura corresponde a la Placa Única del colector. La Temperatura de Entrada es la curva con menores valores respecto a las demás Temperaturas internas del colector. Así mismo se puede apreciar que la Temperatura de Salida se encuentra comprendida entre los valores de la Temperatura de Placa y la Temperatura de Entrada al colector.

El Máximo valor de Temperatura de Placa del colector de simple flujo es de 47,69°C, mismo que se registra a las 11h30 del día 29-06-2023; así mismo el Mínimo valor de Temperatura de Placa es de 14,31°C, registrado a las 07h00.

La Temperatura promedio de placa es de 30,07°C.

La curva de valores de Temperatura de Entrada al colector es paralela a la curva de Temperatura Ambiental, pero con una diferencia promedio de 6,86°C

3.4 Análisis comparativo de Temperaturas de los colectores de simple y doble flujo: Con fines comparativos, empleando la Tabla 7, se elabora una gráfica que permita analizar los datos de Temperatura de Salida del colector de doble flujo versus el colector de simple flujo, junto con la curva de datos de Temperatura Medio Ambiental, correspondientes al día 29/06/2023; así tenemos:

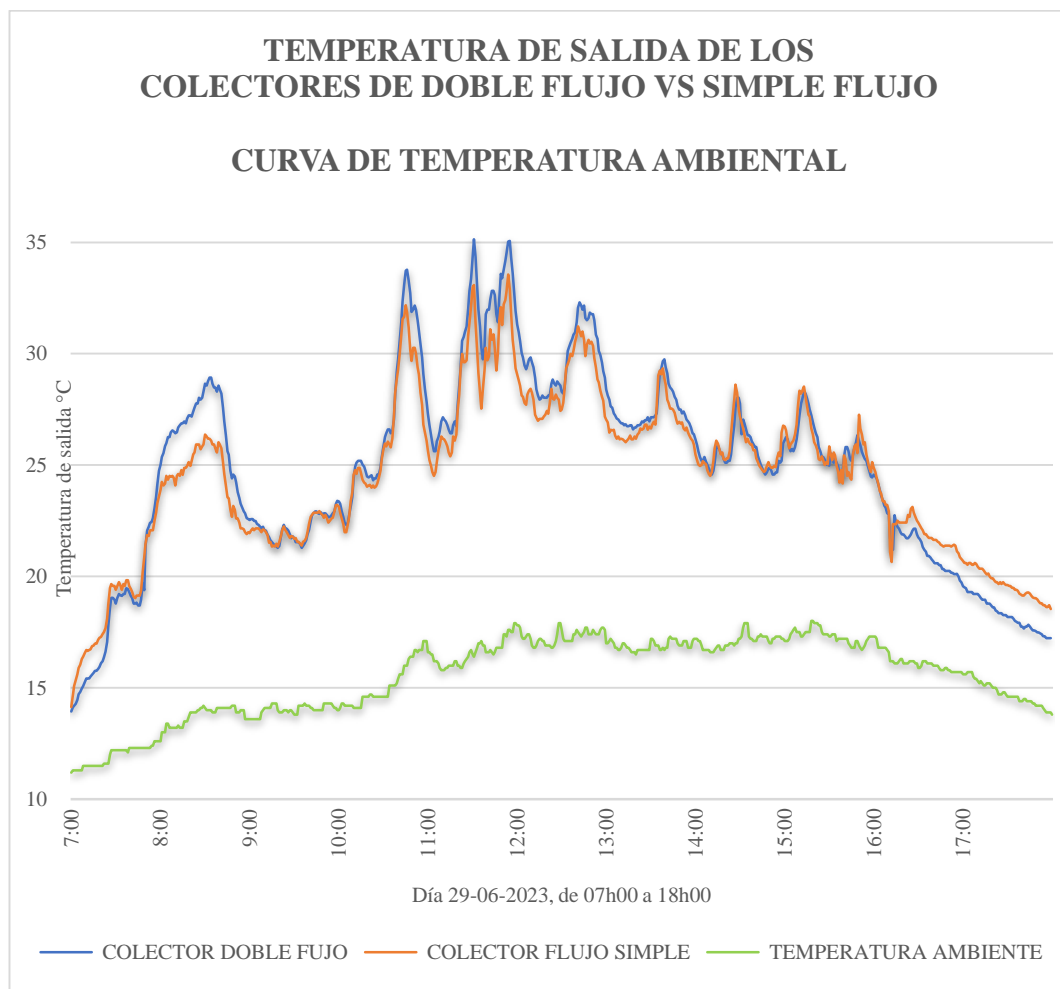


Fig. 42. Temperatura de Salida del colector de doble flujo vs el colector de simple flujo y Temperatura Ambiente

Se puede apreciar que existen zonas en las cuales el colector de simple flujo produce una mayor temperatura de salida que el colector de doble flujo, sin embargo, el colector de doble flujo posee un rango mayor de temperaturas más elevadas que el colector de simple flujo.

Para el colector de doble flujo, se aprecia una Máxima Temperatura de Salida de $35,13^{\circ}\text{C}$ a las 11h31, y una Mínima Temperatura de Salida de $13,94^{\circ}\text{C}$ registrada a las 07h00.

Para el colector de simple flujo, se aprecia una Máxima Temperatura de Salida de $33,56^{\circ}\text{C}$ a las 11h54, y una Mínima Temperatura de Salida de $14,14^{\circ}\text{C}$ registrada a las 07h00.

La máxima temperatura ambiental registrada por la estación meteorológica es de 18°C registrada a las 15h14; la temperatura mínima registrada es de $11,2^{\circ}\text{C}$ a las 07h00. La curva de temperatura medio ambiental, tiene similar tendencia a las curvas de Temperatura de Salida de los colectores, aunque se muestra con mayor tendencia lineal.

La Temperatura de Salida Promedio del colector de doble flujo en el día y horario indicados en el presente análisis, es $24,79^{\circ}\text{C}$ y $24,49^{\circ}\text{C}$ para el caso del colector de simple flujo.

La Temperatura de Entrada de los colectores es aproximadamente $2,8^{\circ}\text{C}$ mayor a la Temperatura Ambiental, esto al inicio de la toma de datos, es decir a las 07h00; al finalizar el experimento, se tiene una diferencia aproximada de temperaturas de $4,6^{\circ}\text{C}$.

La diferencia entre la Temperatura Máxima de Salida del colector de doble flujo y la Temperatura Máxima Ambiental es de $17,13^{\circ}\text{C}$. Para el caso del colector de simple flujo, la diferencia de Temperaturas es de $15,56^{\circ}\text{C}$.

Empleando la Tabla 7, se elabora una gráfica que permita analizar los datos de Temperatura de Salida del colector de doble flujo versus el colector de simple flujo, junto con la curva de datos de Radiación Solar, correspondientes al día 29/06/2023; así tenemos:

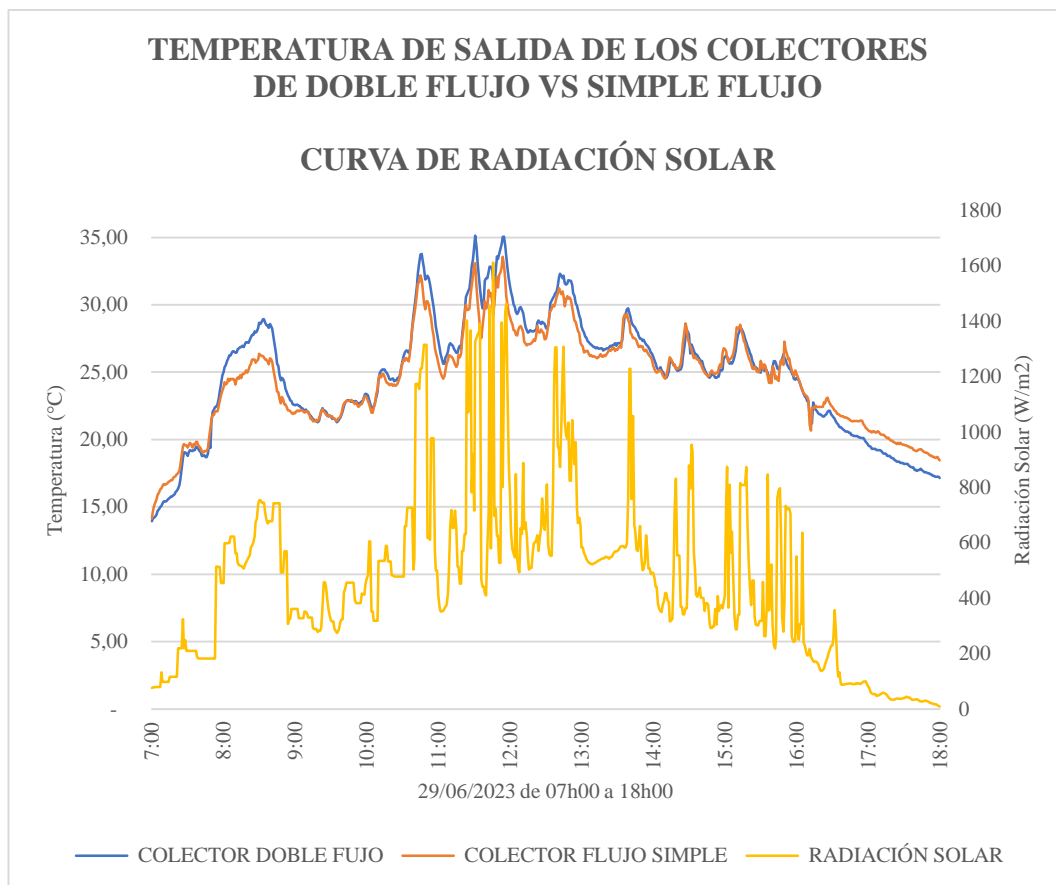


Fig. 43. Temperatura de Salida del colector de doble flujo vs el colector de simple flujo y Temperatura Ambiente

Se aprecia una Radiación Solar Máxima de $1612,4 \text{ W/m}^2$ a las 11h46 y una Radiación Solar Mínima de $9,0 \text{ W/m}^2$ a las 18h00.

Los valores de Temperatura de Salida de los colectores se elevan conjuntamente según el aumento de Radiación Solar y de la misma manera, la Temperatura de Salida desciende si la Radiación Solar disminuye, lo cual indica que la Radiación Solar tiene incidencia directa en el comportamiento de los colectores.

La Radiación Solar Promedio, registrada durante el día 29/06/2023, entre las 07h00 y las 18h00 fue de $461,76 \text{ W/m}^2$.

3.5 Análisis comparativo del rendimiento de los colectores de simple y doble flujo vs Radiación Solar: Con los datos obtenidos de Eficiencia Térmica, se elabora un gráfico para realizar un análisis comparativo entre ambos colectores, junto con los valores de Radiación Solar de la Tabla 8.

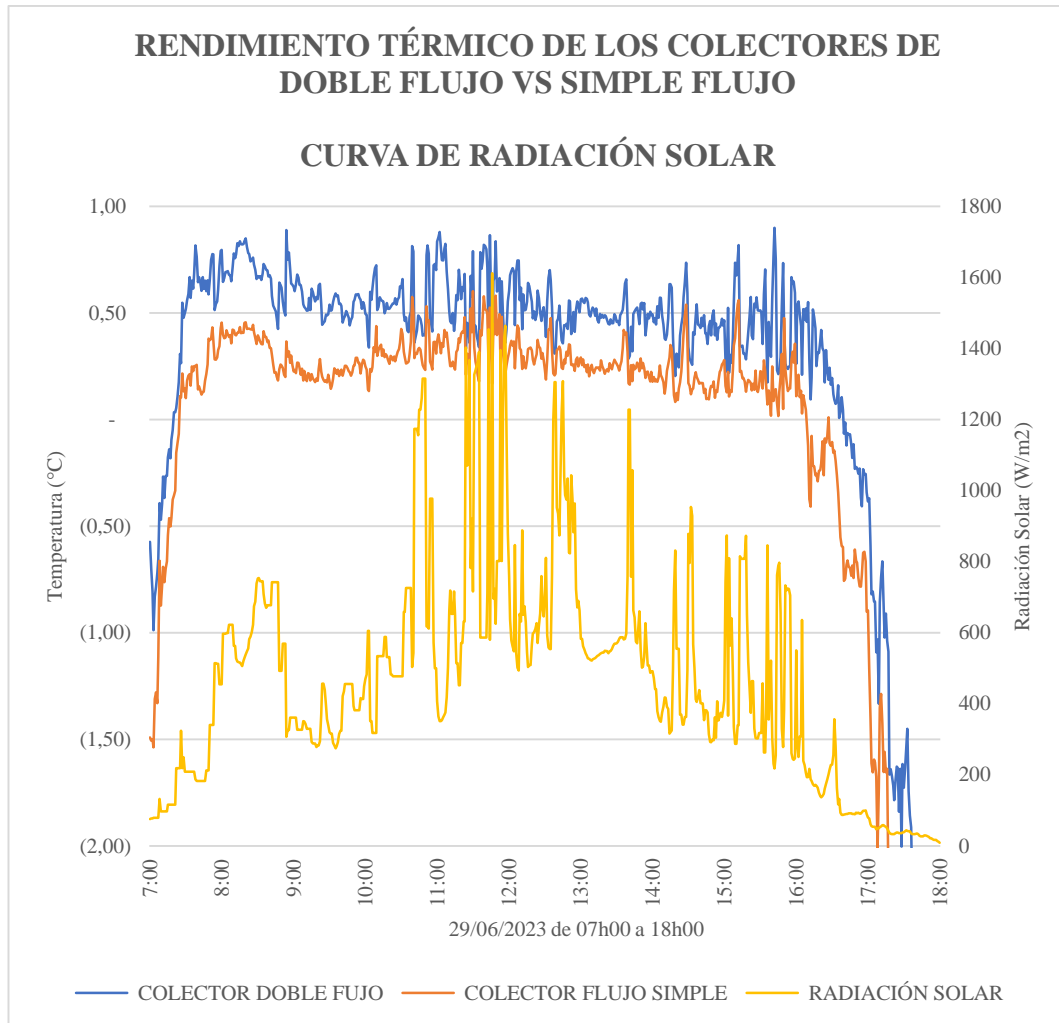


Fig. 44. Eficiencia térmica del colector doble flujo y simple flujo vs Radiación Solar

El Rendimiento Térmico Efectivo, se obtiene entre las 07h20 y 16h39 para el caso del colector de doble flujo y entre las 07h25 y 16h08 para el caso del colector de simple flujo; es decir se tiene un mayor rango de tiempo de Rendimiento Térmico Efectivo para el caso del colector de doble flujo y un rango menor para el colector de simple flujo.

3.6 Análisis comparativo del rendimiento de los colectores de simple y doble flujo: Con los datos obtenidos del Rendimiento Térmico de la Tabla 8, se elabora un gráfico para realizar un análisis comparativo entre ambos colectores, en función de la Radiación Solar (W/m^2).

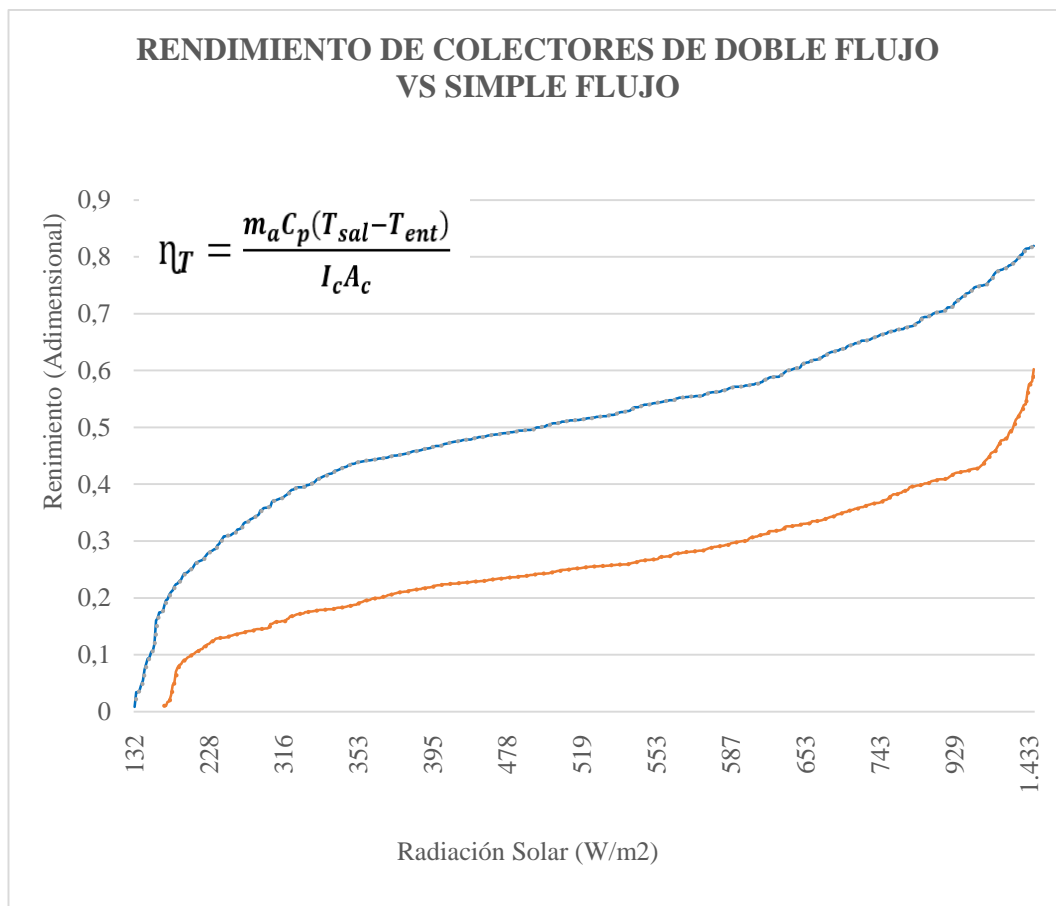


Fig. 45. Eficiencia térmica del colector doble flujo vs simple flujo

La Curva de color azul, que representa al colector de doble flujo, muestra un mayor Rendimiento Térmico Máximo (0,81) que la curva de color rojo (0,61) que representa al colector de simple flujo.

El Rendimiento Térmico Promedio del colector solar de doble flujo es de 0,51, mientras que, para el caso del colector de simple flujo, es de 0,27.

Se puede observar que la Radiación Solar influye directamente sobre la eficiencia de los colectores solares, es decir a mayor cantidad de Radiación se tendrá un mayor Rendimiento Térmico de los colectores y viceversa.

El colector de doble flujo requiere un menor valor de Radiación Solar (132 W/m²) que el colector de simple flujo (183W/m²); esto para empezar a obtener valores de Rendimiento Efectivo. Dicho comportamiento fue evaluado con un flujo de aire de (20 ~ 21)lt/s.

Se puede observar que la curva de color azul, correspondiente al colector de doble flujo, tiene un mejor Rendimiento Térmico Promedio (51%) que el colector de simple flujo (27%), comprobando así la hipótesis planteada inicialmente.

3.7 Conclusiones del Capítulo III

- Los colectores de doble flujo de placa plana son térmicamente más eficientes que los colectores de simple flujo, obteniéndose como Rendimiento Térmico Promedio 51% para el caso del colector de doble flujo y 27% para el caso del colector de simple flujo.
- La curva de valores de Temperatura de Entrada es paralela a la curva de Temperatura Ambiental, pero con una diferencia promedio de 4,89°C para el caso del colector de doble flujo y de 6,86 para el caso del colector de simple flujo.
- Los valores de Temperatura de Salida del colector solar de doble flujo tienden a ser mayores a los valores de Temperatura de Salida del colector solar de simple flujo, sobre todo con altos valores de Radiación Solar, superiores a 1200 W/m².
- El tiempo de Rendimiento Térmico Efectivo del colector solar de doble flujo es 36 minutos mayor que el colector de simple flujo.
- La Radiación Solar tiene incidencia directa en el comportamiento de los colectores, es decir a mayor cantidad de Radiación Solar se obtendrá una mayor Temperatura de Salida del colector y viceversa.

CONCLUSIONES

- En la construcción del colector solar de doble flujo de dimensiones 1060mm x 560mm x 260mm y del colector solar de simple flujo de dimensiones 1060mm x 560mm x 130mm, se utilizó placas absorbedoras planas de aluminio de dimensiones 1000mm x 500mm x 1,5mm tratadas con pintura electroestática de color negro. Para el aislamiento térmico se utilizó espuma de poliuretano con una conductividad térmica de 0,020 W/m K, lo que permitió una mejor conservación de la Temperatura Interna de los colectores.
- Con una Radiación Solar Promedio de 461,76 W/m² y Temperatura Ambiental Promedio de 15,53 °C se pudo obtener valores de Temperatura de Salida de hasta 35,13°C con el colector de doble flujo y hasta 33,56°C en el caso del colector de simple flujo, con lo cual se obtuvo un Rendimiento Térmico Promedio del 51% y 27% para los colectores de doble y simple flujo, respectivamente.
- El colector de placas planas de doble flujo es 24% más eficiente que el colector de placa plana de simple flujo respecto a su Rendimiento Térmico, conforme a la hipótesis planteada y al marco teórico de la investigación del presente proyecto.
- El Rendimiento Térmico Efectivo del colector de doble flujo tiene un rango de tiempo de 9h, 19min, mientras que para el colector de simple flujo es de 8h, 43 min, es decir el colector de doble flujo tiene 36 min más de tiempo de Rendimiento Térmico Efectivo, que el colector de simple flujo.
- La Radiación Solar Máxima registrada durante la toma de datos, fue de 1612,4 W/m², punto en el cual se obtuvo el mejor Rendimiento Térmico de 81%, registrado por el colector solar de doble flujo. Mayores índices de Radiación Solar contribuyen a un mejor Rendimiento Térmico de los colectores solares, pues ésta es su fuente de energía.
- Para que el Rendimiento Térmico de los colectores sea efectivo, es decir que sus valores sean mayores a cero, se requirió una Radiación Solar de 202,0

W/m² para el caso del colector de simple flujo y una Radiación Solar de 132,2 W/m² para el caso del colector de doble flujo. Valores inferiores a la Radiación indicada, dan como resultado valores de Rendimiento negativos, es decir, el colector solar, en lugar de calentar el aire, tiende a enfriarlo, por lo que dichos valores no fueron considerados para el análisis respectivo.

RECOMENDACIONES

- Realizar un análisis térmico comparativo empleando colectores con placas corrugadas, colectores de doble flujo de sentido paralelo. Evaluar su Eficiencia Térmica con circulación de aire forzado y flujo variable.
- El material aislante utilizado en la construcción de los colectores permite una conductividad térmica de 0,020 W/m K sin embargo, se podría emplear espuma de poliuretano inyectada, que permitiría una conductividad térmica de 0,028 W/m K.
- Utilizar un UPS o un regulador de voltaje en la alimentación eléctrica que ayude a contrarrestar caídas de voltaje o cortes de energía que puedan afectar la toma de datos continua del módulo colector.
- Para mejores resultados en análisis comparativo de equipos, es necesario estandarizar los elementos del equipamiento a ser implementado en los colectores, ya que esto aumentará la confiabilidad de los resultados.
- Cerciorarse que el módulo colector de datos y la estación meteorológica se encuentren calibradas y sincronizadas en tiempo y espacio, para que la toma de datos sea precisa y se pueda obtener un análisis de datos asertivo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Quiñonez, “Investigación experimental de un calentador solar de aire de doble flujo de convección natural de alta eficiencia”. *Scielo. Revista de investigaciones Altoandinas*, vol. 21, no. 4, diciembre 2019.
<https://orcid.org/0000-0003-1966-2146>
- [2] A. Agrawal., N. Deshpande., y A. Dubey, “Design, fabrication & performance analysis of solar air heater”, Bhopal India, 2011.
[http://www.eai.in/ref/invent/upload/ICAER2011%20\(2\).pdf](http://www.eai.in/ref/invent/upload/ICAER2011%20(2).pdf)
- [3] Y. Rodríguez., Y. Morejón, “Simulación de secadores solares tipo gabinete en función del colector solar y el conducto de extracción”, *Revista Ingeniería Agrícola*, vol. 10, no. 1, marzo 2020, pp. 33-38.
<https://www.redalyc.org/jatsRepo/5862/586262449006/586262449006.pdf>
- [4] N. A. Flores, “Evaluación de la eficiencia térmica de un colector solar de tubos evacuados para aire de secado”, Tesis de pregrado Ingeniería Química, Sonora, 2018.
<http://148.225.114.121/bitstream/unison/1460/1/floresmontijonoeartil.pdf>
- [5] E. G. Sastoque., y F. M. Ortiz, “Revisión del estado del arte de la determinación experimental del rendimiento térmico de colectores solares de baja temperatura”. Tesis de Pregrado de Ingeniería Mecánica, FULL, Bogotá, 2018.
<https://repository.libertadores.edu.co/bitstream/handle/11371/1566/sastoquedicson2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [6] p. Flores., E. Corrales., E. Riveros., S. Bentura., C. Pedemonte., y J. Milon, “Determinación de la eficiencia y el coeficiente total de pérdidas del colector de placa plana de 2m², utilizando un banco de pruebas según la ntp 399.400 en Arequipa”, *Scielo*, vol. 30, no. 1, marzo 2020.
<http://www.scielo.org.pe/pdf/tecnia/v30n1/2309-0413-tecnia-30-01-66.pdf>

- [7] D. A. Arguello, “Colector solar térmico, con aire de superficie plana para calefacción y ventilación de áreas internas en viviendas y edificios”, Tesis maestría ecoeficiencia industrial – mención en eficiencia energética, UISEK, Quito, 2020.
<https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/3740/1/DAVID%20ALEJANDRO%20ARGUELLO%20BRAVO.pdf>
- [8] M. Loureiro, “Colectores de placa plana”, Tesis pregrado, Colombia, 2018.
<http://www.marioloureiro.net/ciencia/EnerSolarTermica/SolarPROCESOSTERMO/Solar3%20.pdf>
- [9] Kalogirou, S.A. Solar thermal collectors and applications. Progress in Energy and Combustion Science. Vol. 30, pp. 231-295, 2004.
- [10] M. Xavier Remache Sasig, “Análisis comparativo del rendimiento térmico entre un colector solar de placa plana y la adhesión de aletas,” 2021.
- [11] I. Edison, “Análisis comparativo del rendimiento térmico de un colector solar de placa plana con la variación de altura en la superficie colectora,” 2021.
- [12] Albarracín Álvarez Mauro Darío “Análisis comparativo del rendimiento térmico de un colector solar de placa plana variando el tipo de vidrio en la cubierta.” 2022
- [13] World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Energy and Power Engineering. “Exergy Based Performance Analysis of Double Flow Solar Air Heater with Corrugated Absorber” Vol:11, No:12, 2017
- [14] M. Lozano, “Colectores solares térmicos”, *Researchgate*, Zaragoza, abril 2019. https://www.researchgate.net/profile/Miguel-Lozano-6/publication/338254329_COLECTORES_SOLARES_TERMICOS/links/5e0b15144585159aa4a70b59/COLECTORES-SOLARES-TERMICOS.pdf

- [15] A. E. Ávila., J. M. Mendoza., J. F. Beltrán, “Evaluación energética de un colector solar de placa plana de doble cubierta”, *Scielo, Ingeniería y desarrollo*, vol. 6, no. 27, pp. 93-112, junio 2010.
<http://www.scielo.org.co/pdf/inde/n27/n27a06.pdf>
- [16] C. A. Echeverría, “Diseño de un colector cilindro parabólico compuesto con aplicación para el calentamiento de agua”, Tesis de Ingeniería Mecánica, Piura, 2011.
https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1389/IME_159.pdf
- [17] Gupta, M.K., Kaushik, S.C. Exergetic performance evaluation and parametric studies of solar air heater. *Energy*. Vol. 33, pp. 1691-1702, 2008.
- [18] I. R. Martín, “Distribución de flujos en sistemas de colectores solares planos interconectados”, *Academia de Ingeniería en México*, D.F., 2008.
<http://www.ai.org.mx/ai/archivos/coloquios/4/Distribucion%20de%20Flujos%20en%20Sistemas%20de%20Colectores%20Solares%20Planos%20Interconectados.pdf>
- [19] M. Terrón, “Estudio teórico experimental de un receptor de calor con aletas acoplado a un concentrador parabólico compuesto”, Tesis doctorado en ciencias en Energía Renovable, Yucatán, 2018.
https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/1444/1/PCER_D_Tesis_2018_Miguel_Terron_Hernandez.pdf
- [20] Baritto, M. y Bracamonte, J. A dimensionless model for the outlet temperatura of flate plate solar collectors for air heating. *Solar Energy Journal*. Vol 86. pp 647-653. 2012.
- [21] A. G. Mora, “Dimensionamiento, construcción y puesta en marcha de un Sistema de secado de granos de café con uso de colectores solares”. Informe de graduación, UCR, San José, CR. 2014.
<http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/3501/1/3617.pdf>

- [22] A. M. De la Rosa, “Comparativo entre dos tipos diferentes de materiales económicos para la construcción de calentadores solares”, Tesis de Pregrado, UAAAN, Torreón, Coahuilla, 2012.
- [23] A. G. Mora, “Dimensionamiento, construcción y puesta en marcha de un Sistema de secado de granos de café con uso de colectores solares”. Informe de graduación, UCR, San José, CR. 2014.
<http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/3501/1/36174.pdf>
- [24] H. H. Manchena, y J. W. Vicente, “Diseño de un secador de café mediante colectores solares para el distrito de la coipa, san Ignacio Cajamarca”, Tesis Pregrado, UNJ, San Ignacio de Cajamarca, 2020.
http://repositorio.unj.edu.pe/bitstream/handle/UNJ/350/Marchena_QHH_Vicente_VJW.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [25] P. Maupoey, A. André, J. Barat, A. Albors, “Introducción al secado de alimentos por aire caliente”, UPV, Valencia, España, 2001.
https://gdocu.upv.es/alfresco/service/api/node/content/workspace/SpacesStore/e8b523c5-4970-4ae6-b2a3-86f576e81359/TOC_4092_02_01.pdf?guest=true
- [26] G. Z. Castro, “Modelo predictivo de las pérdidas de calor de la cubierta de vidrio de un colector solar de placa plana”, Tesis de Pregrado, UNAM, México, 2014.
https://www.zaragoza.unam.mx/wp-content/Portal2015/Licenciaturas/iq/tesis/tesis_castro_zaragoza.pdf
- [27] ANSI-ASHRAE 93-2003, Methods of testing to determine the thermal performance of solar collectors.
- [28] D. A. Arguello, “Colector solar térmico, con aire de superficie plana para calefacción y ventilación de áreas internas en viviendas y edificios”, Tesis maestría ecoeficiencia industrial – mención en eficiencia energética, UISEK, Quito, 2020.

<https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/3740/1/DAVID%20ALEJANDRO%20ARGUELLO%20BRAVO.pdf>

- [29] Alam, T., y Kim, M.-H. (2017). Performance improvement of double-pass solar air heater – A state of art of review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 779-793.
http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S2313-29572019000400005&script=sci_arttext
- [30] Forson, F. K., Nazha, M. A. A., y Rajakaruna, H. (2003). Experimental and simulation studies on a single pass, double duct solar air heater. *Energy Conversion and Management*, 44(8), 1209–1227
- [31] L. Cantos., J. J. González., A. Menéndez, “Análisis paramétrico del desempeño térmico de calentadores solares planos de aire de circulación forzada”, *Scielo, Ingeniería Mecánica*, vol. 21, no. 3, diciembre 2018.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59442018000300153

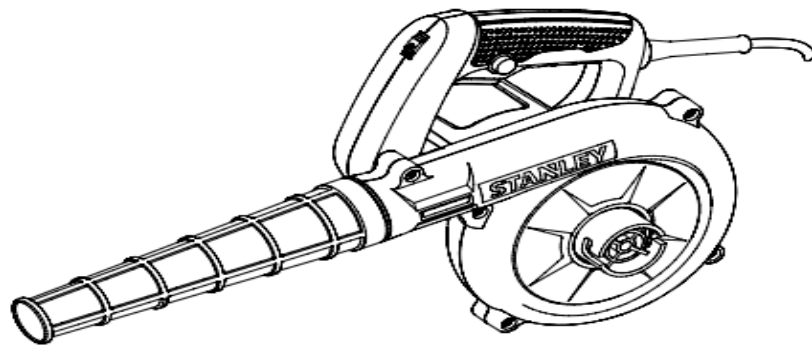
ANEXOS

ANEXO 01: Hoja de datos técnicos del Soplador Stanley STPT600

STANLEY®

Sopladora/Aspiradora de Velocidad Variable
Soprador/Aspirador de Velocidade Variável
Variable Speed Blower/Vacuum

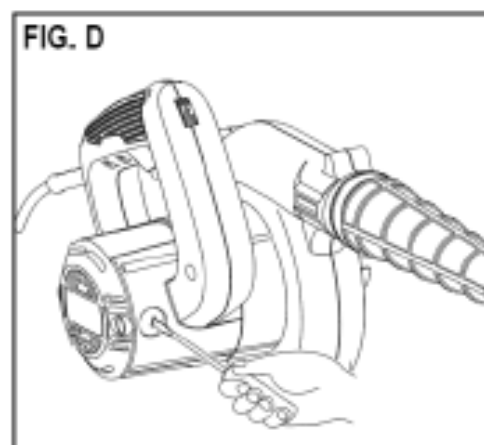
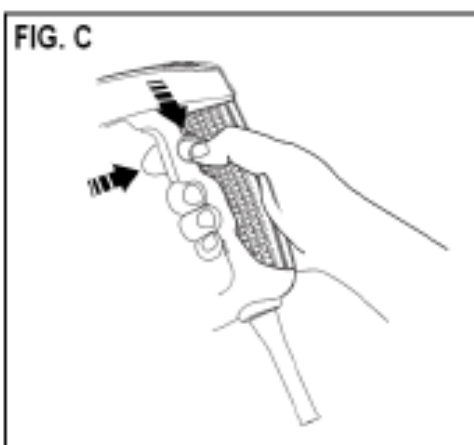
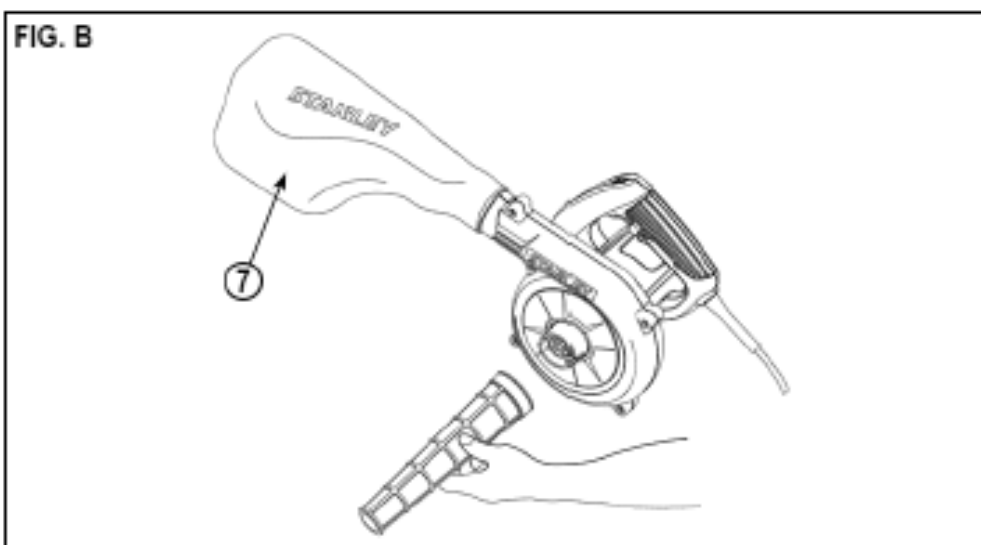
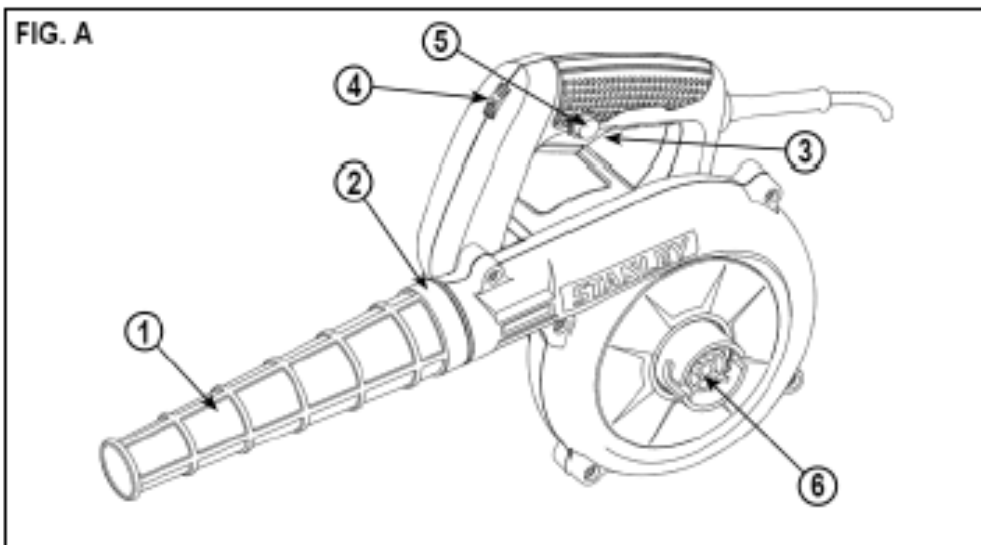
STPT600



| | |
|-----------|---|
| Español | 3 |
| Português | 6 |
| English | 9 |

MANUAL DE INSTRUCCIONES MANUAL DE INSTRUÇÕES INSTRUCTION MANUAL

**ADVERTENCIA: LEA ESTE INSTRUCTIVO ANTES DE USAR EL PRODUCTO.
ADVERTÊNCIA: LEIA ESTAS INSTRUÇÕES ANTES DE USAR O PRODUTO.
WARNING: READ INSTRUCTION MANUAL BEFORE USING PRODUCT.**



NO DEVUELVA ESTE PRODUCTO A LA TIENDA, comuníquese antes a las oficinas locales o con el Centro de Servicio STANLEY más cercano a usted.

CONSERVE ESTAS INSTRUCCIONES

⚠ ¡Advertencia! Lea todas las instrucciones antes de operar el producto. El incumplimiento de todas y cada una de las instrucciones enumeradas a continuación puede provocar una descarga eléctrica, un incendio o lesiones graves.

NORMAS GENERALES DE SEGURIDAD



INSTRUCCIONES DE SEGURIDAD
Advertencias de seguridad generales para herramientas eléctricas.

¡Atención! Lea todas las advertencias e instrucciones de seguridad. En caso de no respetarse las advertencias e instrucciones indicadas a continuación, podría producirse una descarga eléctrica, incendio y/o lesión grave.

Conserve todas las advertencias e instrucciones para su posterior consulta. El término empleado en las advertencias indicadas a continuación se refiere a la herramienta eléctrica con alimentación de red (con cable) o alimentada por pila (sin cable).

1. Seguridad del área de trabajo

- a. **Mantenga limpia y bien iluminada el área de trabajo.** El desorden o una iluminación deficiente en las áreas de trabajo pueden provocar accidentes.
- b. **No utilice la herramienta eléctrica en un entorno con peligro de explosión, en el que se encuentren combustibles líquidos, gases o material en polvo.** Las herramientas eléctricas producen chispas que pueden llegar a inflamar los materiales en polvo o vapores.
- c. **Mantenga alejados a los niños y otras personas del área de trabajo al emplear la herramienta eléctrica.** Una distracción le puede hacer perder el control sobre la herramienta.

2. Seguridad eléctrica

- a. **El enchufe de la herramienta eléctrica debe corresponder a la toma de corriente utilizada. No es admisible modificar el enchufe en forma alguna. No emplee adaptadores en herramientas eléctricas dotadas con una toma de tierra.** Los enchufes sin modificar adecuados a las respectivas tomas de corriente reducen el riesgo de una descarga eléctrica.
- b. **Evite que su cuerpo toque partes conectadas a tierra como tuberías, radiadores, cocinas y refrigeradores.** El riesgo a quedar expuesto a

una descarga eléctrica es mayor si su cuerpo tiene contacto con tierra.

- c. **No exponga las herramientas eléctricas a la lluvia y evite que penetren líquidos en su interior.** Existe el peligro de recibir una descarga eléctrica si penetran ciertos líquidos en la herramienta eléctrica.
 - d. **Cuide el cable eléctrico. No utilice el cable eléctrico para transportar o colgar la herramienta eléctrica, ni tire de él para sacar el enchufe de la toma de corriente. Mantenga el cable eléctrico alejado del calor, aceite, bordes afilados o piezas móviles.** Los cables eléctricos dañados o enredados pueden provocar una descarga eléctrica.
 - e. **Al trabajar con la herramienta eléctrica en la intemperie utilice solamente cables alargadores homologados para su uso en exteriores.** La utilización de un cable alargador adecuado para su uso en exteriores reduce el riesgo de una descarga eléctrica.
 - f. **Si fuera inevitable la utilización de una herramienta eléctrica en un lugar húmedo, utilice un suministro protegido con un dispositivo de corriente residual (RCD).** La utilización de un dispositivo de corriente residual reduce el riesgo de descarga eléctrica.
Nota: El término de "Dispositivo de Corriente Residual (RCD)" puede ser sustituido por el término "Interruptor de Falla a Tierra del Circuito (GFCI)" o "Disyuntor de Fugas a Tierra (ELCB)".
- 3. Seguridad personal**
- a. **Esté atento a lo que hace y emplee la herramienta eléctrica con prudencia.** No utilice la herramienta eléctrica si estuviese cansado, ni tampoco después de haber consumido alcohol, drogas o medicamentos. El no estar atento durante el uso de una herramienta eléctrica puede provocarle serias lesiones.
 - b. **Utilice equipos de protección personal. Lleve siempre protección ocular, respiratoria y auditiva.** Los equipos de protección tales como una mascarilla antipolvo, zapatos de seguridad con suela antideslizante, casco o protectores auditivos, utilizados en condiciones adecuadas, contribuyen a reducir las lesiones personales.
 - c. **Evite una puesta en marcha involuntaria. Asegúrese de que el interruptor esté en la posición de apagado antes de conectar a la fuente de alimentación o la batería, coger o transportar la herramienta.** Si se transportan herramientas eléctricas con el dedo sobre el interruptor o si se enchufan con el interruptor encendido puede dar lugar a accidentes.
 - d. **Retire las herramientas de ajuste o llaves fijas antes de conectar la herramienta eléctrica.** Una herramienta o llave colocada en una pieza giratoria

4 • ESPAÑOL

de la herramienta eléctrica puede producir lesiones al ponerse a funcionar.

- e. **Sea precavido. Evite adoptar una posición que fatigue su cuerpo; mantenga un apoyo firme sobre el suelo y conserve el equilibrio en todo momento.** Ello le permitirá controlar mejor la herramienta eléctrica en caso de presentarse una situación inesperada.
 - f. **Utilice ropa apropiada. No vista ropa suelta o joyas. Mantenga su cabello, vestimenta y guantes lejos de las partes móviles.** Ropa suelta, joyas o cabello largo partes móviles.
 - g. **Siempre que sea posible utilizar unos equipos de aspiración o captación de polvo, asegúrese que éstos estén montados y que sean utilizados correctamente.** El empleo de equipos de recogida de polvo reduce los riesgos derivados del polvo.
4. **Uso y cuidado de herramientas eléctricas**
 - a. **No sobrecargue la herramienta eléctrica. Use la herramienta eléctrica adecuada para cada aplicación.** Con la herramienta eléctrica adecuada podrá trabajar mejor y más seguro dentro del margen de potencia indicado.
 - b. **No utilice herramientas eléctricas con un interruptor defectuoso.** Las herramientas eléctricas que no se puedan conectar o desconectar son peligrosas y deben hacerse reparar.
 - c. **Desconecte el enchufe de la fuente eléctrica y/o la batería de la herramienta eléctrica antes de realizar ajustes, cambiar accesorios o almacenar la herramienta eléctrica.** Esta medida preventiva reduce el riesgo de conectar accidentalmente la herramienta eléctrica.
 - d. **Guarde las herramientas eléctricas fuera del alcance de los niños y de las personas que no estén familiarizadas con su uso.** Las herramientas eléctricas utilizadas por personas inexpertas son peligrosas.
 - e. **Cuide sus herramientas eléctricas con esmero. Controle si funcionan correctamente, sin atascarse, las partes móviles de la herramienta eléctrica, y si existen partes rotas o deterioradas que pudieran afectar al funcionamiento de la herramienta. Si la herramienta eléctrica estuviese defectuosa haga que la reparen antes de volver a utilizarla.** Muchos accidentes se deben a herramientas eléctricas con un mantenimiento deficiente.
 - f. **Mantenga las herramientas de corte limpias y afiladas.** Las herramientas de corte mantenidas correctamente se dejan guiar y controlar mejor.
 - g. **Utilice la herramienta eléctrica, los accesorios, los útiles de la herramienta, etc. de acuerdo con estas instrucciones, y tenga en cuenta las**

condiciones de trabajo y la tarea a realizar. El uso de herramientas eléctricas para trabajos diferentes de aquellos para los que han sido concebidas puede resultar peligroso.

5. Servicio técnico

- a. **Haga reparar su herramienta eléctrica sólo por personal técnico autorizado que emplee exclusivamente piezas de repuesto originales.** Solamente así se garantiza la seguridad de la herramienta eléctrica.

6. Seguridad eléctrica



La herramienta lleva un doble aislamiento; por lo tanto no requiere una toma a tierra. Compruebe siempre que la tensión de la red corresponda al valor indicado en la placa de características.



¡Advertencia! Si el cable de alimentación está dañado lo debe reemplazar el fabricante o su representante o una persona igualmente calificada para evitar peligro. Si el cable es reemplazado por una persona igualmente calificada pero no autorizada por STANLEY, la garantía no tendrá efecto.

7. Etiquetas sobre la herramienta

La etiqueta de su herramienta puede incluir los siguientes símbolos:

| | | | | | |
|-----------------|--------------------------------|---------------------------------|---|--|---------------------------------|
| | Lea el manual de instrucciones | Hz Hertz | W Watts | | Construcción Clase II |
| | Use protección ocular | min minutos | | | Terminales de Conexión a Tierra |
| | Use protección auditiva | | Corriente Alterna | | Símbolo de Alerta Seguridad |
| V Voltios | A Amperes | n_0 Velocidad sin Carga | .../min.. Revoluciones o Reciprocaciones por minuto | | |

ADVERTENCIAS DE SEGURIDAD ADICIONALES PARA SOPLADORAS

- ▶ No recoja materiales en combustión como colillas de cigarrillos o cenizas ardiendo, astillas metálicas recién cortadas, tornillos, clavos o similares.
- ▶ Nunca obstruya los orificios de succión o soplado.
- ▶ Mantener el cable siempre a la parte trasera y distanciado del aparato.
- ▶ Instrucciones para el funcionamiento seguro del aparato, incluyendo la recomendación de que el aparato debe alimentarse desde un diferencial (RCD) con una corriente de disparo de no más de 30 mA;
- ▶ Asesoramiento sobre el uso y el tipo de cables de extensión para ser utilizada.

CARACTERÍSTICAS (Fig. A)

1. Tubo
2. Orificio de soplado
3. Gatillo interruptor
4. Control de velocidad
5. Botón de traba
6. Orificio de succión
7. Colector de polvo

MONTAJE

⚠ **¡Atención!** Antes de proceder al montaje, compruebe que la herramienta está apagada y desenchufada.

USO

Montaje del tubo para aspirado (Fig. A)

- ▶ Introduzca la patilla ubicada en el interior del tubo en la ranura del orificio de soplado (1).
- ▶ Para trabar el tubo en el local, gire el tubo en la dirección indicada.
- ▶ Para retirar el tubo, gire al mismo, en sentido contrario.

Montaje del tubo y colector de polvo para aspirado de polvo (Fig. B)

- ▶ Para aspirado de polvo, monte el colector de polvo en el orificio de soplado (2) y el tubo en el orificio de succión (6).
- ▶ Para retirar el colector de polvo y el tubo, simplemente tire después de girar en la dirección opuesta.
- ▶ Vacíe el colector de polvo frecuentemente para asegurar una máxima eficiencia de aspirado.

Operación del soplador (Fig. C)

- ▶ Para encender el soplador, presione el interruptor (3). Para pararlo, suelte el interruptor.
- ▶ Ajuste la velocidad con el control de velocidad (4).
- ▶ Para una operación continua, primero presione el interruptor y después el botón de traba (5), suelte el interruptor. Para desactivar la traba, presione y libere el gatillo interruptor.
- ▶ Si el cable se daña durante el uso, desconecte el cable de alimentación de la red inmediatamente. **No toque el cable antes de desconectar la fuente.**
- ▶ No transporte el aparato por el cable.
- ▶ Desconecte el aparato de la red eléctrica
 - a. Cada vez que salen de la máquina;
 - b. Antes de eliminar una obstrucción;
 - c. Antes de inspeccionar, limpiar o trabajar en el aparato;
 - d. Si el aparato comienza a vibrar de manera anormal.

⚠ **¡Atención!** El funcionamiento continuo de la herramienta no debe superar los 30min.

Substitución de las escobillas de carbón (Fig. D)

- ▶ Utilice un destornillador para retirar la tapa de la escobilla.
- ▶ Retire la escobilla de carbón usada, instale una nueva y recoloque la tapa.

⚠ **¡Atención!** Substituya y verifique las escobillas de carbón regularmente. Substitúyalas cuando el desgaste llegue a la marca límite.

MANTENIMIENTO

Su herramienta fue diseñada para operar por largo tiempo con un mínimo de mantenimiento. La operación satisfactoria continua depende de cuidados adecuados y limpieza regular.

⚠ **¡Advertencia!** Antes de realizar cualquier tipo de mantenimiento, apague y desenchufe la herramienta.

- ▶ Limpie periódicamente las ranuras de ventilación de la herramienta con un cepillo suave o un paño seco.
- ▶ Limpie periódicamente la carcasa del motor con un paño húmedo. No utilice ninguna sustancia limpiadora abrasiva o que contenga disolventes.

PROTECCIÓN DEL MEDIO AMBIENTE



Separación de desechos. Este producto no debe desecharse con la basura doméstica normal. Si llega el momento de reemplazar su producto STANLEY o éste ha dejado de tener utilidad para usted, no lo deseche con la basura doméstica normal. Asegúrese de que este producto se deseche por separado.



La separación de desechos de productos usados y embalajes permite que los materiales puedan reciclarse y reutilizarse. La reutilización de materiales reciclados ayuda a evitar la contaminación medioambiental y reduce la demanda de materias primas. La normativa local puede ofrecer la separación de desechos de productos eléctricos de uso doméstico en centros municipales de recogida de desechos o a través del distribuidor cuando adquiere un nuevo producto.

INFORMACIÓN DE SERVICIO

Todos los Centros de Servicio de STANLEY cuentan con personal altamente capacitado dispuesto a brindar a todos los clientes un servicio eficiente y confiable en la reparación de herramientas eléctricas. Para mayor información acerca de nuestros centros de servicio autorizados y si necesita consejo técnico, reparaciones o piezas de repuesto originales de fábrica, comuníquese a su oficina local.

ESPECIFICACIONES

Potencia
Velocidad sin carga
Volumen de Aire
Peso

STPT600

600W
0 - 16000/min (rpm)
3,5 m³/min
1,7kg

ANEXO 02: Tablas de las propiedades del aire a 1 atm de presión.

Propiedades del aire a 1 atm de presión

| Temp. <i>T</i> , °C | Densidad ρ , kg/m ³ | Calor específico c_p J/kg · K | Conductividad térmica k , W/m · K | Difusividad térmica α , m ² /s | Viscosidad dinámica μ , kg/m · s | Viscosidad cinemática ν , m ² /s | Número de Prandtl Pr |
|------------------------|--|---------------------------------------|---|--|--|---|----------------------------|
| -150 | 2.866 | 983 | 0.01171 | 4.158×10^{-6} | 8.636×10^{-6} | 3.013×10^{-6} | 0.7246 |
| -100 | 2.038 | 966 | 0.01582 | 8.036×10^{-6} | 1.189×10^{-5} | 5.837×10^{-6} | 0.7263 |
| -50 | 1.582 | 999 | 0.01979 | 1.252×10^{-5} | 1.474×10^{-5} | 9.319×10^{-6} | 0.7440 |
| -40 | 1.514 | 1002 | 0.02057 | 1.356×10^{-5} | 1.527×10^{-5} | 1.008×10^{-5} | 0.7436 |
| -30 | 1.451 | 1004 | 0.02134 | 1.465×10^{-5} | 1.579×10^{-5} | 1.087×10^{-5} | 0.7425 |
| -20 | 1.394 | 1005 | 0.02211 | 1.578×10^{-5} | 1.630×10^{-5} | 1.169×10^{-5} | 0.7408 |
| -10 | 1.341 | 1006 | 0.02288 | 1.696×10^{-5} | 1.680×10^{-5} | 1.252×10^{-5} | 0.7387 |
| 0 | 1.292 | 1006 | 0.02364 | 1.818×10^{-5} | 1.729×10^{-5} | 1.338×10^{-5} | 0.7362 |
| 5 | 1.269 | 1006 | 0.02401 | 1.880×10^{-5} | 1.754×10^{-5} | 1.382×10^{-5} | 0.7350 |
| 10 | 1.246 | 1006 | 0.02439 | 1.944×10^{-5} | 1.778×10^{-5} | 1.426×10^{-5} | 0.7336 |
| 15 | 1.225 | 1007 | 0.02476 | 2.009×10^{-5} | 1.802×10^{-5} | 1.470×10^{-5} | 0.7323 |
| 20 | 1.204 | 1007 | 0.02514 | 2.074×10^{-5} | 1.825×10^{-5} | 1.516×10^{-5} | 0.7309 |
| 25 | 1.184 | 1007 | 0.02551 | 2.141×10^{-5} | 1.849×10^{-5} | 1.562×10^{-5} | 0.7296 |
| 30 | 1.164 | 1007 | 0.02588 | 2.208×10^{-5} | 1.872×10^{-5} | 1.608×10^{-5} | 0.7282 |
| 35 | 1.145 | 1007 | 0.02625 | 2.277×10^{-5} | 1.895×10^{-5} | 1.655×10^{-5} | 0.7268 |
| 40 | 1.127 | 1007 | 0.02662 | 2.346×10^{-5} | 1.918×10^{-5} | 1.702×10^{-5} | 0.7255 |
| 45 | 1.109 | 1007 | 0.02699 | 2.416×10^{-5} | 1.941×10^{-5} | 1.750×10^{-5} | 0.7241 |
| 50 | 1.092 | 1007 | 0.02735 | 2.487×10^{-5} | 1.963×10^{-5} | 1.798×10^{-5} | 0.7228 |
| 60 | 1.059 | 1007 | 0.02808 | 2.632×10^{-5} | 2.008×10^{-5} | 1.896×10^{-5} | 0.7202 |
| 70 | 1.028 | 1007 | 0.02881 | 2.780×10^{-5} | 2.052×10^{-5} | 1.995×10^{-5} | 0.7177 |
| 80 | 0.9994 | 1008 | 0.02953 | 2.931×10^{-5} | 2.096×10^{-5} | 2.097×10^{-5} | 0.7154 |
| 90 | 0.9718 | 1008 | 0.03024 | 3.086×10^{-5} | 2.139×10^{-5} | 2.201×10^{-5} | 0.7132 |
| 100 | 0.9458 | 1009 | 0.03095 | 3.243×10^{-5} | 2.181×10^{-5} | 2.306×10^{-5} | 0.7111 |
| 120 | 0.8977 | 1011 | 0.03235 | 3.565×10^{-5} | 2.264×10^{-5} | 2.522×10^{-5} | 0.7073 |
| 140 | 0.8542 | 1013 | 0.03374 | 3.898×10^{-5} | 2.345×10^{-5} | 2.745×10^{-5} | 0.7041 |
| 160 | 0.8148 | 1016 | 0.03511 | 4.241×10^{-5} | 2.420×10^{-5} | 2.975×10^{-5} | 0.7014 |
| 180 | 0.7788 | 1019 | 0.03646 | 4.593×10^{-5} | 2.504×10^{-5} | 3.212×10^{-5} | 0.6992 |
| 200 | 0.7459 | 1023 | 0.03779 | 4.954×10^{-5} | 2.577×10^{-5} | 3.455×10^{-5} | 0.6974 |
| 250 | 0.6746 | 1033 | 0.04104 | 5.890×10^{-5} | 2.760×10^{-5} | 4.091×10^{-5} | 0.6946 |
| 300 | 0.6158 | 1044 | 0.04418 | 6.871×10^{-5} | 2.934×10^{-5} | 4.765×10^{-5} | 0.6935 |
| 350 | 0.5664 | 1056 | 0.04721 | 7.892×10^{-5} | 3.101×10^{-5} | 5.475×10^{-5} | 0.6937 |
| 400 | 0.5243 | 1069 | 0.05015 | 8.951×10^{-5} | 3.261×10^{-5} | 6.219×10^{-5} | 0.6948 |
| 450 | 0.4880 | 1081 | 0.05298 | 1.004×10^{-4} | 3.415×10^{-5} | 6.997×10^{-5} | 0.6965 |
| 500 | 0.4565 | 1093 | 0.05572 | 1.117×10^{-4} | 3.563×10^{-5} | 7.806×10^{-5} | 0.6986 |
| 600 | 0.4042 | 1115 | 0.06093 | 1.352×10^{-4} | 3.846×10^{-5} | 9.515×10^{-5} | 0.7037 |
| 700 | 0.3627 | 1135 | 0.06581 | 1.598×10^{-4} | 4.111×10^{-5} | 1.133×10^{-4} | 0.7092 |
| 800 | 0.3289 | 1153 | 0.07037 | 1.855×10^{-4} | 4.362×10^{-5} | 1.326×10^{-4} | 0.7149 |
| 900 | 0.3008 | 1169 | 0.07465 | 2.122×10^{-4} | 4.600×10^{-5} | 1.529×10^{-4} | 0.7206 |
| 1000 | 0.2772 | 1184 | 0.07868 | 2.398×10^{-4} | 4.826×10^{-5} | 1.741×10^{-4} | 0.7260 |
| 1500 | 0.1990 | 1234 | 0.09599 | 3.908×10^{-4} | 5.817×10^{-5} | 2.922×10^{-4} | 0.7478 |
| 2000 | 0.1553 | 1264 | 0.11113 | 5.664×10^{-4} | 6.630×10^{-5} | 4.270×10^{-4} | 0.7539 |

Nota: Para gases ideales, c_p , k , μ , y Pr son independientes de la presión. Las propiedades ρ , α y ν a una presión P distinta a 1 atm se determinan cuando se multiplican los valores de ρ a la temperatura dada por P (en atm) y cuando se dividen α y ν entre P (en atm).

Fuente: Datos generados a partir del Software EES desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. Fuentes originales: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 1986 and Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena, y P. Hestermann, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 0-306067020-8.

Fuente: ÇENGEL, Yunus A. y John M. CIMBALA, “Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones”, 1ª edición, McGraw-Hill, 2006. Tabla A-9.

ANEXO 03: Diagrama de conexión del módulo colector de datos.

