

DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA TÉRMICA INSTÁNTANEA Y LA
TEMPERATURA DE SALIDA DEL COLECTOR SOLAR PSHC-1C, DEL SISTEMA
DE ENTRENAMIENTO EN ENERGÍA SOLAR TÉRMICA, UBICADO EN LA
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES

JUAN DAVID GARZÓN ROMERO

JUAN CARLOS RAMÍREZ SAPUY

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C
2015

DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA TERMICA INSTANTANEA Y LA
TEMPERATURA DE SALIDA DEL COLECTOR SOLAR PSHC-1C, DEL SISTEMA
DE ENTRENAMIENTO EN ENERGÍA SOLAR TÉRMICA, UBICADO EN LA
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES

JUAN DAVID GARZÓN ROMERO

JUAN CARLOS RAMÍREZ SAPUY

Trabajo para optar al título de Ingenieros Mecánicos

Director: Mg. Silvio A. Jiménez Castellanos

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C
2015

Nota de aceptación

Firma del director

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá 08 de julio de 2015

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a todas las personas que consideran el estudio de los dispositivos de aprovechamiento de las fuentes de energías renovables, como recurso para desarrollar proyectos que permitan la auto-sustentabilidad energética como una futura realidad en el país.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios, por brindarnos sabiduría y paciencia ante los momentos complicados en el transcurso del desarrollo del proyecto.

A mis padres (Fanny Sapuy y Carlos Ramírez), por inculcarme el amor al estudio y gracias por jamás dejar de creer en mí.

Juan Carlos Ramírez

Le agradezco a mi madre Rosa Margarita Romero Ramírez y a mi abuela Margarita por apoyarme en circunstancias difíciles de mi vida y por darme la oportunidad de crecer y encaminarme por este rumbo “El estudio”, sin ellas no lo hubiese podido lograr.

Juan David Garzón Romero

A nuestro director de proyecto el magister Silvio Alejandro Jiménez, ya que estuvo presente en el transcurso de lapsus académicos presentados durante el transcurso del proyecto y por su valioso apoyo en durante la carrera con sus consejos tanto intelectuales como personales.

A Wilmer Pineda Ríos, docente del departamento de ciencias básicas de la institución, por brindarnos su apoyo ante los análisis estadísticos que se realizaron en el proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	22
ABSTRACT.....	23
INTRODUCCIÓN.....	24
FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	26
JUSTIFICACIÓN.....	28
1. OBJETIVOS	29
1.1 OBJETIVO GENERAL	29
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	29
2. MARCO CONTEXTUAL.....	30
2.1 CONTEXTO HISTÓRICO DE LA ENERGÍA TÉRMICA SOLAR EN COLOMBIA.	30
2.2 CONTEXTO LEGAL DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN COLOMBIA.	32
2.2.1 Ley 1715 de 2014.....	34
3. MARCO CONTEXTUAL.....	35
3.1 ANTECEDENTES	35

3.2 MARCO TEÓRICO.....	40
3.2.1 Energía solar térmica	40
3.2.2 Clasificación de los SST para calentamiento de agua domestica. ...	42
3.2.3 Sistema de entrenamiento en energía solar térmica, Lab-Volt modelo 46121	42
3.3 COLECTORES SOLARES.....	45
3.3.1 Tipos de colectores solares.....	46
3.3.2 Componentes de los colectores solares de placa plana.....	46
3.3.3 Funcionamiento de los colectores solares de placa plana	48
3.3.4 Colector de placa plana PSHC-1C	49
3.4 RENDIMIENTO DE LOS COLECTORES SOLARES DE PLACA PLANA	52
3.4.1 Rendimiento instantáneo de colectores solares de placa plana.....	53
3.4.2 Balance de energía de un colector solar de placa plana en condiciones estacionarias.	53
3.4.3 Rendimiento térmico estacionario básico	55
3.4.4 Curvas de rendimiento para colectores solares de placa plana	56
3.5 SIMULACIÓN EN SISTEMAS SOLARES	57
3.5.1 Información obtenida de una simulación	58
3.5.2 Programas de simulación	58
3.5.3 Modelación computacional de sistemas térmicos	59
3.5.4 Procesos para estructurar simulaciones.....	59
3.5.5 Programa de simulación transitoria de procesos térmicos TRNSYS..	61
4. MARCO METODOLÓGICO	63
4.1 MÉTODO.....	63
4.1.1 Tipo de investigación.....	63
4.1.2 Tipo de diseño	63
4.2 INSTRUMENTOS.....	64
4.3 PROCEDIMIENTO	64
4.3.1 Etapa I. Recopilación y selección de la información.....	64

4.3.2	Etapa II. Reconocimiento del entrenador solar térmico <i>Lab-Volt 46121</i>	64
4.3.3	Etapa III. Experimentación con el entrenador para la obtención del rendimiento del colector	65
4.3.4	Etapa IV. Simulación del sistema	65
4.3.5	Etapa V. Análisis y socialización de los resultados del proyecto	65
5.	PRUEBAS EXPERIMENTALES	66
5.1	MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN SIMULADA	66
5.2	ESTÁNDARES PARA PRUEBAS EXPERIMENTALES EN INTERIOR	70
5.3	MONTAJE DEL ENSAYO	73
5.4	EJECUCIÓN DEL ENSAYO	74
6.	SIMULACIÓN EN TRNSYS	77
6.1	DIAGRAMA DE FLUJO REAL DEL SISTEMA PARA CALENTAMIENTO DE AGUA.	77
6.2	DIAGRAMA DE FLUJO DE LOS COLECTORES SOLARES DE PLACA PLANA EN TRNSYS.	80
6.3	INGRESO AL PROGRAMA DE SIMULACIÓN TRNSYS.	81
6.4	VARIABLES DEL <i>TYPE 73</i>	84
6.4.1	Datos del fabricante y propiedades	85
6.5	VARIABLES DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA.	85
6.6	ECUACIONES NO CONSIDERADAS EN TRNSYS PARA COLECTORES SOLARES DE PLACA PLANA.	95
6.6.1	Factor de eficiencia del colector	95
6.6.2	Factor de remoción de calor	96
6.6.3	Factor de flujo del colector	97
6.6.4	Resolución de las ecuaciones no consideradas en TRNSYS para el colector PSHC-1C	97

6.5 DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE AGUA.....	101
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	103
7.1 RESULTADOS DE LA MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN EMITIDA POR LA LÁMPARA	103
7.2 RESULTADOS DEL EXPERIMENTO	106
7.3 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN EN TRNSYS	113
7.4 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN Y SIMULACIÓN.....	115
8. CONCLUSIONES.....	120
9. RECOMENDACIONES	121
BIBLIOGRAFIA	122
ANEXOS	126

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Rendimiento instantáneo de un colector solar de placa plana.	54
Ecuación 2. Energía útil de un colector solar de placa plana.....	54
Ecuación 3. Energía útil de un colector solar de placa plana con factor correctivo.	54
Ecuación 4. Rendimiento del colector solar de placa plana con factor correctivo..	55
Ecuación 5. Rendimiento del colector aplicando ley distributiva y factor común. ..	55
Ecuación 6. Rendimiento instantáneo de un colector solar de placa plana.	55
Ecuación 7. Eficiencia térmica instantánea, bajo condiciones en estado estacionario	56
Ecuación 8. Eficiencia estándar de aleta.	86
Ecuación 9. Factor I adimensional de la ecuación.	86
Ecuación 10. Coeficiente de pérdidas totales para colectores de placa plana.	86
Ecuación 11. Coeficiente de pérdidas por la parte superior del colector	87
Ecuación 12. Correlación de convección forzada para el coeficiente de transferencia de calor del viento.....	87
Ecuación 13. Pérdidas de la parte inferior de un colector de placa plana.....	91

Ecuación 14. Pérdidas de los lados de un colector de placa plana.	92
Ecuación 15. Factor de eficiencia del colector	96
Ecuación 16. Factor de remoción de calor.....	96
Ecuación 17. Factor de flujo del colector	97
Ecuación 18. Área de la sección transversal de la tubería.	98
Ecuación 19. Flujo másico del agua.	99
Ecuación 20. Velocidad promedio del agua en la tubería.	99
Ecuación 21. Número de Reynolds.....	99
Ecuación 22. Número de Nusselt para flujo turbulento completamente desarrollado.	100
Ecuación 23. Numero de Nusselt.....	100

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Colectores solares instalados en el hospital Pablo Tobón Uribe (240 m ² de colectores, tanque 20 m ³ , no visible).	31
Figura 2. Vista Lateral izquierda del sistema de entrenamiento en energía solar térmica modelo 46121.	43
Figura 3. Vista posterior del sistema de entrenamiento en energía solar térmica modelo 46121.	43
Figura 4. Componentes generales de un colector solar de placa plana	47
Figura 5. Funcionamiento teórico de un colector solar de placa plana.	48
Figura 6. Curva típica de rendimiento de un colector solar de placa plana.....	56
Figura 7. Esquema modular de las preformas en TRNSYS.....	62
Figura 8. Montaje del piranómetro en la base de soporte	66
Figura 9. Primer registro de datos.....	67
Figura 10. Medición del ángulo incidente.....	67
Figura 11. Segundo registro de datos.....	68
Figura 12. Medición de los datos	68
Figura 13. Tercer registro de datos.....	69

Figura 14. Panorama del piranómetro	69
Figura 15. Distribución en el mundo de los estándares para la certificación de colectores solares	71
Figura 16. Esquema de montaje sistema de recirculación para el experimento	74
Figura 17. Pre-acondicionamiento del colector solar	75
Figura 18. Vista frontal de la medición de la eficiencia, piranómetro al lado del colector.	76
Figura 19. Panorama general del montaje de la prueba.	76
Figura 20. Diagrama de flujo, comportamiento real del sistema de entrenamiento en energía solar térmica.	77
Figura 21. Diagrama de flujo de los tipos de colectores solares de placa plana vinculados en TRNSYS.	80
Figura 22. Ingreso al programa de simulación TRNSYS.	81
Figura 23. Selección de un nuevo proyecto en el programa.	82
Figura 24. Selección del <i>type</i> 73 en el nuevo proyecto.	82
Figura 25. Ingreso al <i>type</i> 73	83
Figura 26. Medición del ángulo de la apertura del colector solar de placa plana. ...	88
Figura 27: Ingreso de las variables en TRNSYS.	95

Figura 28. Distribución de la tubería en relación a la superficie absorbedora.....	98
Figura 29. Diagrama de flujo final para la simulación en TRNSYS.	102
Figura 30. Esquema en TRNSYS para la radiación simulada.	104
Figura 31. Esquema final del experimento en TRNSYS	113

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Resultados de la simulación de las pruebas de radiación simulada....	104
Gráfica 2. Comportamiento de las pruebas 1 y 2.....	105
Gráfica 3. Temperaturas de salida del pre-acondicionamiento del colector solar.	106
Gráfica 4. Velocidad promedio del aire, en relación a los puntos de medición de los experimentos.	107
Gráfica 5. Comportamiento general de la temperatura de salida para los experimentos.	108
Gráfica 6. Eficiencia instantánea vs T^* (promedio de cada experimento).....	109
Gráfica 7. Eficiencia instantánea Vs T^* (promedio los experimentos).....	109
Gráfica 8. Eficiencia Vs tiempo.	110
Gráfica 9. Eficiencia vs tiempo (promedio de los experimentos).....	111
Gráfica 10. Temperatura de salida vs tiempo	112
Gráfica 11. Temperatura de salida vs tiempo (promedio de las pruebas).....	112
Gráfica 12. Comportamiento de la eficiencia en función al tiempo en la simulación.	114
Gráfica 13. Comportamiento de la temperatura de salida en la simulación.	115

Gráfica 14. Comparación de la eficiencia simulada con la eficiencia instantánea experimental.116

Gráfica 15. Comparación entre las temperaturas de salida del colector solar simulado y experimental.118

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Marco Normativo Relacionado con Energías Renovables en Colombia. .	33
Tabla 2. Promedio mensual de radiación solar en Bogotá.....	41
Tabla 3. Clasificación de los SST para calentamiento de agua doméstica	42
Tabla 4. Especificaciones del colector solar PSHC-1C.....	50
Tabla 5. Comparación de procedimientos para el rendimiento térmico	71
Tabla 6. Comparativo de normas en relación a las disposiciones experimentales	72
Tabla 7. Registro de temperaturas en el experimento	75
Tabla 8. Variables de la preforma <i>type 73</i>	84
Tabla 9. Propiedades ópticas del vidrio utilizadas para cálculos teóricos.....	90
Tabla 10. Propiedades de los materiales para la cubierta transparente de colectores de placa plana.....	94
Tabla 11. Propiedades del agua a T= 20°C.....	99
Tabla 12. Datos de la medición de la radiación simulada emitida por la lámpara.	103
Tabla 13. Prueba de hipótesis para eficiencia simulada con la eficiencia instantánea experimental.	117

Tabla 14. Prueba de hipótesis para temperaturas de salida simulada y experimental
.....119

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Protocolo de medición radiación simulada.	126
Anexo B. Certificado de la constante de calibración del piranómetro.	129
Anexo C. Planos de la estructura para soporte del piranómetro.....	130
Anexo D. Datos medición radiación simulada.....	132
Anexo E. Protocolo de eficiencia térmica del colector PSHC-1C, en estado cuasi-estable, sistema de recirculación para condiciones en interior.	135
Anexo F. Plano estructura concentradora de radiación	153
Anexo G. Laboratorio de eficiencia térmica instantánea del colector solar PSHC-1C	154
Anexo H. Artículo del proyecto.....	168

GLOSARIO

ARQUITECTURA MODULAR: es un proceso que utilizan algunos simuladores, el cual el problema general planteado, se descompone en varias secuencias de cálculo hasta lograr una convergencia, utilizando balances de masa y energía como criterios para terminar el cálculo.

BALANCE ENERGÉTICO: es un principio físico fundamental, que es aplicado para determinar la cantidad de energía que es intercambiada y acumulada dentro de un sistema.

COLECTOR SOLAR: elemento activo diseñado para captar la energía del sol y convertirla en energía térmica.

CONDICIONES ESTACIONARIAS: método de evaluación mediante el cual, las variables a manejar deben permanecer constantes durante un determinado período.

CUBIERTA TRANSPARENTE: superficie que permite el paso de luz visible a través de ella.

DIAGRAMA DE FLUJO: es una representación gráfica de un proceso, ofrece una descripción visual de las actividades implicadas en un proceso mostrando la relación secuencial entre ellas, facilitando la rápida comprensión de cada actividad y su relación con las demás.

ENERGÍA SOLAR TÉRMICA: aprovechamiento de la energía del sol compuesto de sub-sistemas y componentes necesarios para generar calor mediante el uso de colectores o paneles solares térmicos.

FACTOR DE REMOCIÓN DE CALOR: cantidad que relaciona la energía útil actual ganada de un colector, a la ganada útil si toda la superficie del colector está a la temperatura de entrada del fluido.

KERNEL: es el motor de compilación de TRNSYS, el cual lee y procesa los archivos de entrada de manera iterativa para resolver los sistemas que se plantean en el simulador, determina propiedades termo-físicas, invierte matrices, realiza regresiones lineales e interpola archivos de datos externos.

MODELACIÓN MATEMÁTICA: consiste en el reemplazo del objeto cognitivo por su imagen matemática la cual, implementada en algoritmos lógico numéricos en un ordenador, permite estudiar las cualidades del proceso original.

MULTÍMETRO: instrumento eléctrico para medir directamente magnitudes eléctricas activas como corrientes y potenciales (tensiones) o pasivas como resistencias.

PIRANÓMETRO: instrumento de medición que transforma la radiación solar en otra forma de energía. Dando como resultado una medida proporcional a la intensidad de la radiación.

PREFORMA: son los componentes característicos que tiene vinculado Trnsys en su entorno operativo, el cual tiene inscrito el lenguaje de programación de cada componente asociado con parámetros, entradas, salidas y ecuaciones diferenciales.

SIMULACIÓN: es el intento de obtener información acerca de un proceso a través de la realización de cálculos sobre un modelo matemático.

SISTEMA SOLAR TÉRMICO: corresponde a un conjunto de equipos y componentes que conforman una instalación solar térmica, que permite el aprovechamiento de la energía solar para la producción de agua caliente sanitaria.

SUPERFICIE ABSORBEDORA: lámina de color negro, generalmente en cobre, la luz solar al incidir sobre la lámina es absorbida, elevando su temperatura; el incremento de temperatura depende de la intensidad de la radiación incidente y de su absorptividad (α).

RADIACIÓN ALBEDO: es aquella que desde el sol se refleja en el suelo u otra superficie frente al colector y luego incide sobre él.

RADIACIÓN DIFUSA: es la que viniendo desde el sol ha sido dispersada por las moléculas y aerosoles en la atmósfera y llega a incidir en el colector.

RADIACIÓN DIRECTA: es la que pasa en línea recta desde el sol a través de la atmósfera hasta el colector.

RADIACIÓN SOLAR: se trata de un proceso físico, por medio del cual se transmite energía en forma de ondas electromagnéticas, en línea recta, sin intervención de una materia intermedia emitidas por el sol.

RENDIMIENTO INSTANTÁNEO DE COLECTORES SOLARES: representa la relación de la energía útil colectada a la energía captada por el área bruta del colector.

TRNSYS: programa de simulación transitoria de procesos térmicos, desarrollado en el año de 1975, por miembros del laboratorio de energía solar de la universidad de Wisconsin.

RESUMEN

En la presente investigación se determinó la eficiencia y la temperatura del agua de salida del colector solar PSHC-1C, del sistema de entrenamiento en energía térmica solar modelo 46121 ubicado en el laboratorio de energías alternativas de la Fundación Universitaria Los Libertadores (FULL), por medio de dos procesos: simulación y experimentación. Para la simulación se tuvo en cuenta las propiedades de los materiales de construcción del colector, las cuales se adaptaron en el software TRNSYS. Para el experimento se elaboró y aplicó un protocolo basado en aspectos normativos para pruebas en interior (indoor test), durante los días 04,-06 y -08 de mayo del 2015, para luego comparar los resultados obtenidos. Los resultados promedio para la eficiencia y la temperatura del agua de salida fueron 77,8% y 30,89°C para la simulación y de 83,9% y 30,04°C para el experimento. Con los resultados se realizó la prueba de hipótesis de “Kolmogorov-Smirnov”, la cual concluyó que las frecuencias simuladas y experimentales difieren significativamente por lo tanto no se puede realizar una comparación.

PALABRAS CLAVE: Colector solar, eficiencia térmica, experimentación, simulación y temperatura de salida.

ABSTRACT

This paper present the obtained values of the instantaneous thermal efficiency and water outlet temperature for the solar collector PSHC-1C calculated through of two processes simulation and experimentation. The simulation it developed using TRNSYS software, given to collector characteristic of building materials. For experiment was developed and implemented a test under national and international standard for indoor conditions, during days 04, -06 and -08 of May 2015, later to compare the obtained results. The average result for the instantaneous thermal efficiency and outlet temperature were 77,8% and 30,89 °C for simulation and of 83,9% and 30,04°C for experimentation. With the result was performed "Kolmogorov-Smirnov" hypothesis testing, which concluded that the observed frequencies and calculated theoretical differ significantly therefore they don't have to compare simulation and experimentation.

KEYWORDS: *solar collector, thermal efficiency, experimentation, simulation, outlet temperature.*

INTRODUCCIÓN

En la década de los setenta cuando sucedió la crisis energética, la atención se dirigió hacia otras fuentes de energía. Entre estas fuentes, apareció la energía solar para la producción de electricidad (fotovoltaica) y el calentamiento de agua destinado a uso doméstico (solar térmico).

Adicional a lo anterior, la preocupación de los gobiernos debido al cambio climático, Copenhague Summit 2009¹, ha generado inversión e investigación en proyectos relacionados con producción más limpia, lo cual ha vuelto a llamar la atención hacia la energía solar como medio para producir agua caliente sanitaria y de proceso, de manera viable desde lo técnico y lo financiero. En efecto, el calentamiento solar de agua para consumo doméstico, surge como alternativa para sustituir los calentadores tradicionales (eléctricos, a gas, entre otros), y se presenta como opción viable si se consideran las bajas temperaturas necesitadas (40°C a 60°C), además desde el punto de vista de ahorro energético es la opción más favorable, ya que en estos sistemas la fuente de calor es la radiación solar² (que es gratuita y limpia), las cuales sustituyen la electricidad, o los combustibles fósiles que provocan entre otros el efecto invernadero, producido durante los últimos veinte años por el 75% de las emisiones de CO_2 ³.

A la fecha del trabajo en el país, los SST (Sistemas Solares Térmicos), instalados han generado un grado de satisfacción aceptable en los consumidores, sin embargo, todavía persiste desconfianza en los usuarios potenciales debido a errores de naturaleza técnica cometidos por las empresas que los han fabricado y comercializado⁴. Además que los dispositivos importados se comercializan sin homologación para las condiciones de funcionamiento en el territorio colombiano⁵. Con referencia en lo anterior y para contribuir en la comprensión de los fenómenos de transformación energéticos de los calentadores solares de agua,

¹ Donde se discutieron estrategias para minimizar los efectos de las actividades industriales del hombre en la naturaleza.

² FERNANDEZ SALGADO, José M. Guía completa de la energía solar térmica y termoeléctrica: Introducción. Madrid: amv, 2010; p. 3 -17.

³ CREUS SOLÉ, Antonio. Energía termosolar: Generalidades. Catalunya: ceysa, 2010; p. 11-19.

⁴ Unidad de Planeación Minero - energética (2003). Guía de Especificaciones de Sistemas de Calentamiento para Uso Doméstico con Energía Solar en Colombia. Bogotá, Colombia. p.4.

⁵ *Ibíd.*, p.6.

Se procede a trabajar con un sistema de entrenamiento en energía solar térmica, el cual funciona mediante condiciones controladas.

Para caracterizar un calentador solar de agua, primero se debe caracterizar el colector. Para tal fin, en este estudio se documenta la determinación de su rendimiento térmico a través de dos formas: por medio de una simulación en un software especializado en procesos térmicos y la segunda por medición experimental con base en normatividad nacional e internacional. Luego se compararon los resultados obtenidos por simulación con los obtenidos experimentalmente.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El programa de ingeniería mecánica de la FULL, adquirió un “sistema de entrenamiento en energía solar térmica”, de la compañía Lab-Volt, modelo 46121, este dispositivo cuenta con diversos entornos operativos didácticos reales para enseñar como la energía radiante se transforma en energía térmica solar y esta a su vez puede ser aprovechada en diversas aplicaciones⁶. No obstante, el sistema no está siendo utilizado como mecanismo de aprendizaje, debido a factores como: a) los docentes, estudiantes y monitores no conocen ni comprenden el principio de funcionamiento, así como los modos de operación del entrenador; b) las capacitaciones suministradas por el proveedor del equipo, se han limitado a la identificación y descripción superficial de componentes y de los modos de operación y c) el programa de ingeniería mecánica no ha asignado una persona que comprenda el principio de funcionamiento (la base causal y el diseño), para que se manipule el entrenador.

Para comprender los principios de funcionamiento de una máquina en relación a su comportamiento desde el punto de vista de los fenómenos de transformación energéticos, es necesaria la identificación de variables dependientes e independientes del sistema y las leyes físicas que las relacionan. Hablar de variables y relaciones entre estas conlleva necesariamente a realizar estudios de análisis y predicción del comportamiento de la máquina. Para caracterizar un sistema de calentamiento de agua es necesario tener caracterizado el colector solar, por ser el elemento principal en el que ocurre la transformación de la energía y sin él no existe dicho cambio; por lo tanto se comenzará a trabajar en este en un ambiente controlado⁷ de manera experimental y simulada computacionalmente; ya que algunas variables involucradas en el proceso como son presión, temperatura, energía útil, radiación, caudal, eficiencia, razón de transferencia de calor pueden ser analizadas y medidas con un rango mayor de repetibilidad⁸. La eficiencia es el parámetro de comparación y permite elegir los colectores adecuados desde el punto de vista técnico, mientras que la temperatura de salida es la variable que indica al usuario del sistema si este puede satisfacer su demanda.

⁶ Solar thermal energy training system. Description. [En línea]. [Citado 20-feb-2015]. Disponible en: (https://www.labvolt.com/solutions/6_electricity_and_new_energy/19-46121-00_solar_thermal_energy_training_system.pdf).

⁷ En lo referente al ambiente controlado significa que las pruebas realizadas se trabajaran en interior.

⁸ Una serie de mediciones que están de acuerdo con cada otra, con un menor índice de dispersión.

Por lo tanto a los autores de este documento nos surge la siguiente pregunta ¿Existe una diferencia estadísticamente significativa entre la eficiencia y la temperatura de salida del fluido calo-portador del colector solar de agua, obtenidas por medio de un experimento computacional y las medidas experimentalmente en el entrenador?

JUSTIFICACIÓN

Al realizar este proyecto, se facilita el aprendizaje de los estudiantes y docentes en el área de la energía solar térmica y en el estudio de sistemas reales con programas de simulación.

Desde el punto de vista didáctico, permitirá que los estudiantes que trabajen con el dispositivo desarrollen más fácilmente sus conocimientos conceptual, explicativo y procedimental involucrados en los procesos de transformación de energía solar a energía térmica y que se estudian en espacios académicos como Termodinámica, Mecánica de Fluidos, Transferencia de Calor y el Seminario en Energías Renovables.

Por otro lado, representa una importante oportunidad de ejercicio profesional para las personas que trabajan en este proyecto ya que, al finalizar éste, estarán capacitadas para ofrecer servicios de simulación y diseño de equipos solares para calentamiento de agua.

Finalmente, el proyecto está acorde con las políticas, ya que contribuirá al desarrollo de la línea de investigación Calidad ambiental y Producción más limpia. Y con las nuevas disposiciones gubernamentales⁹, en relación al aprovechamiento de la energía solar en Colombia.

⁹ Ley 1715 de mayo de 2015

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la eficiencia térmica y la temperatura de salida del colector solar PSHC-1C del sistema de entrenamiento en energía solar térmica, por medio de experimentos computacionales y físicos.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar la eficiencia térmica y la temperatura de salida utilizando una simulación computacional.
- Determinar la eficiencia térmica y la temperatura de salida mediante experimentos realizados con el entrenador solar
- Comparar los resultados obtenidos de los experimentos computacionales y físicos, por medio del cálculo de parámetros estadísticos.
- Elaborar una guía de laboratorio para el proceso de calentamiento de agua, utilizando los resultados de los experimentos.
- Socializar los resultados a través de la presentación de un artículo.

2. MARCO CONTEXTUAL

2.1 CONTEXTO HISTÓRICO DE LA ENERGÍA TÉRMICA SOLAR EN COLOMBIA.

El estudio de los dispositivos de calentamiento solar de agua en Colombia surge debido a las actividades y aplicaciones generadas por las principales universidades del país, en el ámbito de I&D (Investigación y Desarrollo). Según los registros encontrados, los primeros indicios de trabajo con estos dispositivos, datan de los años sesenta en la Universidad Industrial de Santander, en donde se instalan calentadores solares domésticos para estudiar su comportamiento. Luego hacia finales de los setenta, universidades como los Andes, Nacional, del Valle y fundaciones como el Centro las Gaviotas, desarrollan bases para instalar calentadores solares domésticos y grandes sistemas de calentamiento de agua en hospitales y cafeterías. De esta manera, a mediados de los años ochenta, el desarrollo de estos dispositivos alcanzó su máximo auge, debido a la aplicación masiva de calentadores solares en urbanizaciones, en ciudades como: Medellín y Bogotá. Adicionalmente, surgieron varias compañías nacionales, que fabricaron e instalaron calentadores solares de diversas capacidades. Posteriormente, se genera el programa denominado PESENCA (Programa Especial de Energía de la Costa Atlántica), desarrollado por una Corporación nacional y una institución internacional, en la región de Turipaná Córdoba, en el cual se realizaron pruebas y ensayos para determinar la eficiencia de estos sistemas. Este puede considerarse el punto de partida acerca del origen de las normas sobre los calentadores solares, que siguió su desarrollo por parte del ICONTEC (Instituto Colombiano de Normas Técnicas), y que ha dado origen a las normas existentes en el país sobre los dispositivos solares térmicos.¹⁰ Para ilustrar esto, se puede apreciar el montaje realizado de unos colectores solares, para un hospital en la ciudad de Medellín.

¹⁰ RODRIGUEZ MURCIA, Humberto. Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. En: Revista de ingeniería Universidad de los Andes. No.28 (2009); pp. 83-89.

Figura 1. Colectores solares instalados en el hospital Pablo Tobón Uribe (240 m² de colectores, tanque 20 m³, no visible).



Fuente: RODRIGUEZ MURCIA, Humberto. Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. En: Revista de ingeniería Universidad de los Andes. No.28 (2009); p. 83-89.

En relación a los estudios del comportamiento de los SST, instalados en el país, solamente se encontró un único registro que data del año de 1993, realizado por el INEA (Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas), el cual se denominó: “censo de caracterización y grado de satisfacción de los SST instalados en Colombia”. En resumen, presenta la información adquirida netamente estadística, mediante dos análisis, el primero, es un censo a fabricantes de SST y el segundo presenta un marco muestral de usuarios de los dispositivos; el estudio permitió identificar ciertas características como:

- Total de área instalada de colectores de placa plana.
- Distribución por ciudades.
- Tendencia en cuanto a diseño y materiales de fabricación.
- Grado de satisfacción de los usuarios.
- Desempeño térmico y ahorro energético (Investigación científica RO Ltda, 1996).

Sin embargo, con la crisis del petróleo superada en el mundo y el ingreso de un recurso energético más barato (gas natural), la naciente industria fue relegada del mercado desde mediados de los noventa hasta la fecha del trabajo. Es así como en la actualidad esta industria, está nuevamente a la expectativa de una nueva crisis petrolera o que exista una subvención significativa por parte del gobierno nacional para volver a surgir.

2.2 CONTEXTO LEGAL DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN COLOMBIA.

En el país, las leyes, decretos, resoluciones que se han establecido entorno a la promoción de las energías renovables son principalmente de carácter tributario. De esta manera se presentan inconvenientes en el momento de incentivar la inversión y promover el desarrollo de este tipo de energías (Canseco, 2010), a continuación se enuncian algunas razones por las cuales se puede explicar el problema:

- Falta de estudios que generen el verdadero potencial de implementación de las fuentes no convencionales de energía.
- El incipiente desarrollo de procesos de innovación tecnológica y la debilidad en las estructuras institucionales en las relaciones sociedad-naturaleza.
- Falta de voluntad e interés político.

A partir de dicho análisis, las directrices de la política energética colombiana en relación a las energías renovables, están contenidas en “el plan energético nacional 2006-2025”, el cual, proyecta un panorama favorable tanto en el consumo como en la capacidad de producción de nuevas tecnologías, con el objetivo de reglamentar el desarrollo, uso e implementación de las energías renovables en el país. De igual manera, plantea estimular y brindar incentivos para los desarrolladores e implementadores de estas energías. Ahora bien, es conveniente dar a conocer la trascendencia legislativa del país en relación a las energías renovables, por medio de la tabla 1,¹¹ en relación a los principales marcos normativos en lo concerniente a las FNCER (Fuentes No Convencionales de Energías Renovables). Para luego presentar los apartes más relevantes de la ley más actual a la fecha del trabajo (ley 1715-2014), la cual, reúne los anteriores lineamientos planteados.

¹¹ MOTTA, Diana. SABOGAL, Javier. & HURTADO, Enrique. Una revisión a la reglamentación e incentivos de las energías renovables en Colombia. En: Facultad de ciencias económicas. Vol. XX., No 2 (Dic 2012); p. 55-67.

Tabla 1. Marco Normativo Relacionado con Energías Renovables en Colombia.

Normatividad	Descripción
Ley 51 - 1989	Se crea la comisión nacional de energía que es la encargada de determinar funciones de planeación energética. Además de efectuar contratar o promover la realización de estudios para establecer la conveniencia económica y social del desarrollo de fuentes y usos energéticos no convencionales y adoptar la política respectiva.
Decreto 2119-1992	Reestructura el IAN (Instituto de Asuntos Nucleares), y cambia de nombre a INEA; donde se presentan nuevas funciones como la de elaborar programas científicos y tecnológicos para la intensificación del uso de las fuentes alternas de energía.
Decreto 1682-1997	Suprime el INEA y se le asignan funciones a la UPME (Unidad de Planeación Minero Energética), de todos los recursos incluyendo las FNCE (Fuentes No Convencionales de Energía), para la estructuración, articulación e integración de planes energéticos.
Ley 697-2001	Promueve la utilización de las energías alternativas, además plantea la promoción del uso de las energías no convencionales de manera sostenible con el medio ambiente y los recursos naturales.
Ley 788-2002	Aplican exenciones ¹² tributarias para incentivar la compra e implementación de equipos y tecnologías, que demuestren impacto en la mitigación del cambio climático.
Resolución 18-919-2010	Resolución que adopta un plan de acción indicativo 2010-2015, para desarrollar el PROURE (Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía y demás formas de energía no convencionales).

Fuente: Los autores. Adaptado de: MOTTA, Diana. Et al. Una revisión a la reglamentación e incentivos de las energías renovables en Colombia. En: Facultad de ciencias económicas. Vol. XX., No 2 (Dic 2012); p. 55-67.

¹² Bonificación fiscal por la que, en determinados casos observados por la ley, el sujeto pasivo se ve liberado del pago de parte o la totalidad de un impuesto.

2.2.1 Ley 1715 de 2014

Por medio de esta ley, se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional, procurando interés para las zonas no interconectadas del territorio colombiano, como medio para el desarrollo económico y sostenible, promoviendo la gestión eficiente de la energía; aunque en la ley se contempla todos los recursos energéticos disponibles en el país, el enfoque que se describe en este documento es netamente dirigido a los apartes relacionados con la energía solar, tales como:

- El establecimiento de mecanismos de cooperación y coordinación entre el sector público y privado para el fomento de la inversión e investigación para el desarrollo de tecnologías limpias en la producción de energía, asimismo sobre su posterior utilización.
- El aprovechamiento de la energía solar en proyectos de urbanización, municipal, distrital y especial atención a las edificaciones oficiales que deben ser pioneras a partir de la trazabilidad de objetivos para la gestión eficiente de la energía que consumen.
- Puesta en marcha para generar acciones de cooperación internacional, en los ámbitos de: desarrollo de proyectos en conjunto entre países limítrofes, transferencia tecnológica y cooperación en materia de I&D.

Explorar el potencial en el mediano y largo plazo de tecnologías limpias que se encuentran en fase de investigación para su desarrollo¹³.

¹³ Presidencia de la República. Ley 1715 2014. [En línea]. 13-may-2014 [Citado 3-feb-2015]. Disponible en: (<http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Leyes/Documents/LEY/pdf>).

3. MARCO CONTEXTUAL

3.1 ANTECEDENTES

Se han realizado diversas investigaciones para los colectores solares, las cuales han utilizado, simulación y experimentación para analizar el comportamiento de estos dispositivos. Dentro de la literatura publicada sobre el tema, llamaron la atención los trabajos de:

Altamush Siddiqui (1997), el cual para determinar los coeficientes locales y promedio de convección y el flujo de fluidos en los tubos de un calentador solar de agua por termosifón ubicado en Aligarh, India ($27^{\circ} 5'$), obtuvo experimentalmente los parámetros característicos de rendimiento de un colector de placa plana. Los valores para $F_R(\tau\alpha)$ y $F_R U_L$ fueron 0.5 y $6 \text{ W/m}^2\text{C}$. También obtuvo la curva de eficiencia del colector que mostró una variación entre 20 y 50%.

Lee & Sharma (2007), quienes evaluaron el desempeño térmico anual de sistemas solares de calentamiento pasivos y activos para áreas rural/urbana en Corea del Sur. Por medio de experimentos, calcularon la eficiencia térmica del sistema y la eficiencia de colección de los colectores solares.

Koffi et al (2008), quienes determinaron experimentalmente la ecuación y la curva de eficiencia de estado estable de un colector de placa plana ubicado en Yamoussoukro, Costa de Marfil (6.54° latitud norte), con el fin de determinar el flujo másico del agua que recorre un calentador solar indirecto (con intercambiador de calor interno montado en diagonal, que funciona por termosifón). Los valores de los parámetros de desempeño térmico fueron 0.859 y $5.4749 \text{ Wm}^{-2}\text{C}^{-1}$, para $F_R(\tau\alpha)$ y $F_R U_L$, respectivamente. La eficiencia máxima del colector fue de aproximadamente del 58% con un flujo másico de $0.00856 \text{ Kg s}^{-1}$.

Michaelides & Eleftheriou (2011), investigaron el comportamiento de un sistema solar forzado para calentamiento de agua, bajo las condiciones climáticas reales de Nicosia, Chipre. Evaluaron y analizaron estadísticamente los resultados para encontrar similitudes en comportamientos relacionados con la estratificación térmica en el termotanque y en la eficiencia del colector. Los valores calculados de la eficiencia del colector fueron agrupados y analizados estadísticamente y se encontró que la eficiencia promedio es altamente predecible.

Shariah & Shialabi (1997), estudiaron la optimización de parámetros de diseño para un calentador solar de agua por termosifón para dos regiones en Jordán, por medio del uso en TRNSYS. Los resultados indicaron que la fracción solar del sistema puede mejorarse entre 10 y 25% cuando cada parámetro estudiado se elige apropiadamente. También encontraron que la fracción solar en la región de clima caliente es menos sensible a algunos parámetros que el sistema instalado en la región de clima templado.

Kalogirou & Papamarcou (2000), modelaron un calentador de agua que funciona por termosifón utilizando TRNSYS. El modelo fue validado por medio de experimentos y sus resultados para el aumento de la temperatura del agua en el tanque de almacenamiento se desviaron un 4,7%, con respecto a los datos obtenidos experimentalmente.

Hobbi & Siddiqui (2009), modelaron sistemas solares para calentamiento de agua de circulación forzada con colector de placa plana, para determinar los requerimientos de una unidad residencial para una sola familia en Montreal, Canadá. Los autores estudiaron los parámetros de diseño y determinaron sus valores óptimos por medio del programa de simulación TRNSYS. La fracción solar fue utilizada como parámetro de optimización.

Taherian et al (2011), realizaron la simulación dinámica en MATLAB de un colector de placa plana que forma parte de un calentador solar de agua por termosifón con intercambiador de calor tipo “chaqueta” en el tanque de almacenamiento, ubicado en el norte de Irán. Los resultados de la simulación fueron comparados con datos experimentales. La eficiencia media obtenida fue del 68%. También encontraron que la eficiencia instantánea del colector decrece conforme a la relación entre diferencias de temperatura cuando la radiación incidente se incrementa. Por lo tanto el estudio recomendó que el diseño del termo-tanque debía ser tal que la temperatura de entrada del fluido al colector debería estar lo más cercana posible a la temperatura ambiente. La simulación logro predecir la eficiencia para días soleados, pero parcialmente para días nublados, más sin embargo, logro predecir la temperatura media del fluido de trabajo. Esto fue atribuido al paso temporal de la simulación y a los datos climatológicos suministrados al programa.

De los estudios anteriores, se observa que la simulación es una herramienta útil para validar y estudiar el comportamiento de sistemas solares de calentamiento de agua y que el funcionamiento del calentador está fuertemente influenciado con el comportamiento del colector. Por lo tanto es prudente realizar primero la caracterización del colector y dejar para posteriores proyectos la caracterización de todo el sistema.

El primer estudio experimental detallado del desempeño de colectores de placa plana fue realizado por Hottel y Woertz en 1942 (Citados por Duffie & Beckman

2006). Este modelo se basó en mediciones de balance energético de un arreglo de colectores sobre un edificio experimental calentado por energía solar. Los cálculos se basaron en la temperatura media de la placa. Sus datos experimentales se tomaron en períodos de tiempo de varios días y el desempeño medido y calculado estuvo dentro del 13% de error sin tener en cuenta los efectos de polvo y sombra.

En otros estudios, se han determinado los parámetros térmicos de caracterización con el fin de evaluar el efecto en el cambio de materiales, cambios de forma, adición de accesorios en la eficiencia del colector. Entre estos estudios están (SILINGIRI, 2002), que evaluó los parámetros de eficiencia para un colector con un diseño que comprendía una placa de absorción polimérica, con respaldo absorbente. El diseño aumentó el factor de eficiencia del colector en un 20% y disminuyó el coeficiente de pérdidas en un 15%. Esto ocasionó un aumento en la eficiencia del colector en un 14%.

Anderson et al (2010), evaluaron teórica y experimentalmente el desempeño térmico de colectores cuya placa de absorción se pintó de gris y de verde. Se obtuvo la ecuación, la curva de eficiencia en estado estacionario y los parámetros de caracterización eficiencia óptica (0.65 y 0.63, para gris y verde respectivamente). Aunque los autores admiten valores de eficiencia más bajos, también mencionan un uso prometedor de este tipo de colectores gracias a su mejor integración estética a los edificios donde son instalados.

Chi- Dong Ho et al (2010), determinaron teórica y experimentalmente la eficiencia de colectores de tubos ascendentes de distinta sección rectangular y con recirculación externa de doble paso y sin recirculación. El estudio mostro un aumento de la eficiencia del colector de conductos rectangulares con respecto al de conductos circulares cuando operan al mismo flujo másico y la relación de recirculación, pero con decremento en la temperatura de entrada del agua.

Existen estudios que han caracterizado colectores solares de placa plana por medio de modelos transitorios cabe resaltar, Chuawittayawuth & Kumar (2002), quienes determinaron experimentalmente la curva de eficiencia de un colector de placa plana. Realizando un ajuste de mínimos cuadrados, adicionalmente estimaron los valores de para $F_R(\tau\alpha)$ y $F_R U_L$ que fueron de 0.78 y $8.02 \text{ W m}^{-2}\text{°C}^{-1}$, y así hallar la temperatura del agua en la salida del colector.

Rodríguez Hidalgo et al (2011), realizaron una investigación experimental para describir el comportamiento transitorio de un campo de colectores de placa plana de 50 m² bajo condiciones de trabajo exteriores. Para tal fin armaron un modelo transitorio de colector utilizando resistencias y capacitancias térmicas. Ellos calcularon la eficiencia del colector, usando datos de desempeño experimentales y por medio de la aplicación de los modelos. A partir de dicho análisis, se estableció que los dos resultados gráficamente son similares pero con valores más bajos que

el simple modelo de la curva de normalización de eficiencia, lo cual mostro que este modelo no es adecuado para calcular exactamente el desempeño del colector.

En Latinoamérica se encontraron los artículos publicados por Polo Bravo y Torres Muro (2004), los cuales presentaron algunas metodologías experimentales para evaluar a colectores solares en estados estáticos y dinámicos. Ellos mostraron que la calidad de fabricación y de funcionamiento de un colector solar de agua para uso doméstico o industrial depende del coeficiente de pérdidas térmicas U_L , la eficiencia óptica y la eficiencia de conversión. En el artículo también reportan la evaluación experimental del coeficiente de pérdidas por el método de evaluación en sombra cuyo valor fue de $4.5 \text{ Wm}^{-2}\text{°C}^{-1}$ y de la eficiencia óptica cuyo valor fue de 0.8. El estudio se realizó en Tacna, Perú.

Massipe Hernández et al (2005), Compararon el comportamiento térmico, de colectores solares integrales de cubierta de vidrio con colectores solares planos (en regimen forzado y termosifónico) en el clima de cuatro localidades en Cuba, Mediante el programa TRNSYS se simula un sistema de agua caliente sanitaria para cada uno de los colectores solares. El estudio permitió identificar que los colectores con cubierta de dos vidrios, permiten una mejora sustancial en sistemas solares trabajando a temperaturas bajas, y su comportamiento es prácticamente igual que el de los colectores solares planos y termosifónicos.

En Colombia, a pesar de la normatividad existente, son pocos los casos reportados en la literatura, donde los SST para calentamiento de agua sanitaria y sus componentes hayan sido caracterizados a través de ensayos y pruebas. Entre los estudios se puede destacar el de; Plazas et al (2001), quienes diseñaron, construyeron y evaluaron un colector de placa plana variando parámetros como número de tubos, espacio entre tubos, tipo de aislante y espesor del aislante. Se evaluaron cuatro configuraciones distintas y los valores de U_L y de $F_R(\tau\alpha)$, variaron entre $6.45 \text{ Wm}^{-2}\text{k}^{-1}$ a $10.94 \text{ Wm}^{-2}\text{k}^{-1}$ y de 0.44 a 0.62, respectivamente. También obtuvieron las curvas de rendimiento instantáneo de estado estacionario bajo las condiciones climáticas de la Universidad Distrital Sede Macarena B. El colector que presento un mejor rendimiento fue el que tenía el mayor número de tubos, menor espacio entre tubos, con aislante de fibra de vidrio.

Jaramillo et al (2005), obtuvieron experimentalmente la curva de eficiencia de un grupo de ocho colectores en paralelo, como si fueran un solo colector (cada colector tenía un área de 2.72 m^2). La eficiencia varió de 0.250 a 0.740. El grupo de colectores hacía parte de un sistema de calentamiento de agua para la industria de la curtiembre del Valle del Cauca, cuyo diseño propuso un nuevo sistema de circulación que permite aumentar la eficiencia del sistema.

Burbano et al (2007), realizaron los ensayos contemplados en la norma 4368¹⁴, entre los cuales está el de la medición a un calentador solar de agua diseñado, construido y localizado en la Universidad Tecnológica de Pereira. El inconveniente principal de este trabajo fue que los investigadores no determinaron experimentalmente la radiación solar directa, radiación solar difusa y velocidad del viento y por lo tanto estas cantidades tuvieron que ser estimadas con modelos matemáticos. Este inconveniente hace que los resultados de los ensayos sirvan simplemente como observaciones generales y no para saber si el SST cumple con los requerimientos de calidad. El ensayo de rendimiento integral del sistema sirvió para caracterizar el sistema más no el rendimiento del colector.

En síntesis los antecedentes revisados permitieron concluir que:

- Es conveniente caracterizar primero el colector que pertenece a un calentador solar de agua.
- Los parámetros de caracterización que se determinan con frecuencia en los diferentes estudios son, el parámetro de pérdida total de calor $F_R U_L$ y el parámetro de eficiencia óptica $F_R(\tau\alpha)$.
- La forma más frecuente para determinar los parámetros de caracterización de un colector solar es el método experimental, realizando un ensayo bajo condiciones estacionarias.
- La gran parte de las simulaciones realizadas están enfocadas en todo el comportamiento del sistema de funcionamiento de los calentadores solares de agua en condiciones en exterior y no se han encontrado registro de comportamientos simulados en interior.
- Los estudios realizados se han enfocado en relación a sistemas comerciales construidos, no se ha caracterizado un sistema de entrenamiento como el que se trabaja en el proyecto.
- En Colombia y específicamente en Bogotá, no existen estudios publicados sobre la caracterización de colectores de placa plana y la comparación mediante simulaciones.

¹⁴ Norma Técnica Colombiana, eficiencia energética. Sistemas de calentamiento de agua con energía solar y componentes.

3.2 MARCO TEÓRICO

Los fundamentos teóricos de este trabajo están basados en el fenómeno físico de calentamiento de agua por medio de la energía solar, el rendimiento térmico de un colector solar y aspectos teóricos sobre el modelamiento y simulación.

3.2.1 Energía solar térmica

Puede ser definida como un sistema de aprovechamiento, compuesto de subsistemas y componentes necesarios¹⁵ para la transformación de la energía radiante del sol en energía térmica, que puede ser utilizada para aplicaciones específicas como:

- Agua caliente destinada al consumo doméstico.
- Agua caliente sanitaria.
- Calefacción.
- Refrigeración.
- Producción de energía mecánica y a partir de ella electricidad.

Se clasifican de acuerdo a la temperatura que se requiere elevar el fluido, para una finalidad específica, de esta manera se pueden identificar sistemas de:

- Alta temperatura: corresponden estas instalaciones a las aplicaciones industriales de generación de vapor para producción de electricidad o similar. Requieren una temperatura superior a 250 °C.
- Media temperatura: las instalaciones de esta versión se emplean en procesos industriales con aplicación en la desalinización del agua de mar y en la refrigeración. Su finalidad es proporcionar fluidos térmicos con temperaturas entre 80 y 250 °C.
- Baja temperatura: corresponden a las instalaciones que se aplican a los sectores residencial y hotelero, para obtener agua caliente sanitaria y calefacción total o parcial, también para la climatización de piscinas, el fluido de esta versión no alcanza temperaturas superiores de 80°C¹⁶.

¹⁵ GARCÍA – VALLADARES, D., PILATOWSKY, I. & RUÍZ, V. *Outdoor test method to determinate the thermal behavior of solar domestic water heating systems*. En: *Solar energy*, 82(1), (2008); p. 4650-4658.

¹⁶ PERALES BENITO, Tomas. *Energía solar térmica*. Madrid: Ediciones copyright, 2008; p.145-148.

En la tabla 2, se observa el promedio mensual de la radiación solar en la ciudad de Bogotá.

Tabla 2. Promedio mensual de radiación solar en Bogotá.

Mes	Valor Promedio (kWh/m^2)
Enero	4.0
Febrero	4.1
Marzo	4.1
Abril	3.6
Mayo	3.0
Junio	3.6
Julio	4.2
Agosto	4.0
Septiembre	3.6
Octubre	3.6
Noviembre	3.2
Diciembre	3.7

Fuente: RADIACIÓN SOLAR PROMEDIO EN COLOMBIA. [En línea]. Evaluación de la radiación solar en Bogotá a partir de imágenes satelitales GOES. [Citado 2-mar-2015]. Disponible en internet: <http://www.bdigital.unal.edu.co/11223/.2013.pdf>.

De acuerdo con la tabla 2, el índice promedio de radiación solar anual en la ciudad de Bogotá es de $3.475 \text{ KW h}/m^{217}$. Lo que indica los bajos niveles de radiación promedio alcanzados, razón por la cual no es posible trabajar con los sistemas de alta y media temperatura así que los sistemas adecuados para trabajar en la ciudad son los sistemas de baja temperatura.

¹⁷ SUAREZ VARGAS, Diego Alejandro. Evaluación de la radiación solar en Bogotá a partir de imágenes satelitales GOES. Bogotá, 2013; p.149. Trabajo de investigación (magister en ciencias meteorología). Universidad nacional. Facultad de ciencias.

3.2.2 Clasificación de los SST para calentamiento de agua domestica.

Los SST pueden clasificarse en relación a siete atributos, relacionados con características tales como, simpleza, restricciones, sub-sistemas, y otros factores descritos en la tabla 3.

Tabla 3. Clasificación de los SST para calentamiento de agua doméstica

ATRIBUTOS	CARACTERISTICAS		
Atributo 1	solar puro	precalentamiento solar	solar más suplementario
Atributo 2	directo	Indirecto	
Atributo 3	abierto a la atmósfera	cerrado a la atmósfera	
Atributo 4	lleno	drenado de retorno (<i>drain back</i>)	drenado descendente (<i>drain down</i>)
Atributo 5	termosifón	Forzado	
Atributo 6	circulación	conexión en serie	
Atributo 7	almacenamiento remoto	Termo-tanque	Integral

Fuente: Los autores. Adaptado de GARCÍA – VALLADARES, D., PILATOWSKY, I. & RUÍZ, V. *Outdoor test method to determinate the thermal behavior of solar domestic water heating systems*. In: Solar energy, 82(1), (2008); p.4650-4658.

3.2.3 Sistema de entrenamiento en energía solar térmica, Lab-Volt modelo 46121

Es un dispositivo de calentamiento de agua, mediante el cual las personas que interactúan con él, estarán en capacidad de instalar los componentes del sistema, medir presiones, temperaturas y caudales; También permite crear entornos operativos reales, para facilitar el aprendizaje de forma que la energía solar se pueda utilizar para calentar un fluido (aire o agua).

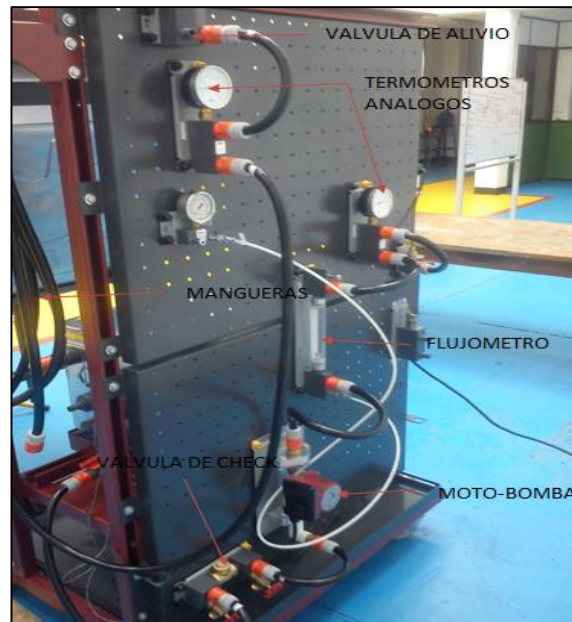
Figura 2. Vista Lateral izquierda del sistema de entrenamiento en energía solar térmica modelo 46121.



Fuente: Los autores

En la figura 2 se puede observar los componentes principales que se utilizan en este proyecto: el sistema de radiación simulada (lámpara) PL-25532Q2, el colector solar PSHC-1C, el tanque de almacenamiento COLEMAN y el panel de control.

Figura 3. Vista posterior del sistema de entrenamiento en energía solar térmica modelo 46121.



Fuente: Los autores

En la figura 3 se observan los elementos secundarios que se utilizan durante en el proyecto: moto- bomba, accesorios, elementos de control y mangueras.

En relación con la tabla 3. El sistema de entrenamiento en energía solar térmica Lab-volt modelo 46121, presenta varias características descritas en esta tabla, las cuales son:

- Sistema Directo: sistema en el que el agua calentada que será utilizada, pasa a través del colector.
- Sistema Cerrado: sistema en el cual el fluido de transferencia de calor está aislado a la atmosfera y se restringe solamente a ella, a través de una válvula de venteo y un vaso de llenado.
- Sistema Forzado: el fluido se fuerza a través del colector por medios mecánicos (bomba hidráulica), o por una presión generada externamente.
- Sistema de Circulación: sistema en el cual el fluido de transferencia de calor circula entre el colector y el termo tanque durante períodos de operación.
- Sistema tipo Termo-tanque: sistema en el que el tanque colinda con el colector y ambos son montados en una estructura de soporte común.¹⁸

¹⁸ GARCÍA – VALLADARES, D., PILATOWSKY, I. & RUÍZ, V. *Outdoor test method to determinate the thermal behavior of solar domestic water heating systems*. In: Solar energy, 82(1), (2008); p. 4650-4658.

3.3 COLECTORES SOLARES

En relación con la literatura consultada se han encontrado varias definiciones que caben ser resaltadas por la manera en que cada autor define este tipo de dispositivos, algunas de ellas dicen que los colectores solares:

Son un tipo especial de intercambiadores de calor que transforman la energía radiante del sol en calor, o energía interna del medio de transporte (fluido), que circula por él (DUFFIE & BECKMAN. 2006).¹⁹

En el mismo sentido, (PERALES, Benito. 2008), lo define de la siguiente manera: es un elemento activo de elevación de la temperatura del líquido que transita por él y por un medio de almacenamiento, el líquido calentado, puede ser utilizado en períodos diferentes a los de la conversión térmica.²⁰

Se suma a lo anterior (MANRIQUE, José.1984), el cual considera al colector como una máquina que transforma la energía y el rendimiento de la máquina lo define la relación de la energía aprovechada y la energía recibida.²¹

En cualquier sistema solar el componente más importante es el colector, de sus características depende la cantidad de energía que se puede aprovechar. A continuación se presentan las diversas clasificaciones existentes en relación a varios criterios para los colectores solares:

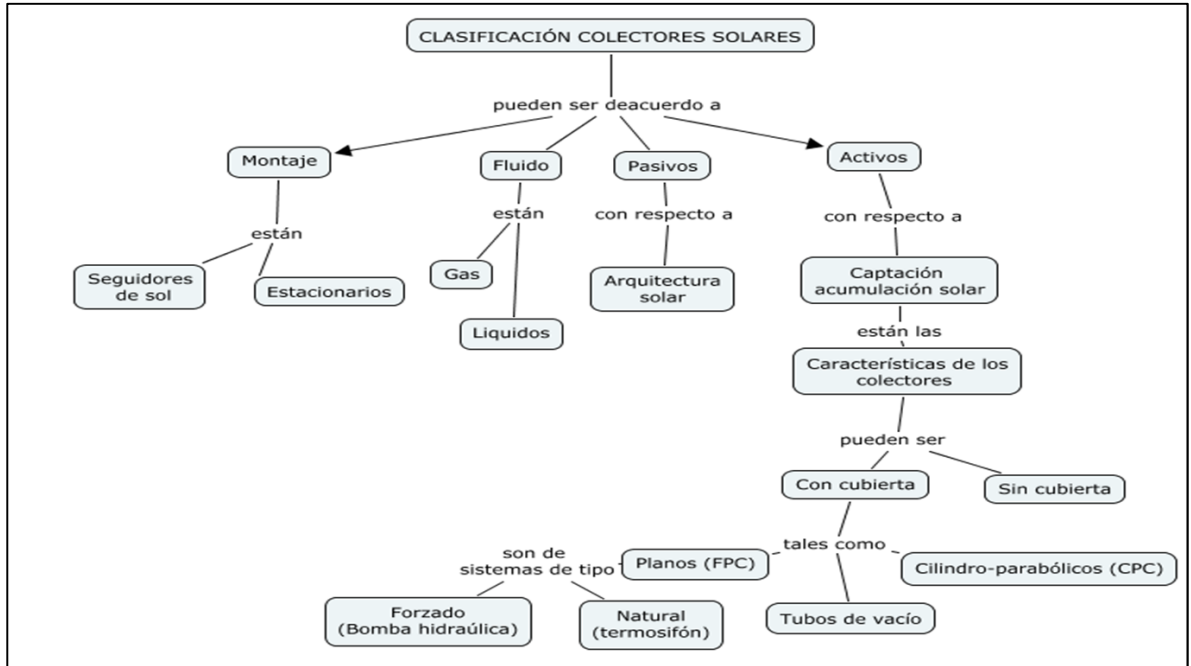
¹⁹ DUFFIE John A and BECKMAN William A. Chapter 6: Flat plate collector. In: *Solar engineering of thermal process*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2006; p.238.

²⁰ PERALES BENITO, Tomas. *Energía solar térmica*. Madrid: Ediciones copyright, 2008; p.147.

²¹ MANRIQUE, José A. *Energía solar*. México D.F. Harla S.A. 1984.

3.3.1 Tipos de colectores solares

Con base en la literatura publicada, los autores presentan la siguiente clasificación.



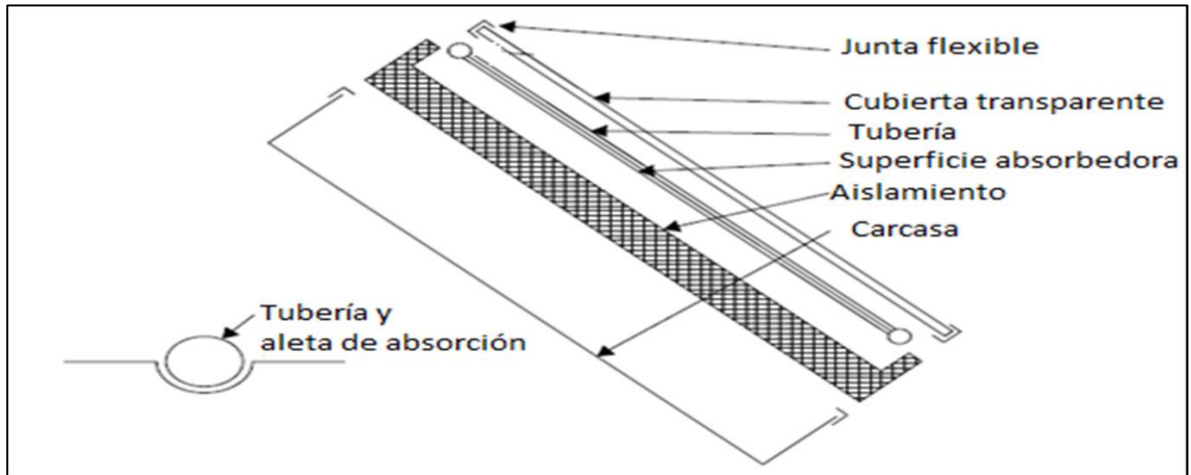
Fuente: Los autores. Mapa conceptual realizado con la herramienta Cmap-tools.

El colector del sistema de entrenamiento en energía solar térmica lab-volt modelo 46121, es un colector solar plano (o por sus siglas en inglés FPC *Flat Plate Collector*) de tipo forzado, de parrilla en la forma de la distribución de la tubería en su interior, con una sola cubierta de vidrio.

3.3.2 Componentes de los colectores solares de placa plana.

Las partes más importantes de un colector solar de placa plana típico se muestran esquemáticamente en la figura 4.

Figura 4. Componentes generales de un colector solar de placa plana



Fuente: Adaptada de KALOGIROU S. *Solar energy engineering processes and system: Solar energy collectors, flat plate collectors*. California: Elseiver inc.2009; p.128.

Cubierta transparente: es una superficie que permite el paso de luz visible a través de ella, impide la entrada de polvo, agua y otros elementos perjudiciales para el correcto funcionamiento del colector; por lo general se utiliza una cubierta transparente de vidrio templado para ofrecer una transmitancia (τ) alta a la onda corta y mayor durabilidad.

Superficie absorbedora: es una lámina de color negro, generalmente en cobre, en la que se incrusta una parrilla con tubos del mismo material, por la que circula el fluido de trabajo. La luz solar al incidir sobre la lámina es absorbida, elevando su temperatura; el incremento de temperatura depende de la intensidad de la radiación incidente y de su absorptividad (α).

Carcasa: es donde se coloca la superficie absorbedora y la cubierta transparente, sirve de soporte y protección de los agentes climáticos, debe estar construida en un material de una alta resistencia mecánica y química, en general el material más utilizado es aluminio.

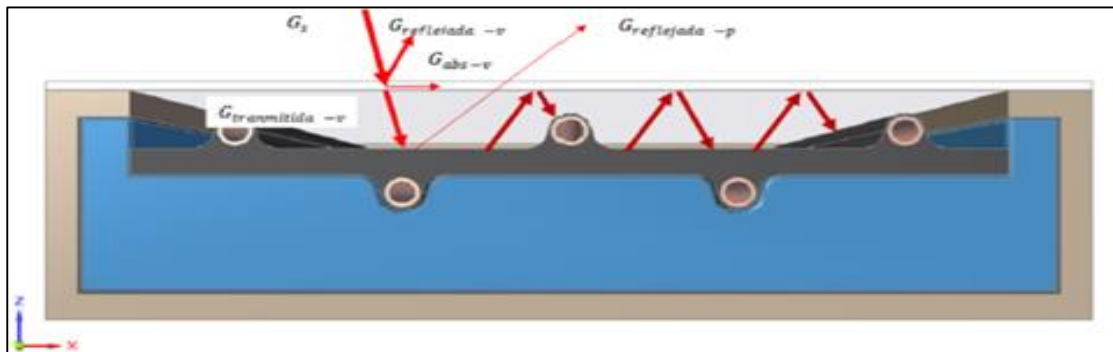
Elementos de aislamiento: permiten la disminución de pérdidas de calor entre la superficie absorbedora y el ambiente, las juntas son otro elemento que ayuda al aislamiento y unión entre la carcasa y la cubierta, también protege de la penetración de elementos al interior del colector²².

²² KALOGIROU S. *Solar energy engineering processes and system: Solar energy collectors, flat plate collectors*. California: Elseiver inc.2009; p.127-128.

3.3.3 Funcionamiento de los colectores solares de placa plana

Una característica importante que ofrece este sistema a diferencia de los demás es que aceptan los componentes de radiación directa, difusa y albedo, no requieren un seguimiento continuo del movimiento del sol y no necesitan mantenimiento durante su vida útil²³. El funcionamiento teórico de este tipo de colector solar plano con cubierta transparente está basado en el factor $(\tau\alpha)^{24}$ y en el efecto invernadero.

Figura 5. Funcionamiento teórico de un colector solar de placa plana.



Fuente: Semillero RETP SOLAR. Análisis del comportamiento térmico del calentador solar de agua ubicado en la FULL: modelamiento. 2012-2013.

En la figura 5, se presenta el proceso de funcionamiento teórico; la cubierta transparente recibe una radiación incidente (G_s), una fracción de la radiación incidente se refleja ($G_{reflejada-v}$), otra parte es absorbida (G_{abs-v}) y el resto ($G_{transmitida-v}$) atraviesa la cubierta; esta radiación llega a la superficie absorbidora, (representada por la placa de color negro). La energía que se refleja en la placa de absorción es de onda corta y atraviesa la cubierta de vidrio sin reflexión. La energía que se refleja en la superficie interior de la cubierta transparente es la radiación de onda larga que emite la superficie absorbidora por tener una temperatura mayor al cero absoluto. Una vez que absorbe energía la placa de absorción esta se transfiere por conducción a la tubería y luego por convección de la tubería al fluido. La transmisividad del vidrio depende de la longitud de onda de la luz incidente, de tal manera que en los vidrios ordinarios es muy transparente para la radiación de onda corta y prácticamente opaco para la

²³ MANRIQUE, José A. Energía solar fundamentos y aplicaciones foto térmicas: colectores planos. Mexico D.F: Harla s.a de c.v; p.127.

²⁴ Este factor dependerá del ángulo de incidencia y de la longitud de onda de la radiación incidente.

radiación de onda larga; el vidrio se comporta como un filtro que no deja pasar la radiación infrarroja, esta condición se denomina efecto invernadero. La amplitud de la banda opaca al infrarrojo, depende básicamente de la cantidad de óxido de hierro que contiene, así que al aumentar su concentración, aumenta la intensidad de la absorción²⁵.

3.3.4 Colector de placa plana PSHC-1C

A continuación se presentan la descripción y algunas características que se encontraron del colector utilizado.

La empresa fabricante del equipo, es la compañía de origen chino: Phnix electric co. Ltd, es fabricante de productos para el calentamiento de agua²⁶. Según la compañía el colector tiene una licencia de calidad certificada por la Solar Keymark License (SKL)²⁷, esta certificación fue creada por la Federación Europea en la Industria Termo-solar (ESTIF) y el Comité Europeo de Normalización (CEN). Bajo la norma UNE-EN 12975. Esta norma especifica los métodos de ensayo para la determinación de la capacidad de un colector solar de calentamiento líquido, y su segunda parte aborda los métodos de ensayo²⁸. Por las condiciones climáticas de Bogotá que fluctúan rápidamente²⁹ y las disposiciones del fabricante del entrenador, en el aspecto del manejo de seguridad del equipo, las cuales dicen que el dispositivo no puede ser utilizado en ambientes exteriores o donde la radiación solar terrestre incida directamente ya que el sistema puede alcanzar elevadas temperaturas y algunos elementos del mismo se pueden averiar, así como puede causar lesiones a las personas que lo están manipulando.

Algunos datos que se encuentran en el colector y en los manuales del entrenador solar térmico son descritos en la tabla 4.

²⁵ JUTGLAR, Lluís. Energía solar: energías alternativas y medio ambiente. Barcelona: Ceac, 2004; p.69.

²⁶ COLECTORES SOLARES. Colector de placa plana PSHC-1C. [En línea]. [Citado 05-mar-2015]. Disponible en: (<http://www.phnix-s.com/>).

²⁷ Licencia de certificación voluntaria para productos solares térmicos, la cual demuestra a los usuarios que un producto cumple con las normas europeas de calidad. Captadores solares según la norma (EN 12975).

²⁸ UNE-EN 12975-2, Sistemas solares térmicos y componentes. Captadores solares. Parte 2: métodos de ensayo (2006).

²⁹ RADIACIÓN SOLAR PROMEDIO EN COLOMBIA. [En línea]. Evaluación de la radiación solar en Bogotá a partir de imágenes satelitales GOES. [Citado 11-mar-2015]. Disponible en: (<http://www.bdigital.unal.edu.co/11223/.2013.pdf>).

Tabla 4. Especificaciones del colector solar PSHC-1C

Especificación	Unidad	Característica
Modelo		PSHC-1C
Dimensión	Mm	1115*1110*105
Peso	Kg	20,5
Área bruta	m ²	1,13
Área de absorción	m ²	1
Absorción	%	95
Emisión	%	5
Máxima presión de operación	Bar	6
Contenido	L	0,75
Capacidad térmica	Kj	2,90-6,12
Absorbedor		Bluetec, Eta plus Cu
Carcasa		Aluminio
Aislamiento	Mm	50 // resina de poliuretano
Soldadura		Ultrasónica, fusión completa entre la aleta y el tubo ascendente
Cubierta	Mm	3,2 // vidrio con bajo contenido de hierro
Tubería		Cobre
Tamaño de tubería de cabecera	Mm	22-25 // 2 piezas
Tamaño de los tubos ascendentes	Mm	10 // 9 piezas

Fuente: Colector solar PSHC-1C y manuales del entrenador solar térmico.

Como se denomina en la tabla 4, la superficie absorbidora se denomina *Bluetec Eta Plus Cu*³⁰. Este es un tratamiento selectivo que se les aplica a determinados colectores planos para proporcionar una alta absorptividad en longitudes de onda corta donde se recibe la radiación solar y una baja emisividad en longitudes de onda larga donde se producen las pérdidas de calor³¹. El proceso para aplicar este recubrimiento se llama “magnetron Sputtering³²”, el cual tiene lugar en una cámara rellena con argón, algunas características del mejoramiento de la superficie absorbidora con este tratamiento selectivo son: aumento de la vida de envejecimiento y resistencia a la temperatura, homogeneidad completa del revestimiento sobre el ancho de la placa y proceso de producción industrial de cero emisiones.

Cuando se aplican este tipo de tratamientos, para aumentar la eficiencia de los colectores solares, cabe resaltar que su costo también se incrementa, de esta manera se deja abierta la posibilidad en relación a las capacidades de adquisición que se tenga sobre estos dispositivos.

A pesar de la información encontrada del colector solar, existen varios parámetros como planos de diseño, curva de rendimiento que no aparecen razón por la cual en diversas ocasiones del proyecto se tendrán que asumir mediante correlaciones empíricas, datos característicos de los materiales de construcción y para el caso del rendimiento térmico del colector puede ser determinado por análisis ópticos y térmicos en relación a los materiales y diseño del colector o mediante evaluaciones de rendimiento experimental bajo condiciones controladas³³.

³⁰ SUPERFICIE ABSORBEDORA. Tratamiento selectivo bluetec eta plus cu. [En línea]. [Citado 05-mar-2015]. Disponible en: (<http://www.innosolar.cn/technology.asp?id=217/09/06/2014>).

³¹ SALGADO FERNÁNDEZ José M. Guía Completa de la Energía Solar Térmica y Termoeléctrica. Subsistema de captación. 2010; p.61-62.

³² Proceso en el cual se crea un campo entre el material conectado a un ánodo y el material selectivo, tratado como cátodo, que es bombardeado, depositándose los iones sobre las bandas de cobre.

³³ KALOGIROU S. Solar energy engineering processes and system: Performance of solar collectors. California: Elsevier inc. 2009; p.221.

3.4 RENDIMIENTO DE LOS COLECTORES SOLARES DE PLACA PLANA

Cuando aparecieron nuevos diseños de colectores solares en el mercado (a mediados de los setenta), se hizo necesario tener datos sobre su operación: cuánta energía absorben y cuánta pierden, el efecto del ángulo de incidencia de la radiación solar y el efecto de la capacidad calorífica³⁴. A estos datos se les denominaron parámetros de caracterización.

La necesidad de caracterizar los colectores hizo que en los Estados Unidos, Europa y en otros países se diseñaran y adoptaran pruebas estándar para obtener esta información³⁵.

Existen varios modelos de caracterización de colectores. Estos modelos comprenden numerosos parámetros y por lo tanto pueden variar en complejidad y servir para diferentes propósitos. Hay modelos muy detallados que incluyen todos los parámetros de diseño del colector (espesor de placa, espaciamiento entre tubos, número y material de cubiertas, dimensiones y material de aislamiento). Estos modelos son apropiados para el estudio del diseño del colector y para la comprensión de su funcionamiento.

Hay otro modelo más simple, que incluye solamente dos parámetros: uno representa la cantidad de radiación que absorbe el colector y otro que representa la energía térmica perdida por el colector. La base para los modelos de simulación está dada por la definición de rendimiento instantáneo. Sin embargo para el desarrollo de algunas variables implícitas en los programas, como se estableció en el transcurso del desarrollo del proyecto, fue necesario recurrir a algunos parámetros de diseño del colector, así de esta manera se trabaja mediante los dos modelos desarrollados anteriormente.

Para caracterizar por completo el rendimiento térmico de un colector solar se debe realizar tres tipos de pruebas: una para determinar su constante temporal, otra para la determinación de la respuesta del ángulo de incidencia y otra para la determinación del rendimiento instantáneo. Esta última prueba fue la que se implementó en este proyecto.

³⁴ DUFFIE John A and BECKMAN William A. Chapter 6: Flat plate collector. Collector test: efficiency, incidence angle modifier, and time constant. In: Solar engineering of thermal process. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2006; p.288-293.

³⁵ DUFFIE John A and BECKMAN William A. Op. cit, p. 291.

3.4.1 Rendimiento instantáneo de colectores solares de placa plana.

El rendimiento instantáneo de un colector representa la capacidad que tiene para transformar la energía solar en calor. Está influenciado por varios factores como los materiales utilizados, el diseño de la placa de absorción y cubierta de vidrio, el clima y las condiciones de operación. Las pruebas de rendimiento de un colector suministran los parámetros que se necesitan para predecir el rendimiento a largo plazo de SST.

Existen dos métodos básicos para evaluar el rendimiento de los colectores solares de placa plana:

- Utilizando procedimientos de evaluación transitorios.
- Procedimientos bajo condiciones estacionarias.

El primer método relaciona el monitoreo del rendimiento para rangos de radiación y condiciones del ángulo de incidencia, subsecuentemente el modelo matemático depende del tiempo y es usado para identificar datos transitorios de los parámetros de rendimiento del colector³⁶.

El segundo método evalúa las condiciones de ambiente y de operación del colector, estas deben permanecer constantes durante el período de la prueba³⁷.

El sistema operó en condiciones de estado cuasi-estacionario para poder controlar con mayor facilidad algunas variables, por las condiciones de manejo del equipo (indoor test) y las condiciones climáticas de la ciudad de Bogotá.

3.4.2 Balance de energía de un colector solar de placa plana en condiciones estacionarias.

Se plantea el rendimiento de un colector solar, el cual se define como la relación entre la tasa de energía útil ganada sobre un determinado período de tiempo y la cantidad de energía incidente sobre el mismo período así:

$$\eta = \frac{\int Q_u dt}{A_c \int G_T dt} \quad (1)$$

³⁶ KALOGIROU S. Solar energy engineering processes and system: Performance of solar collectors. California: Elsevier inc.2009; p.222.

³⁷ *Ibid.*, p. 223-224.

Ecuación 1. Rendimiento instantáneo de un colector solar de placa plana.

Donde Q_u es la cantidad de energía útil ganada [$w m^{-2}$], A_c es el área bruta del colector [m^{-2}], G_T es la radiación incidente sobre el colector [$w m^{-2}$].

En estado estacionario la energía útil ganada de salida es la diferencia entre la radiación absorbida y las pérdidas térmicas:

$$Q_u = A_c [S - U_L (T_{pm} - T_a)] \quad (2)$$

Ecuación 2. Energía útil de un colector solar de placa plana.

Donde A_c es el área bruta del colector [m^2], S es la radiación absorbida por el colector [$w m^{-2}$], U_L es el coeficiente global de pérdidas [$w m^{-2}k$], T_{pm} es la temperatura de la superficie absorbidora [k], T_a es la temperatura ambiente [k].

El problema con la ecuación 2, es la complejidad para calcular y medir la T_{pm} , ya que esta depende del diseño del colector, la radiación solar incidente y las condiciones de entrada del fluido, es así como se han utilizado parámetros correctivos para evaluar analíticamente y con otras variables la energía útil del sistema, a partir de dicho análisis, se presenta la siguiente ecuación:

$$Q_u = A_c F_R [G(\tau\alpha) - U_L (T_m - T_a)] \quad (3)$$

Ecuación 3. Energía útil de un colector solar de placa plana con factor correctivo.

Donde F_R se denomina, factor de remoción de calor³⁸, la cual es una cantidad adimensional menor que uno que se puede obtener analítica o experimentalmente; ya que no todo el calor pasa al fluido, dejando una cierta fracción en la superficie absorbidora, τ es la transmisividad de la cubierta transparente, α es la absorptividad de la superficie absorbidora, T_m es la temperatura media calculada por el promedio entre la temperatura de salida del fluido T_o [k], y la temperatura de entrada T_i [k].

Si se reemplaza Q_u en la ecuación 1, se obtiene

$$\eta = \frac{A_c F_R [G(\tau\alpha) - U_L (T_m - T_a)]}{A_c G} \quad (4)$$

³⁸ Cantidad que relaciona la energía útil actual ganada de un colector, a la ganada útil si toda la superficie del colector está a la temperatura de entrada del fluido.

Ecuación 4. Rendimiento del colector solar de placa plana con factor correctivo.

Aplicando la ley distributiva al área y sacando factor común se obtiene:

$$\eta = \frac{F_R A_c G (\tau\alpha)}{A_c G} - \frac{A_c F_R U_L (T_m - T_a)}{A_c G} \quad (5)$$

Ecuación 5. Rendimiento del colector aplicando ley distributiva y factor común.

Cancelando $A_c G$ en el primer término de la ecuación y el A_c en el segundo término de la ecuación, se obtiene el rendimiento instantáneo del colector.

$$\eta = F_R \tau\alpha - F_R U_L \left(\frac{T_m - T_a}{G} \right) \quad (6)$$

Ecuación 6. Rendimiento instantáneo de un colector solar de placa plana.

Las anteriores ecuaciones representan los fenómenos generales que se consideran para el cálculo del rendimiento del colector de placa plana, sin embargo en la literatura se encuentran modelos complejos con detalle de cada variable descrita, esto se presenta en relación al grado de condiciones de operación y demás fenómenos asociados con la operación y la finalidad de los colectores solares³⁹.

3.4.3 Rendimiento térmico estacionario básico

Consiste en exponer el colector a la radiación solar y medir temperaturas de entrada y salida así como el flujo másico del fluido. Estos datos representan la salida térmica del colector.

También es necesario tomar datos de radiación solar sobre el colector, temperatura ambiente y velocidad del viento. Estos datos representan condiciones que producen un desempeño térmico determinado.

El análisis de Hottel and Whillier, define la eficiencia térmica instantánea de un colector solar, bajo condiciones en estado estacionario, como la relación de la energía útil colectada a la energía captada por el área bruta del colector.

³⁹ DUFFIE John A and BECKMAN William A. Chapter 6: Flat plate collector. Collector characterizations. In: Solar engineering of thermal process. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2006. p. 290-300.

$$\eta = \frac{Q_u}{A G} = \frac{\dot{m} c_p (T_{out} - T_{int})}{A G} \quad (7)$$

Ecuación 7. Eficiencia térmica instantánea, bajo condiciones en estado estacionario

\dot{m} = Flujo másico del agua [$kg s^{-1}$]

c_p = Calor específico del agua [$J kg^{-1} K^{-1}$]

T_{out} = Temperatura de salida del agua del colector [K]

T_{int} = Temperatura de entrada del agua al colector [K]

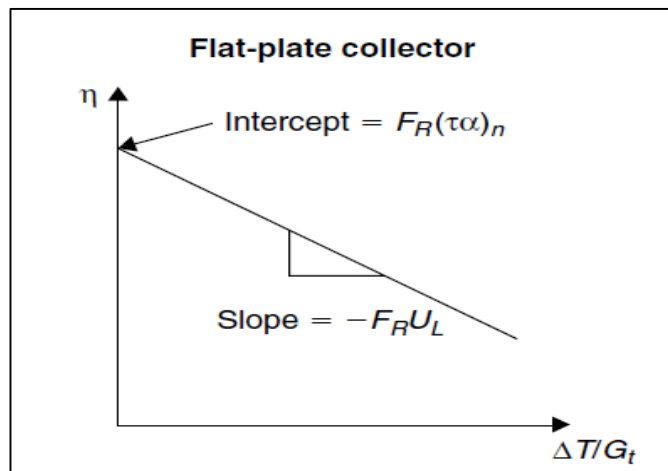
G = Radiación absorbida por el colector [$w m^{-2}$]

A = Área bruta del colector [m^2]

3.4.4 Curvas de rendimiento para colectores solares de placa plana

Si en la ecuación 6, se considera F_R, U_L, T_a constantes, se pueden representar gráficamente los datos experimentales en una gráfica conocida como curva de rendimiento de los colectores solares (figura 6). El factor $\left(\frac{T_m - T_a}{G}\right)$, también es llamado (temperatura reducida T^*).

Figura 6. Curva típica de rendimiento de un colector solar de placa plana



Fuente: KALOGIROU S. Solar energy engineering processes and system: Solar energy collectors, Collector thermal efficiency. California: Elsevier inc.2009; p. 224.

La curva se elabora ubicando los valores experimentales de T^* , en el eje horizontal, los valores de η en el eje vertical y realizando un ajuste por el método de los mínimos cuadrados. El corte de la recta con el eje vertical corresponde al producto de $F_R(\tau\alpha)$,

que representa la cantidad de energía absorbida por el colector y que se denomina parámetro de eficiencia óptica (η_0). Entre más alto sea este valor, mejor es el colector.

La pendiente de la recta corresponde al producto entre ($F_R U_L$), que representa la cantidad de energía que pierde el colector y se denomina parámetro de pérdida de calor total. Entre mas bajo sea este valor, mejor es el colector.

El intersección con el eje horizontal, donde la eficiencia de colección es cero, representa el equilibrio entre las pérdidas de calor y la energía absorbida. A este estado se le denomina “estancamiento del colector”. Esta situación se puede producir por una baja radiación solar sobre la apertura del colector o por un alto valor en la temperatura de entrada del fluido caloportador al colector.

3.5 SIMULACIÓN EN SISTEMAS SOLARES

Los simuladores de proceso se han convertido en herramientas poderosas para el diseño y evaluación de sistemas nuevos y existentes. Cualquier intento de obtener información acerca de un proceso a través de la realización de cálculos sobre un modelo matemático se denomina simulación. Estas simulaciones son aceptadas como herramientas para el rendimiento, diseño y optimización de procesos térmicos y han complementado la teoría experimental y tradicional en diversidad de áreas de la ciencia y la tecnología⁴⁰. La simulación está muy atada al desarrollo de modelos matemáticos. Estos representan el balance de materia y energía de un proceso. En el caso de calentamiento solar en estado estacionario, generalmente, los sistemas de ecuaciones son caracterizadas por combinaciones de ecuaciones algebraicas (lineales y no lineales) y ecuaciones diferenciales, las cuales representan el comportamiento físico del equipo⁴¹.

Las simulaciones complementan los experimentos físicos. Cuando se hacen comparaciones detalladas entre los resultados obtenidos de experimentos y simulaciones se logra un mejor entendimiento del sistema. Una vez que las simulaciones han sido verificadas con experimentos se pueden diseñar con confianza sistemas nuevos utilizando métodos de simulación⁴².

⁴⁰ NOPPER, R. (2012). *Mathematical modeling: an industrial perspective* – Guest Editorial. COMSOL News, 21(1).

⁴¹ SAFWAT Nafeyh, A. H. *Simulation of solar heating systems: an overview*. In: *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 9(1). 2005; p. 576 – 591.

⁴² DUFFIE John A and B ECKMAN William A. Chapter 19: *Simulations in solar process design* In: *Solar engineering of thermal process*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2006. p. 657-671.

3.5.1 Información obtenida de una simulación

Existen dos tipos de datos que pueden obtenerse de una simulación: a) Rendimiento integral sobre períodos de tiempo extendido, que se requiere cuando un sistema propuesto opera en un año lo cual representa el clima promedio a largo plazo. Un año es la base para los estudios económicos, pero puede necesitarse información para otros períodos de tiempo, desde días a muchos años. Estos datos se obtienen fácilmente por medio de la integración de las cantidades deseadas (salida del colector, perdidas en el tanque, bomba), sobre el período apropiado de tiempo. b) información dinámica del proceso, se puede investigar en relación al tiempo, cualquier variable que aparezca en el conjunto del sistema de ecuaciones del modelo (selección de materiales de construcción, temperaturas a través de los componentes del sistema).

3.5.2 Programas de simulación

Los programas de computador para simular procesos de calentamiento solar pueden clasificarse en dos grandes grupos:

a) Programas de propósito especial (*one-off*): se utilizan para procesos particulares de calentamiento solar o unidades de proceso, con una configuración fija. La estructura de esos programas es rígida, simple y lineal. Todo lo que el usuario debe suministrar son los datos y el ejecutable maneja el programa de la misma forma, sin importar la naturaleza del proceso simulado. La desventaja de estos programas es que un modelo existe para un solo proceso y cualquier cambio que se le haga al proceso puede requerir una amplia reprogramación. Existen muchos programas desarrollados de este tipo.

b) Programas de propósito general (modulares): en la estructura modular, el modelo matemático se formula, generalmente en términos de conjuntos de ecuaciones que relacionan las unidades de proceso. Cada uno de esos conjuntos se considera como un módulo independiente y autónomo. Una vez desarrollados los módulos, puede usarse en cualquier número de módulos que lo requieran. Los módulos representan un conjunto de bloques de construcción que son seleccionados y ensamblados por el usuario para producir un modelo completo del proceso a estudiar.⁴³ Son pocos los programas desarrollados de este tipo.

⁴³ SAFWAT Nafeyh, A. H. Op. cit, p. 580-585.

3.5.3 Modelación computacional de sistemas térmicos

El modelamiento computacional de sistemas térmicos presenta las siguientes ventajas:

- Elimina los gastos de producción de prototipos.
- Los sistemas complejos se pueden organizar en un formato más comprensible.
- Suministra conocimiento profundo de la operación del sistema y de la interacción entre sus componentes.
- Posibilita la optimización de los componentes del sistema.
- Suministra las variaciones de temperatura del sistema.
- Permite estimar el efecto de cambio en una variable de diseño sobre el rendimiento utilizando las mismas condiciones climáticas⁴⁴.

El primer paso para modelar sistemas es la derivación de una estructura para representarlo. El desarrollo de esta estructura produce una comprensión real del sistema, de esta manera se establecen las fronteras que maneja el dispositivo, de manera que exista coherencia con el problema que se analiza. Esto se logra a partir de la identificación de ¿Cuáles son los elementos, procesos y efectos internos del sistema? Y ¿Cuáles externos?

3.5.4 Procesos para estructurar simulaciones

Considerando algunos artículos publicados⁴⁵, se pueden identificar los siguientes procesos que se llevan a cabo para estructurar sistemas mediante simulaciones:

- Comprensión del fenómeno físico que ocurre en el dispositivo: es fundamental conocer el proceso de funcionamiento, así como de transformación y utilización de la energía para llevar a cabo la siguiente etapa.
- Estructurar el sistema: comprende la identificación de los componentes reales que involucran el proceso, y los cuales se adaptaran al simulador, para esta etapa es prudente realizar un diagrama de flujo con la información del proceso que se va a llevar a cabo, así como las características técnicas de cada sub-componente que tiene como tal el sistema.

⁴⁴ KALOGIROU, S. A. & PAPAMARCOU, C. *Modeling of a thermosyphon solar water heating system and simple model validation. Renewable Energy*, 21(1), 2000; p. 471 – 493.

⁴⁵ SAFWAT Nafeyh, A. H. *Simulation of solar heating systems: an overview. In: Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 9(1). 2005; p. 583.

- Estructurar la simulación: una vez identificadas las variables y componentes reales que tiene el dispositivo, se debe adaptar a los componentes que tiene el simulador, para esta etapa es recomendable también realizar el diagrama de flujo del sistema, así se puede comprender el entorno de las variables que se relacionan en los sub-componentes y finalmente establecen el funcionamiento del sistema.
- Conexión de las entradas y salidas de cada unidad de proceso: Una vez en el simulador se debe establecer las variables dependientes e independientes que repercuten en el sistema, la mayor parte de los simuladores presentan entradas y salidas, la primera representa variables, parámetros, modelos y ecuaciones de los sub-componentes que se relacionan para llegar a las salidas del entorno, las cuales generalmente se representan como los resultados que se obtienen de la simulación a realizar.
- Modelado de las ecuaciones para cada unidad de proceso: cada componente está representado por una ecuación que modelará matemáticamente el comportamiento de todo el sistema.
- Final del ciclo: es la etapa mediante la cual se dan los resultados de la simulación, en forma de valores estimados así como algunos procedimientos iterativos para el cálculo.
- Entender los resultados: etapa de análisis mediante la cual se analiza el comportamiento del sistema mediante las condiciones establecidas, los valores que se obtienen evaluados y estimados, si es necesario realizar cambios para mejorar el comportamiento de la información.

La estructura que representa el sistema, no debe ser confundida con un sistema real, la estructura es una copia imperfecta de la realidad⁴⁶.

A partir de las anteriores consideraciones, y de acuerdo a los sistemas solares térmicos (calentamiento de agua), el tipo de programa adecuado a trabajar es el de “propósito general, tipo modular secuencial”, ya que el programa puede representar el sistema en un conjunto de ecuaciones diferenciales, su funcionamiento es más flexible cuando se requiere realizar un cambio en las variables de diseño y verificar su comportamiento en función del tiempo, sin necesidad de afectar los demás componentes ni producir una reprogramación total del sistema. Por esta razón el programa más adecuado para trabajar los sistemas de calentamiento de agua es TRNSYS⁴⁷, ya que presenta las características anteriormente descritas, además es el más utilizado en la comunidad académica.

⁴⁶ KALOGIROU, S. A. & PAPAMARCOU, C. *Modeling of a thermosyphon solar water heating system and simple model validation. Renewable Energy*, 21(1), 2000; p. 589.

⁴⁷ KLEIN, S.A., et al., TRNSYS version program manual. Solar energy laboratory, University of Wisconsin, Madison. 2010.

3.5.5 Programa de simulación transitoria de procesos térmicos TRNSYS

TRNSYS es un acrónimo para un programa de simulación transitoria y es un modelo de simulación para procesos térmicos. Fue desarrollado por los miembros del Laboratorio de Energía Solar de la Universidad de Wisconsin (1975)⁴⁸, y se ha ido desarrollando a través de distintos centros de investigación de EE.UU, Alemania, Francia y otros países. Inicialmente fue desarrollado para aplicaciones de energía solar, y ahora se usa para simular una amplia variedad de procesos térmicos y eléctricos, además puede simular otros procesos transitorios como el tráfico de vehículos o procesos biológicos⁴⁹.

El programa se compone de dos partes:

La primera es un motor llamado “*Kernel*”, el cual lee y procesa los archivos de entrada de manera iterativa para resolver el sistema planteado en el simulador, en ese mismo sentido, “*kernel*”, también determina las propiedades termo-físicas, invierte matrices, realiza regresiones lineales e interpola archivos de datos externos. La segunda parte es la amplia biblioteca de componentes, para diferentes procesos. Cada componente modela el rendimiento real de una parte de todo el conjunto del sistema.

Cabe agregar que los modelos del programa se han construido de tal manera que el usuario pueda modificar los componentes existentes, inclusive pueda escribir sus propios componentes (código fuente de programación fortran), razón por la cual amplia más las capacidades de su entorno.

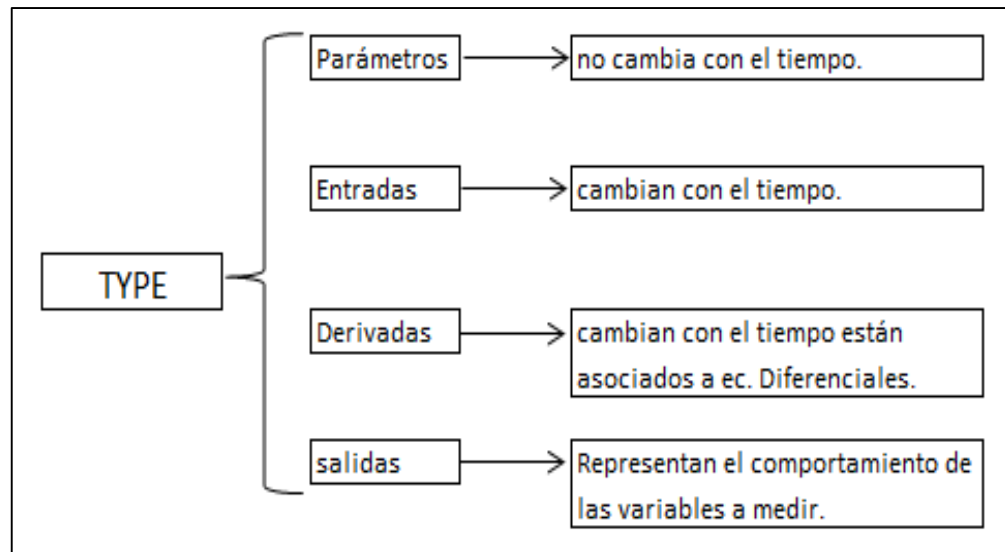
TRNSYS es de arquitectura modular, es decir que el problema general se reduce a problemas más pequeños que interactúan a través de llamadas a procedimientos. Estas llamadas se realizan conectando las variables que se quieren leer en otra preforma. Las preformas agrupan, precisamente funciones afines y también los datos que manipulan, de manera que aquellos que no son empleados por las demás preformas del sistema, quedan ocultos en ellos. Trnsys también dispone de subrutinas que permiten el tratamiento y dar formato a los resultados de las simulaciones, el ejecutable resuelve los componentes del sistema e itera para cada instante de tiempo hasta que el sistema de la ecuación converge.

⁴⁸ Kalogirou, S. A. & Papamarcou, C. *Modeling of a thermosyphon solar water heating system and simple model validation. Renewable Energy*, 21(1), 2000; p. 471 – 493.

⁴⁹ Aiguasol. Trnsys. [En línea]. Trnsys v.17 simulación de sistemas energéticos. [Citado 19-mar-2015]. Disponible en: (<http://store.aiguasol.coop/castellano/programas/sistemas-energeticos/trnsys-v17.html>).

A continuación se presenta un esquema general en la figura 7, que representa la arquitectura de modulación de los *types* que aparecen en el programa.

Figura 7. Esquema modular de las preformas en TRNSYS



Fuente: Adaptado de TRNSYS (TRAnNsient SYstem Simulation Program)⁵⁰.

Los modelos matemáticos de las preformas se dan en términos de ecuaciones diferenciales ordinarias y ecuaciones algebraicas. Estos permiten un análisis detallado de todos los componentes del sistema y es ampliamente aceptado⁵¹ ya que aproximan una predicción del desempeño de los sistemas solares.

Entonces los problemas que se desarrollan en el simulador, se reducen a los siguientes ciclos:

- a) Identificación de todos los componentes (preformas o *types*)⁵² que conforman un sistema en particular, b) Formulación de los modelos matemáticos, que representan las preformas o *types* características de ellos y c) Procesos de interconexión para formar el conjunto del sistema, representa la conexión de todos los *types* que han de caracterizar el proceso.

⁵⁰ Aguasol. Trnsys. [En línea]. Trnsys v.17 simulación de sistemas energéticos. [Citado 19-mar-2015]. Disponible en: (<http://aguasol.coop/wp-content/uploads/2010/11/Introduccion-a-TRNSYS.pdf>).

⁵¹ En relación a sistemas solares, Trnsys es la herramienta de referencia para la SRCC (*Solar Rating & Certification Corporation*) en USA y aparece en la normatividad europea de SST (ENV-12977-2).

⁵² Representa una caja negra, que contiene la descripción del componente, entradas, salidas, parámetros, sin tener en cuenta como se realiza el proceso.

4. MARCO METODOLÓGICO

4.1 MÉTODO

4.1.1 Tipo de investigación

La investigación a desarrollar es aplicada de tipo descriptivo- correlacional, ya que busca evidenciar y contrastar el comportamiento del colector solar de referencia PSHC-1C, mediante la aplicación de experimentos físicos y computacionales. Es descriptiva por que se requiere medir unas variables en el entrenador y correlacional porque se quiere medir el grado de comparación entre estas variables; las variables experimentales y las obtenidas en la simulación.

4.1.2 Tipo de diseño

Es un diseño básico no experimental del subtipo transversal descriptivo ya que, primero no se va a manipular intencionalmente ninguna variable independiente del colector sino que simplemente se va a medir en éste variables como la radiación solar simulada incidente, flujo másico, temperaturas de entrada y salida del colector, temperatura ambiente, velocidad del viento, rendimiento instantáneo, parámetros de pérdida total de calor y parámetro de eficiencia óptica, y se va a determinar el valor de cada una, en un intervalo de tiempo dado.

4.1.3 Tipo de información

La información que se obtiene es de tipo cuantitativa, ya que por medio del experimento físico y computacional se encuentran valores de la temperatura de salida y la eficiencia del colector solar de placa plana PSHC-1C.

4.2 INSTRUMENTOS

Durante la investigación se utiliza un software como instrumento, el cual se empleó para el análisis transitorio del comportamiento del colector solar de placa plana PSHC-1C.

- TRNSYS V.17: empleado para analizar el comportamiento del colector solar mediante sus parámetros de diseño en cuanto a materiales y el comportamiento de este mediante índices de radiación simulada.
- Piranómetro: empleado para medir la intensidad de la radiación simulada emitida por la lámpara.
- Medidor 3 en 1: empleado para medir la velocidad del viento, temperatura ambiente y humedad relativa en el lugar que se adecuo para realizar las pruebas experimentales.
- Multímetro digital: empleado para medir la variación del voltaje generado por el piranómetro.

4.3 PROCEDIMIENTO

Para llevar a cabo los objetivos propuestos se desarrolló el proyecto en distintas etapas, las cuales pueden en algunos casos trabajarse en forma sincrónica y/o asincrónica.

4.3.1 Etapa I. Recopilación y selección de la información

En esta etapa, se revisaron de los documentos (artículos científicos, libros, datos estadísticos, normas nacionales e internacionales), que involucren la comparación y análisis de colectores solares bajo diferentes parámetros de estudio.

4.3.2 Etapa II. Reconocimiento del entrenador solar térmico *Lab-Volt 46121*

En esta etapa, se identificaron los componentes que hacen parte del sistema, así como su funcionamiento, las recomendaciones de seguridad personal, del manejo del equipo y finalmente las especificaciones técnicas de cada componente.

4.3.3 Etapa III. Experimentación con el entrenador para la obtención del rendimiento del colector

En esta etapa, se midió la radiación que emite la lámpara de referencia PL 2532Q2, mediante un piranómetro⁵³ y bajo condiciones establecidas por las normativas nacionales y algunas normas internacionales.

Se trabajó directamente con el colector y se aplicaron protocolos estandarizados para hallar la curva de rendimiento de este así como la temperatura de salida y el rendimiento bajo condiciones controladas.

4.3.4 Etapa IV. Simulación del sistema

En esta etapa se procedió a realizar diagramas de flujo en relación al desarrollo real de funcionamiento y en relación al modelo de trabajo en el *software* de simulación, una vez establecidas las pre-formas de los componentes (en este caso son las rutinas implícitas que caracterizan el dispositivo), para el caso del colector se procede a caracterizar las condiciones de entrada, que sugiere en muchos casos correlacionar variables y adaptarlas al entorno de operación simulado que se desarrolla.

Se simuló el comportamiento de colector mediante las condiciones dadas y los datos generados por los parámetros establecidos en los estándares nacionales para la radiación simulada generada por la lámpara con la que cuenta el sistema.

4.3.5 Etapa V. Análisis y socialización de los resultados del proyecto

En esta etapa se analizaron los datos de temperatura de salida y el rendimiento obtenidos en el *software TRNSYS v.17* y los obtenidos experimentalmente por medio del sistema de entrenamiento en energía solar térmica *Lab-volt 46121* en condiciones cuasi-estacionarias en interior. Se elaboraron los documentos que permiten divulgar los resultados obtenidos en el proyecto.

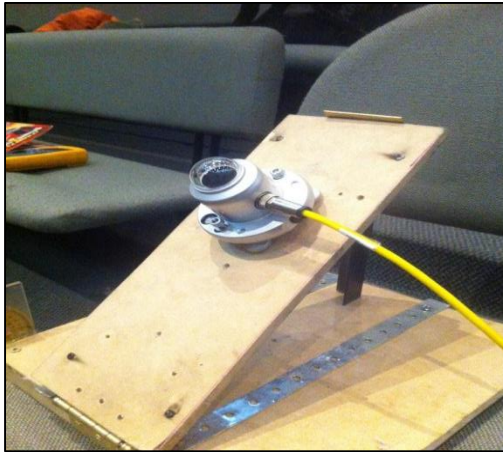
⁵³ Transforma la radiación solar en otra forma de energía. Dando como resultado una medida proporcional a la intensidad de la radiación.

5. PRUEBAS EXPERIMENTALES

5.1 MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN SIMULADA

Como el entrenador solar térmico se utiliza en un ambiente cerrado (pruebas en interior), y no se conoce la cantidad de energía que emiten las lámparas que simulan la radiación solar, fue necesario realizar pruebas para medir la cantidad de energía que puede suministrar al colector. Por este motivo se realiza un protocolo para hallar la intensidad de las lámparas ver (anexo A: Protocolo de medición radiación simulada). El protocolo se enfoca en dar cumplimiento a los requisitos de la normatividad existente para pruebas en interior⁵⁴. Se realizan tres pruebas para medir datos, cambiando variables tales como: la distancia de las lámparas y el ángulo de inclinación del foco de luz y así registrar la energía captada por el piranómetro (ver anexo B: Certificado de la constante de calibración del Piranómetro). El procedimiento de las pruebas realizadas, se da a conocer en relación a las siguientes figuras.

Figura 8. Montaje del piranómetro en la base de soporte



Fuente: Los autores

⁵⁴ ICONTEC. NTC 5434-2. Sistemas Solares Térmicos Y Componentes, Colectores Solares, Parte 2: Métodos de Ensayo.

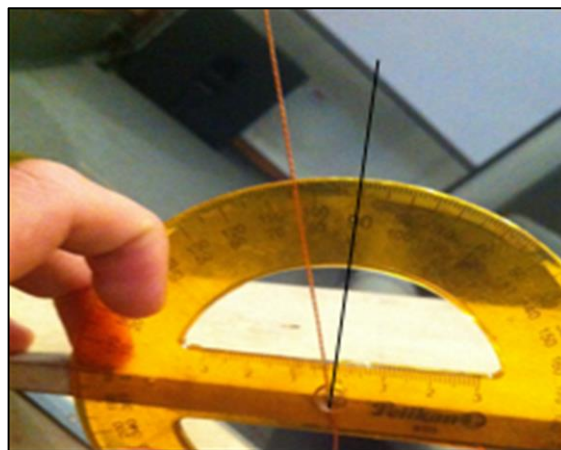
En la figura 8, se observa un soporte el cual es construido (ver anexo C: Planos de la estructura para soporte del piranómetro), para minimizar efectos de emisividad de la cubierta transparente del colector en las mediciones del piranómetro, también para ubicar el piranómetro en relación al ángulo de apertura del colector solar 50° , la medición se realiza en el auditorio de la facultad de ingeniería, con el objeto de simplificar las medidas de la irradiancia simulada, en este caso minimizando la irradiancia reflejada y procurando que la radiación que emite la lámpara sea la única que registre el piranómetro.

Figura 9. Primer registro de datos



Fuente: Los autores

Figura 10. Medición del ángulo incidente



Fuente: Los autores

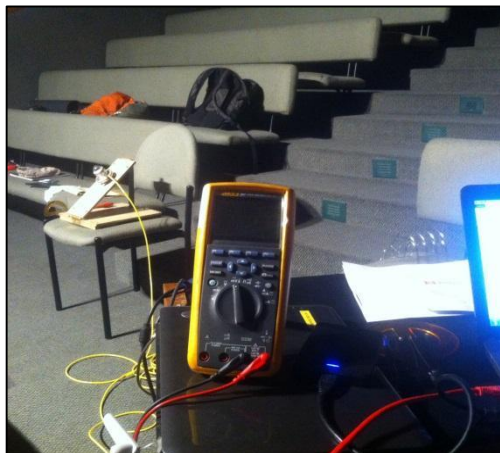
Como se observa en la figura 9, el primer registro de datos se realiza considerando una distancia horizontal con respecto al eje del piranómetro de 3m, la misma longitud pero vertical con respecto al eje del piranómetro y una inclinación de los focos de 50° con respecto al mismo eje, para garantizar que el rayo de incidencia principal sea perpendicular al área de apertura del colector (ángulo de incidencia sea menor de 20°), como lo indica la norma. En la figura 10 se observa que el ángulo es de aproximadamente 15° .

Figura 11. Segundo registro de datos



Fuente: Los autores

Figura 12. Medición de los datos



Fuente: Los autores

Como se observa en la figura 11, se realiza el segundo registro de datos considerando una distancia horizontal con respecto al eje del piranómetro de 3m y los focos se dejan a 90° con respecto a la vertical del piranómetro, para minimizar

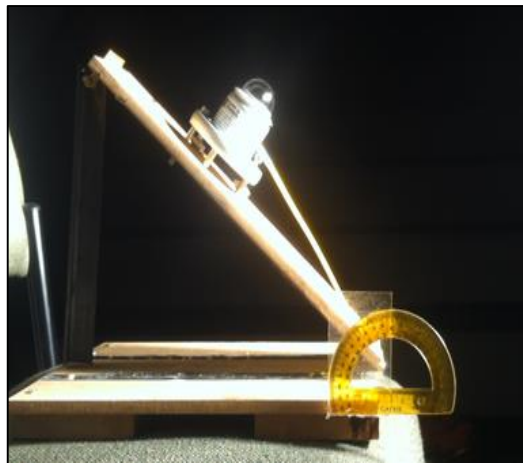
los efectos de la radiación infrarroja de la fuente de luz del simulador en la medición. La figura 12 muestra la conexión del piranómetro al multímetro en donde se registran los cambios de voltaje.

Figura 13. Tercer registro de datos



Fuente: Los autores

Figura 14. Panorama del piranómetro



Fuente: Los autores

Como puede observarse en la figura 13, se realiza el tercer registro de datos esta vez considerando una distancia de 0,5 m desde la vertical del piranómetro hasta el foco incidente de luz. La figura 14 se observa en detalle el montaje realizado para

la medición de las pruebas. Los datos medidos de radiación solar simulada se pueden observar en el Anexo D.

5.2 ESTÁNDARES PARA PRUEBAS EXPERIMENTALES EN INTERIOR

Diferentes organizaciones a nivel mundial, se han encargado de estandarizar y unificar normatividades para certificar colectores solares, esto con el fin de mejorar la calidad de los productos que se fabrican, comercializan y finalmente se entregan al consumidor.

La normalización fomenta confianza en el comprador, crecimiento del mercado y el fomento del desarrollo tecnológico. Esto permite el acceso a la mejora de la capacidad de innovación y la competencia efectiva y rentable, a través de factores tales como la diferenciación de productos.

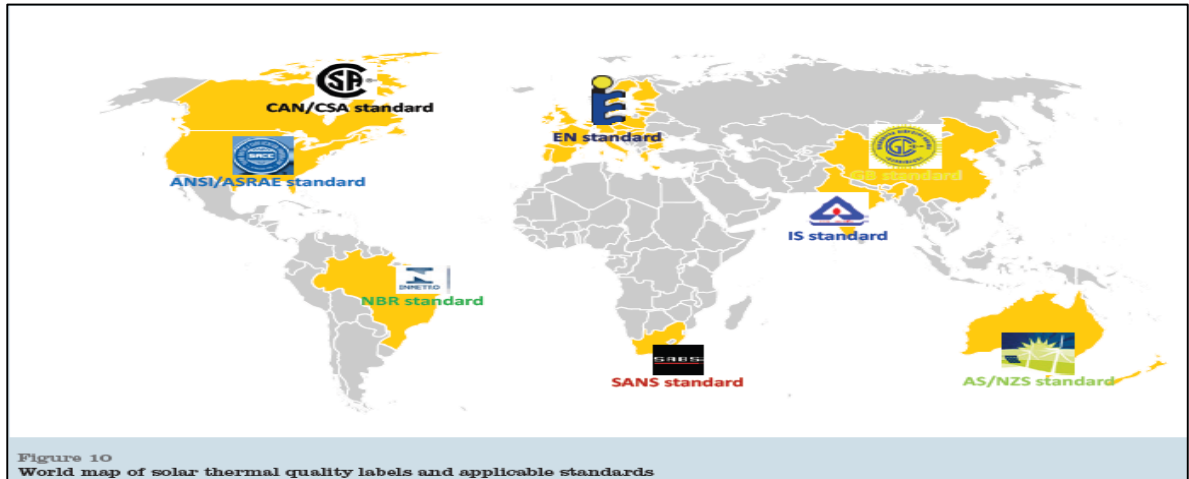
Es evidente entonces que las certificaciones de los sistemas solares garantizan:

- Productos de primera calidad.
- Garantía que el producto que se vende es idéntico al producto que se ha sometido a los ensayos.
- Garantía que el producto se analiza según la norma correspondiente⁵⁵.

En el mundo se conocen los estándares que muestra la figura 15, relacionados con pruebas de calidad solar térmica.

⁵⁵*Global solar water heating market transformation and strengthening initiative, guide on standardization and quality assurance for solar thermal.* [En línea]. [Citado 28-abr-2015]. Disponible en: (http://www.estif.org/fileadmin/estif/content/publications/downloads/standardisation_single_v02.pdf).

Figura 15. Distribución en el mundo de los estándares para la certificación de colectores solares



Fuente: Guide on standardization and quality assurance for solar thermal.

En relación a pruebas del rendimiento térmico para colectores solares, la tabla 9 compara las normas y los requerimientos básicos para condiciones de ensayo generales de cada estándar.

Tabla 5. Comparación de procedimientos para el rendimiento térmico

Thermal performance	
Standard	Test procedure
EN 12975-2	Collector B, pre-conditioning 5h with $G > 700 \text{ W/m}^2$, Steady State (minimum global irradiation $G > 700 \text{ W/m}^2$, diffuse fraction $< 30 \%$, Wind speed 2 - 4 m/s. Volume flow $0.02 \text{ kg/(s}^2\text{m}^2)$, deviation mass flow $\pm 1 \%$, deviation inlet temperature $\pm 0.1 \text{ K}$, Tout-Tin $> 1 \text{ K}$, deviation Irradiation $\pm 50 \text{ W/m}^2$, Tm-Tamb at $\eta_0 \pm 3\text{K}$) or Quasi-Dynamic Testing (Wind speed 1 - 4 m/s. Volume flow $0.02 \text{ kg/(s}^2\text{m}^2)$, deviation mass flow $\pm 1 \%$, deviation inlet temperature $\pm 1 \text{ K}$, Tout-Tin $> 1 \text{ K}$)
ISO 9806-1	Collector A, tilt-angle latitude $\pm 5^\circ$ but not less than 30° , diffuse fraction $< 20 \%$. Collector area: 0.1 % accuracy, minimum global irradiation $G > 800 \text{ W/m}^2$. Wind speed 2 - 4 m/s. Volume flow $0.02 \text{ kg/(s}^2\text{m}^2)$, max. drift $\pm 10 \%$, deviation mass flow $\pm 1 \%$, deviation Irradiation $\pm 50 \text{ W/m}^2$. Deviation Tamb $\pm 1 \text{ K}$, deviation inlet temperature $\pm 0.1 \text{ K}$. Tout-Tin $> 1.5 \text{ K}$, Tm-Tamb at $\eta_0 \pm 3\text{K}$. Conditioning phase minimum 15 min and measurement phase minimum 15 min.
ISO 9806-2	Collector A according to ISO 9806-1
Standard 100-8	Collector A, 5 minutes measurement points / $0.07 \text{ g/(s}^2\text{m}^2)$ according to ISO 9806-1
CAN/CSA-F378-87	Collector A according to ANSI/ASHRAE
ANSI/ASHRAE standard 93	Minimum global irradiation $G > 800 \text{ W/m}^2$, deviation irradiation $\pm 32 \text{ W/m}^2$, diffuse fraction $< 20 \%$. Max. Tamb $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Wind speed 2.0 - 4.0 m/s, volume flow $0.02 \text{ g/(s}^2\text{m}^2)$. deviation inlet temperature $\pm 2\%$ or 1°C deviation mass flow $\pm 2\%$ or 0.000315 l/s . Deviation Tamb $\pm 1,5 \text{ K}$. Conditioning phase 2*times constant or minimum 10 minutes. Measurement phase minimum 0.5*times constant or minimum 5 minutes.
AS/NZS 2735.1	Collector A, tilt-angle latitude $\pm 5^\circ$ but not less than 30° , diffuse fraction $< 20 \%$. Collector area: 0.1 % accuracy, minimum global irradiation $G > 800 \text{ W/m}^2$. Wind speed 2 - 4 m/s. Volume flow $0.02 \text{ kg/(s}^2\text{m}^2)$, max. drift $\pm 10 \%$, deviation mass flow $\pm 1 \%$, deviation Irradiation $\pm 50 \text{ W/m}^2$. Deviation Tamb $\pm 1 \text{ K}$, deviation inlet temperature $\pm 0.1 \text{ K}$. Tout-Tin $> 1.5 \text{ K}$, Tm-Tamb at $\eta_0 \pm 3\text{K}$. Conditioning phase minimum 15 min and measurement phase minimum 15 min.
AS/NZS 2712	no procedure specified

Fuente: Guide on standardization and quality assurance for solar thermal.

En Colombia, el ICONTEC (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación) presenta la normatividad número 5434 (Sistemas solares térmicos y componentes, colectores solares parte II. Métodos y ensayos), la cual básicamente es una adaptación de la norma europea EN 129-75-2. En efecto, esta norma aborda las condiciones para la realización de las pruebas tanto en exterior como en interior, sin embargo, en el caso del proyecto se tendrán en cuenta los requisitos para condiciones en interior, ya que el entrenador solar térmico que se maneja no debe trabajarse en condiciones exteriores por recomendaciones descritas previamente y finalmente con pruebas en interior se puede controlar ciertas condiciones y manejar el estado cuasi-estacionario que se aborda en el proyecto.

Una vez revisada la normativa colombiana y algunas normativas internacionales, se plantea el diseño del experimento con la finalidad de poder de cumplir los requisitos de los estándares consultados. Sin embargo, debido a restricciones en cuanto la capacidad de equipos e instrumentación disponibles, no es posible cumplir a cabalidad los lineamientos establecidos. No obstante, se intenta ajustar los parámetros y seguir los procedimientos de las normativas con los recursos que se tienen disponibles, como puede observarse en la tabla 6. Por lo tanto, se plantea un nuevo protocolo adaptado a los lineamientos de los estándares pero aplicado al experimento (ver anexo G: Protocolo de eficiencia térmica del colector PSHC-1C, en estado cuasi-estable, sistema de recirculación para condiciones en interior).

Tabla 6. Comparativo de normas en relación a las disposiciones experimentales

	NORMAS	EXPERIMENTO
Pre- condición	5 [hr]	2[hr]
G simulada	> 700 [w/m ²]	354 [w/m ²] distancia 0,5 [m]
Velocidad viento	2-4 [m/s]	2-4 [m/s]
Flujo másico \dot{m}	0,02 [kg/s]	0,067 [Kg/s]
Sensores Tint- Tout	< 200 [mm] int - out	Int \pm 500[mm]; out (dentro colector)

Fuente: Los autores

Las modificaciones realizadas a las condiciones experimentales, que muestra la tabla 6, se plantean debido a:

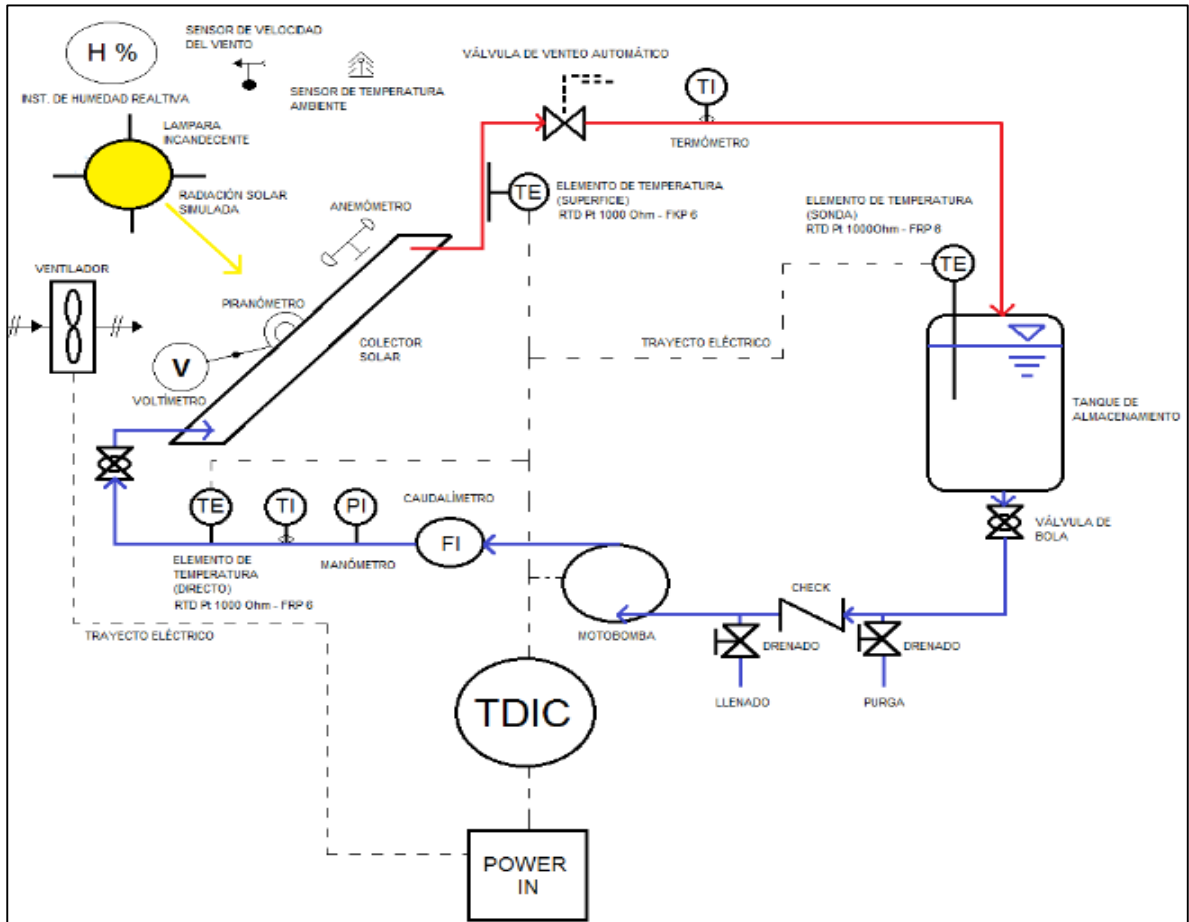
- Tiempo de trabajo del sistema de radiación simulada (lámparas) ya durante tiempo continuo de funcionamiento, el sistema se puede sobrecalentar y averiar los focos halógenos o el sistema eléctrico del componente (2 hr).
- La radiación simulada promedio medida por las lámparas a través del piranómetro (354 W/m^2).
- La medición del viento, para la cual se construye un soporte para montar en él un ventilador y alcanzar la condición deseada ($2 - 4 \text{ m/s}$).
- Flujo mínimo que puede alcanzarse con la bomba que cuenta el sistema en su modo de operación mínimo ($0,067 \text{ Kg/s}$).
- Disposición de diseño establecido en el colector solar, el sensor de temperatura de salida viene dentro del colector y no se puede cambiar de posición a diferencia del sensor de la temperatura de entrada al colector.

5.3 MONTAJE DEL ENSAYO

El sistema se encuentra ubicado en el laboratorio de energías renovables. Algunos parámetros que se han tenido en cuenta, se mencionan a continuación (para ver más detalles remítase al anexo E):

- Vaciado del colector solar.
- Ángulo de inclinación del colector según la normatividad.
- Montaje de la estructura concentradora de radiación (ver Anexo F. Plano estructura concentradora de radiación).
- Ubicación de las lámparas de simulación de radiación.
- Ubicación del simulador de viento.
- Montaje del sistema de recirculación como se ve en la figura 16.

Figura 16. Esquema de montaje sistema de recirculación para el experimento



Fuente: Adaptado de NTC 5434 (Sistemas solares térmicos y componentes, colectores solares parte II. Métodos y ensayos).

5.4 EJECUCIÓN DEL ENSAYO

Se realizó el pre-acondicionamiento del colector solar vacío (sin fluido de transferencia de calor), con la estructura concentradora y posteriormente con la lámpara de simulación de radiación⁵⁶.

Durante el experimento se realizó el siguiente registro de temperaturas en relación a la tabla 7.

⁵⁶ Para mayor detalle, remítase al Anexo E.

Tabla 7. Registro de temperaturas en el experimento

Variable	Condición de medición
Para que la temperatura sea la misma en toda la superficie de absorción	- 2 horas, intervalo de medición cada 20 minutos
Para alcanzar el estado cuasi-estable (diferencia entre temperaturas de salida y entrada)	- 20 minutos, intervalo de medición de cada 30 segundos
Medición de temperaturas, alcanzado el estado cuasi-estable ($\Delta T < 0,5^{\circ}\text{C}$)	- Intervalo de medición cada minuto

Fuente: Los autores

El pre-acondicionamiento se llevó a cabo, como se muestra en la figura 17.

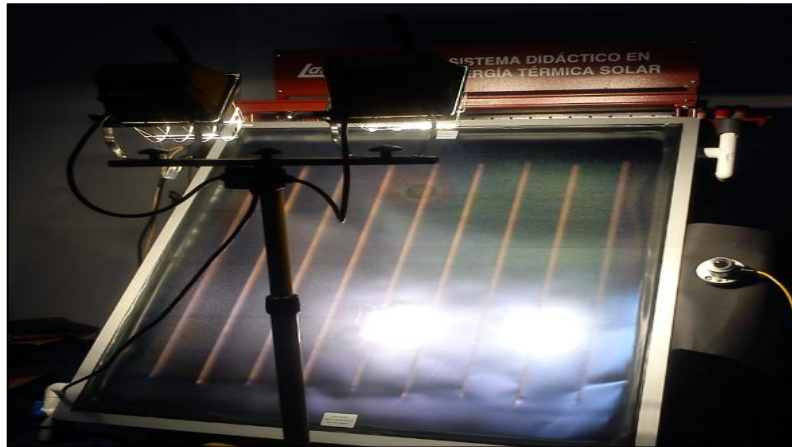
Figura 17. Pre-acondicionamiento del colector solar



Fuente: Los autores.

Las pruebas se realizaron entre las 14:00 y 20:00 horas para garantizar que los efectos de la radiación solar en el colector sean reducidos al máximo.

Figura 18. Vista frontal de la medición de la eficiencia, piranómetro al lado del colector.



Fuente: Los autores

Como se puede observar en la figura 18, se ubica el piranómetro en relación al plano medio de apertura del colector, con la finalidad de medir la variación de la radiación en el transcurso de las pruebas y que no afecte significativamente la relación estipulada en las normativas consultadas.

Figura 19. Panorama general del montaje de la prueba.



Fuente: Los autores

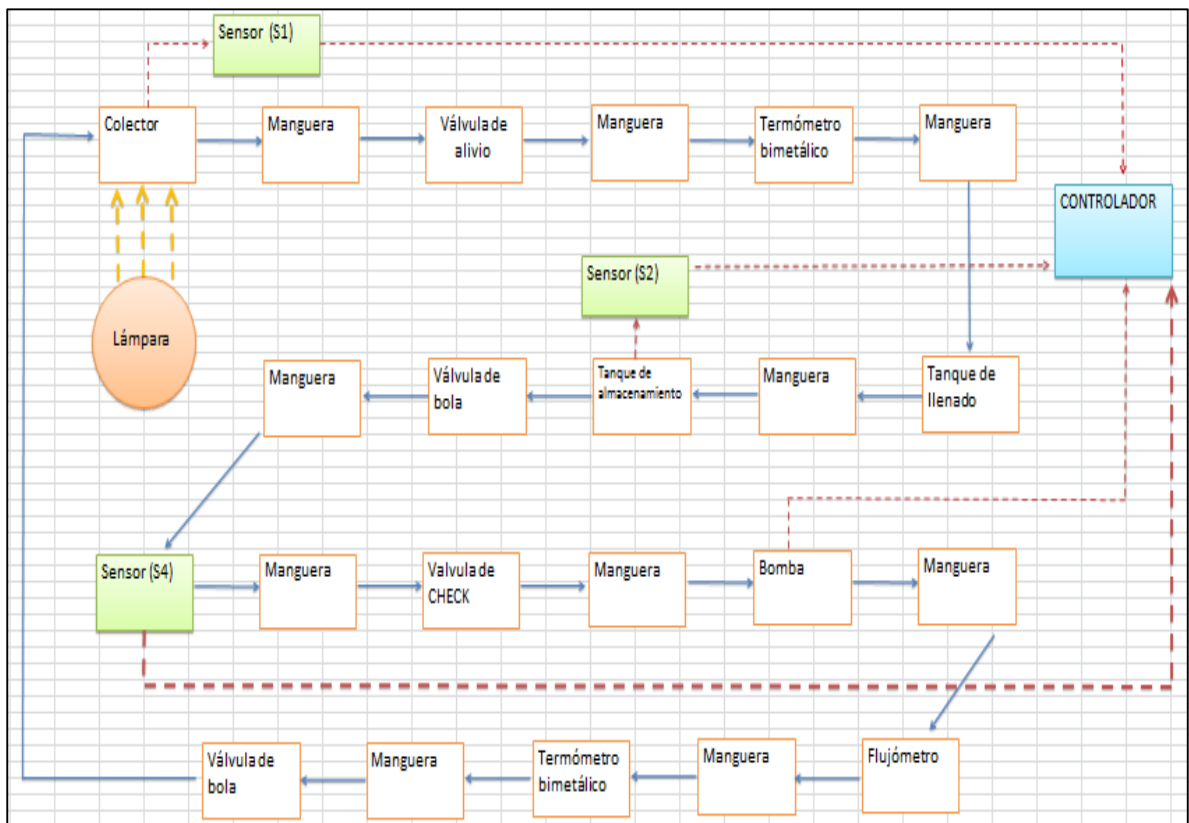
En la figura 19 se observa el montaje previsto para la prueba. Con los datos medidos y con las ecuaciones 1 y 5 anteriormente descritas. Se construye la curva de eficiencia instantánea con los valores de radiación simulados que se midieron y a partir de esta la ecuación de eficiencia y los coeficientes de pérdida total de calor $F_R U_L$ y de eficiencia óptica $F_R \tau \alpha$.

6. SIMULACIÓN EN TRNSYS

6.1 DIAGRAMA DE FLUJO REAL DEL SISTEMA PARA CALENTAMIENTO DE AGUA.

Siguiendo las recomendaciones propuestas en el apartado 3.5.4, procesos para estructurar las simulaciones, se realiza un diagrama de flujo del comportamiento real del sistema.

Figura 20. Diagrama de flujo, comportamiento real del sistema de entrenamiento en energía solar térmica.



Fuente: Los autores

El diagrama de la figura 20, establece el funcionamiento con base a dos criterios que están relacionados entre sí.

El primero es la representación de flujo de variables por medio de colores diferentes: las flechas de color amarillo representan la radiación simulada generada por la lámpara que aprovecha el colector; las flechas de color azul representan el trayecto de circulación del fluido calo-portador a través de los distintos accesorios que hacen parte del sistema y las flechas intermitentes de color rojo, representan las señales de medición captadas por los sensores o transmisores (S1,S2,S4 temperatura; bomba para caudal). Estos captan la variable de proceso a través del elemento primario⁵⁷ y la transmiten a distancia hacia el receptor, el cual la registra en el controlador (representado por el rectángulo de color azul). El controlador compara la variable con un valor deseado y ejerce una acción correctiva de acuerdo con la desviación de la variable controlada electrónica o digitalmente⁵⁸. Para el caso de la bomba, se envía una señal eléctrica para cambiar o regular su potencia.

El segundo criterio es la explicación de la línea de proceso mediante la cual ocurre el fenómeno de transformación de la energía y los diferentes componentes que interactúan en ella. El sistema inicia desde el generador de radiación simulada (lámpara), el cual emite luz al colector, que transforma la energía, aumentando la temperatura del fluido (agua) que circula por una tubería (material plástico), después pasa por un elemento de seguridad que debe controlar la sobre-presión del sistema si alcanza temperaturas elevadas (punto de ebullición del fluido), este elemento es la válvula de alivio, que también es utilizada en el proceso de purgado⁵⁹.

Luego el fluido calo-portador, transita por un tramo de tubería para llegar a un elemento análogo de medición de la temperatura (termómetro bimetálico), el cual se fundamenta en el distinto coeficiente de dilatación de dos metales diferentes laminados conjuntamente⁶⁰, un termómetro bimetálico, contiene pocas partes móviles, no presenta engranajes para evitar mantenimiento y rozamientos⁶¹.

Posteriormente atraviesa un segmento de tubería transitando por el tanque de llenado que sirve para el proceso de purgado, para continuar nuevamente por tubería, pasando por el tanque de almacenamiento o sistema de acumulación el cual es el encargado de almacenar el calor instantáneo transferido desde el colector. Allí existe un sensor que registra la temperatura en el interior del tanque (sensor S2).

⁵⁷ Recibe la señal de entrada y dada su condición la convierte o modifica a señal de salida.

⁵⁸ CREUS, Antonio. Instrumentación industrial: generalidades. Octava edición. México D.F. Alfa-omega. 2010; p. 21-29.

⁵⁹ SALGADO FERNÁNDEZ José M. Guía Completa de la Energía Solar Térmica y Termoeléctrica. El sistema hidráulico. 2010; p.79-85.

⁶⁰ Los metales pueden ser latón, monel o acero y una aleación de ferroníquel o Invar (35,5 % de níquel).

⁶¹ CREUS, Antonio. Op. cit, p. 236-237.

El flujo continúa a través de una válvula de bola de accionamiento manual, que como su nombre lo indica, tiene una cavidad interna esférica que alberga un obturador en forma de esfera o bola. La bola tiene un corte adecuado (usualmente en v) que fija la curva característica de la válvula y gira transversalmente; el cierre o estanco se logra con un aro de teflón incorporado al cuerpo contra el cual asienta la bola cuando la válvula está cerrada⁶².

Luego el agua atraviesa un tramo de tubería hasta llegar a un sensor (s4), el cual puede ubicarse en cualquier otro trayecto del proceso y registrar el comportamiento de la temperatura.

Posteriormente, el fluido pasa por una válvula *anti-retorno* que controla el fluido en una sola dirección y mantiene las condiciones de funcionamiento seguras.

Después de circular por otro tramo de manguera, el agua llega a la bomba de circulación, que produce el movimiento del fluido por el colector y el tanque de acumulación. Esta está accionada por un motor eléctrico integrado que puede ser controlado electrónicamente o de forma manual.

El agua continúa por un segmento de tubería y después al flujómetro, conocido también como rotámetro, que se caracteriza por tener un flotador que cambia su posición dentro de un tubo, proporcionalmente al flujo del fluido. El flotador está en equilibrio entre su peso, la fuerza de arrastre del fluido y la fuerza de empuje del fluido sobre el flotador hace que cambie su posición. El caudal depende del peso específico del líquido, su viscosidad y de los valores de la sección interior del tubo, ya que la misma cambia según sea el punto de equilibrio del flotador⁶³.

Posteriormente, el flujo continúa por otro tramo de tubería y luego atraviesa un elemento de medición de temperatura, el cual presenta las mismas características del termómetro bimetálico mencionado anteriormente. Seguido al último trayecto de tubería el flujo llega finalmente a una válvula de bola para retornar nuevamente el fluido al colector.

Una vez identificados los componentes, el funcionamiento y las características físicas del colector solar PSHC-1C, se procede a buscar el *type* más adecuado que vincula las propiedades del colector solar mencionado anteriormente. En sus librerías, el programa de simulación TRNSYS cuenta con varios modelos de colectores solares.

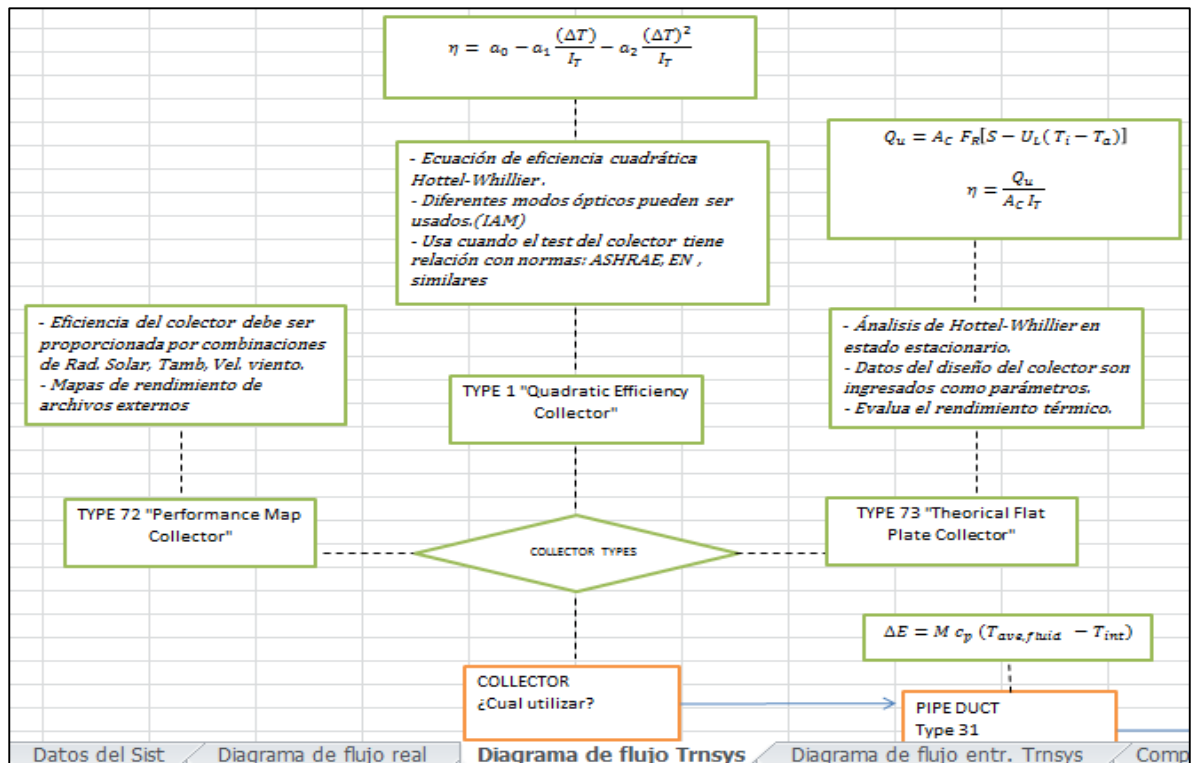
⁶² Op. cit, p. 381-386.

⁶³ CREUS, Antonio. Op. cit, p. 144.

6.2 DIAGRAMA DE FLUJO DE LOS COLECTORES SOLARES DE PLACA PLANA EN TRNSYS.

A continuación se presenta el diagrama de flujo de los diferentes colectores de placa plana de circulación forzada que pueden adaptarse en el programa.

Figura 21. Diagrama de flujo de los tipos de colectores solares de placa plana vinculados en TRNSYS.



Fuente: Los autores

En la figura 21, se observan tres diferentes *types*, con sus características principales. Con base a las consideraciones presentadas en el apartado 3.4.2 (balance de energía de un colector solar de placa plana) y de acuerdo al análisis realizado por Hottel and Whillier (1958)⁶⁴, se observa que el *type* adecuado y que vincula en su modelo dichas ecuaciones es el: "*type 73- theoretical flat plate collector*". Una vez ya elegido el colector a simular sea necesario detallar los parámetros y las características de diseño del colector PSHC-1C. A continuación se presenta el

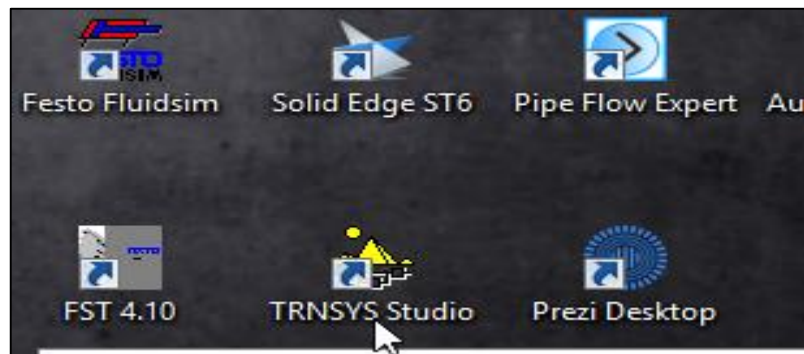
⁶⁴ DUFFIE John A and BECKMAN William A. Chapter 6: flat plate collectors In: Solar engineering of thermal process. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2006; p. 238-241.

proceso a seguir en el *software* TRNSYS. Para vincular el *type* seleccionado al panel de trabajo del programa.

6.3 INGRESO AL PROGRAMA DE SIMULACIÓN TRNSYS.

El siguiente es el procedimiento para acceder al programa de simulación TRNSYS, una vez instalado en el computador.

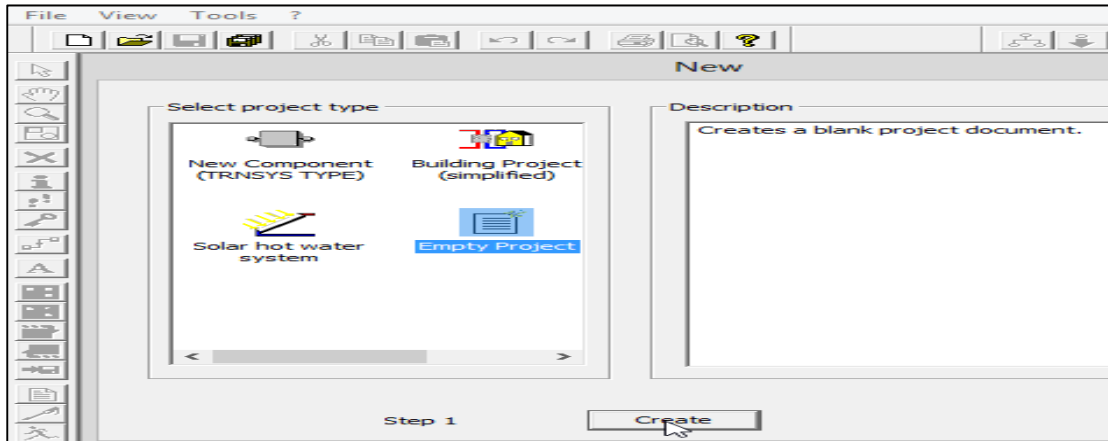
Figura 22. Ingreso al programa de simulación TRNSYS.



Fuente: Los autores

Como se observa en la figura 22, se ingresa al acceso directo, que queda predeterminado en el escritorio del computador, haciendo doble clic en el icono que representa el *software*.

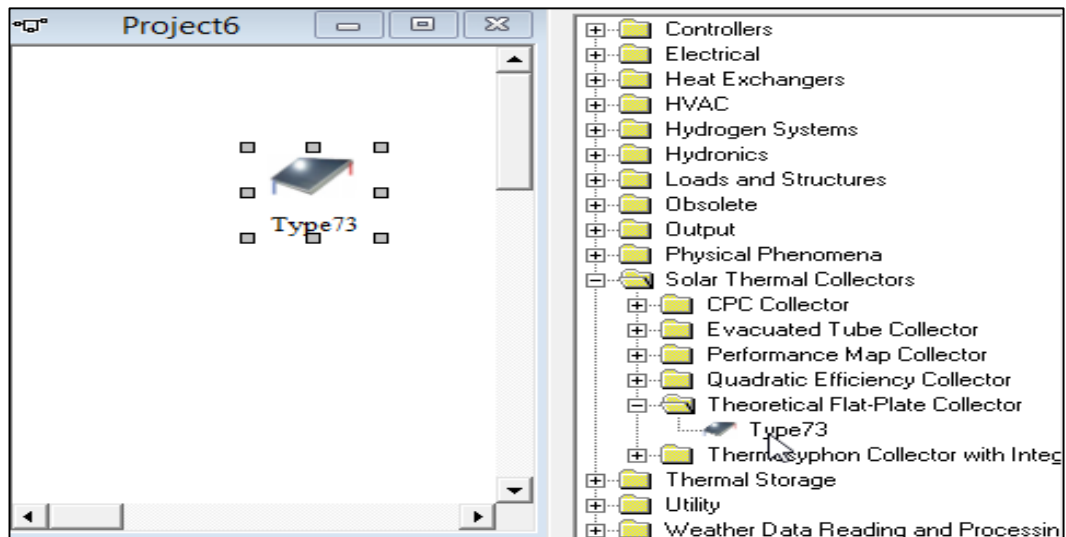
Figura 23. Selección de un nuevo proyecto en el programa.



Fuente: Los autores

En la figura 23, se observa que inmediatamente ingresando al programa, se debe generar un nuevo proyecto, haciendo clic en la ventana “file” y seleccionando “new”, a continuación para generar un proyecto en blanco se da clic en el icono “Empty Project” y finalmente en la opción “create”.

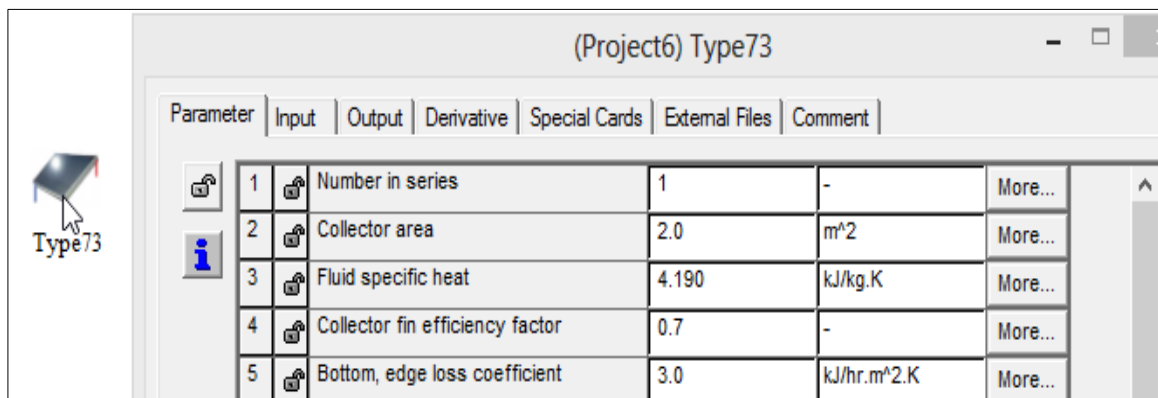
Figura 24. Selección del *type 73* en el nuevo proyecto.



Fuente: Los autores

En la figura 24, se observa el procedimiento a seguir para exportar el *type 73* al panel de trabajo, en el costado derecho de la interfaz del estudio de la simulación, aparece una lista con todos los componentes que Trnsys tiene vinculados, es así como se accede a la carpeta: “*solar thermal collectors*”, allí se despliega una lista de sub carpetas y se accede a “*theoretical flat-plate collector*”, a continuación aparece el *type 73* y lo siguiente que se debe hacer es arrastrar el icono del *type* a la ventana generada por el nuevo proyecto en blanco.

Figura 25. Ingreso al *type 73*



Fuente: Los autores

En la figura 25, se observa el proceso a seguir para ver las características del colector elegido a caracterizar, haciendo doble clic en el icono del *type 73*, se accede a la información que el usuario puede cambiar en relación a los parámetros y entradas características del colector, adicionalmente se puede encontrar otros elementos informativos para este componente.

6.4 VARIABLES DEL TYPE 73

Esta preforma, tiene las siguientes variables que se describirán en la tabla 8.

Tabla 8. Variables de la preforma *type 73*.

	Variables	Tipo de variable
1	Número en serie	Observada
2	Área del colector	Datos fabricante
3	Calor específico del fluido	Tablas
4	Factor de eficiencia de aleta del colector	Matemática modelada
5	Coefficiente de pérdidas por los lados e inferior	Matemática modelada
6	Emisividad de la placa absorbadora	Datos fabricante
7	Absortividad de la placa absorbadora	Datos fabricante
8	Número de cubiertas	Datos fabricante
9	Índice de refracción de la cubierta	Ajuste
10	Coefficiente de producto de extinción y espesor de la cubierta.	Ajuste

Fuente: Los autores, adaptada de TRNSYS.

En relación a la tabla 8. Se observa, que se necesitan ciertos criterios detallados por parte de los fabricantes para realizar de una manera adecuada la caracterización del colector, cuando estos datos hacen falta es necesario recurrir a modelos establecidos para realizar ciertas aproximaciones teóricas al comportamiento del equipo en la vida real. En referencia a la clasificación vista, se procede a relacionar cada parámetro del *type 73*, con consideraciones reales, de ajuste y matemáticas planteadas a continuación.

6.4.1 Datos del fabricante y propiedades

A continuación se relacionan las variables de este tipo con su respectivo valor numérico:

- Número en serie: indica la cantidad de colectores que pueden ser conectados y pueden simularse, para el caso del proyecto como es un solo dispositivo ($NS = 1$).
- Área del colector: se utiliza la denominada área neta del colector, es el área total que involucra la lámina de aluminio que va al exterior de la cubierta de vidrio⁶⁵, ($A_c = 1,13 \text{ m}^2$)⁶⁶.
- Emisividad de la placa absorbidora: se utiliza para calcular las pérdidas de radiación del colector ($\varepsilon_p = 0,05$).
- Absortividad de la placa absorbidora: aplicado el tratamiento selectivo ($\alpha_p = 0,95$).
- Número de cubiertas: según el diseño del colector representa la cantidad de cubiertas transparentes (vidrio), que tiene el colector ($N_c = 1$).
- Calor específico del fluido: en relación a la temperatura de entrada del agua al colector de ($T_i = 20^\circ\text{C} \approx 293,15 \text{ K}$). ($C_p = 4182 \text{ J Kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)⁶⁷.

6.5 VARIABLES DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA

A continuación se relacionan las variables de este tipo con sus respectivas ecuaciones y valores numéricos encontrados.

- Factor de eficiencia de aleta: representa la relación entre la radiación que es absorbida y la energía térmica que es conducida a la base de la superficie de absorción (aleta) que está en contacto los tubos. Para el desarrollo de esta ecuación se considera insignificante el gradiente de temperaturas en la dirección del flujo y a través de la superficie absorbidora, viene dado por la siguiente ecuación⁶⁸:

$$F = \frac{\tanh[m(W-D)/2]}{m(W-D)/2} \quad (8)$$

⁶⁵ CAÑADA RIBERA, Javier .Manual de energía solar térmica diseño y cálculo de instalaciones. Componentes de una instalación solar. Valencia. Editorial de la UPV. 2008; p. 83-90.

⁶⁶ Véase en la Tabla 4. Especificaciones del colector PSHC-1C.

⁶⁷ CENGEL Yunus A. Transferencia de calor y masa: Tablas y diagramas de propiedades. Tercera edición. México: McGraw-Hill, 2007; p. 854.

⁶⁸ DUFFIE John A and BECKMAN William A. *Chapter 6: flat plate collectors In: Solar engineering of thermal process*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2006; p. 258.

Ecuación 8. Eficiencia estándar de aleta.

F = Eficiencia estándar de aleta.

W = Distancia entre tubos de la superficie absorbadora [m].

D = Diámetro exterior de los tubos [m].

m = Factor I adimensional de la ecuación.⁶⁹

$$m = \sqrt{\frac{U_L}{K \delta}} \quad (9)$$

Ecuación 9. Factor I adimensional de la ecuación.

U_L = Coeficiente total de pérdidas [$w m^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$].

K = Conductividad térmica del material de la superficie absorbadora [$w m^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$].

δ = Espesor de la superficie absorbadora [m].

A continuación se puede apreciar que para la solución de la ecuación 7. Se necesitan ciertos criterios que no se encuentran en las especificaciones del colector como son las variables (W, D), en las cuales se aplican suposiciones en relación a las dimensiones conocidas del colector y de la misma manera se buscan datos de tablas para K , suposiciones para δ y para el coeficiente total de pérdidas se trabaja en relación a la ecuación empírica propuesta por Klein (1975) referenciada por Duffie and Beckman de la siguiente forma:

$$U_L = U_t + U_b + U_e \quad (10)$$

Ecuación 10. Coeficiente de pérdidas totales para colectores de placa plana.

U_t = Coeficiente de pérdidas por la parte superior del colector [$w m^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$].

U_b = Coeficiente de pérdidas por la parte inferior del colector [$w m^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$].

U_e = Coeficiente de pérdidas por los bordes del colector [$w m^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$].

El parámetro U_L , representa la energía por unidad de tiempo y área que se pierde debido a la diferencia entre el colector y el medio ambiente. De las ecuaciones anteriores, se procede a calcular U_t , en relación a la ecuación 11.

⁶⁹ DUFFIE John A and BECKMAN William A. Chapter 6: flat plate collectors In: Solar engineering of thermal process. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2006; p. 257-258.

$$U_t = \left(\frac{N}{\frac{C}{T_{pm}} \left[\frac{T_{pm} - T_a}{(N+f)} \right]^e + \frac{1}{h_w}} \right)^{-1} + \frac{\sigma(T_{pm} + T_a)(T_{pm}^2 + T_a^2)}{\frac{1}{\varepsilon_p + 0,00591 N h_w} + \frac{2N + f - 1 + 0,133 \varepsilon_p}{\varepsilon_g} - N} \quad (11)$$

Ecuación 11. Coeficiente de pérdidas por la parte superior del colector

Dónde:

N = Número de cubiertas de vidrio (cubierta transparente)

$f = (1 + 0,089 h_w - 0,1166 h_w \varepsilon_p)(1 + 0,07866 N)$, factor II.

$C = 520(1 - 0,000051 \beta^2)$, factor III.

$e = 0,431(1 - 100/T_{pm})$, factor IV.

β = Ángulo de apertura del colector.

ε_g = Emitancia del vidrio.

ε_p = Emitancia de la superficie absorbadora.

T_a = Temperatura ambiente [K]

T_{pm} = Temperatura promedio de la superficie absorbadora [K]

h_w = Coeficiente de transferencia de calor del viento [$W m^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$]

σ = Constante de Stefan- Boltzmann $5,67 \times 10^{-8} [W m^{-2} K^{-4}]^{70}$.

Una vez establecidas la designación de todas las variables, el siguiente proceso es calcular el coeficiente de pérdidas de la parte superior de colector:

El número de cubiertas de vidrio que tiene el colector es:

$$N = 1$$

Para el cálculo del denominado factor II, se debe considerar nuevamente los datos de la tabla 4 en donde:

$$\varepsilon_p = 0,05$$

Para el coeficiente de transferencia de calor del viento, se utiliza una correlación realizada por Mitchell (1976),⁷¹

Ecuación 12. Correlación de convección forzada para el coeficiente de transferencia de calor del viento.

$$h_w = \frac{8,6 v^{0,6}}{L^{0,4}} \quad (12)$$

⁷⁰ CENGEL Yunus A. and BOLES Michael A. Op. cit, Algunas constantes físicas.

⁷¹ DUFFIE John A and BECKMAN William A. Chapter 3: Selected heat transfer topics, Wind convection coefficients In: Solar engineering of thermal process. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2006; p. 164-166.

v = Es la velocidad del viento promedio del viento en el mundo $5 [m s^{-1}]$.

L = Longitud característica de la correlación de $8 [m]$.

$$h_w = \frac{8,6 (5)^{0,6}}{(8)^{0,4}} = 9,83 \approx 10 [W m^{-2} K^{-1}]$$

Se procede a calcular el factor II:

$$f = (1 + 0,089(10) - 0,1166(10)(0,05))(1 + 0,07866(1))$$

$$f = 1,9757$$

Para el cálculo del factor III, se tiene en cuenta un ángulo de apertura del colector de:

$$\beta = 50^\circ$$

Este ángulo se ha medido directamente en el sistema con referencia a una superficie horizontal, ubicada en la estructura de montaje del sistema de entrenamiento en energía solar, donde se ubica un transportador y se obtiene el ángulo resaltado en color rojo en la figura 23.

$$C = 520(1 - 0,000051(50)^2)$$

$$C = 453,7$$

Figura 26. Medición del ángulo de la apertura del colector solar de placa plana.



Fuente: Los autores

La variable T_{pm} , es compleja de medir y para evitar errores suponiendo cual será esta temperatura alcanzada, entonces se consideran diversos criterios para cambiar la variable y según parámetros normativos americanos, $T_{pm} = T_{int}$ y según parámetros normativos europeos $T_{pm} = T_m$ ⁷², a criterio de los autores se utiliza el parámetro europeo, ya que puede representar una mejor estimación en la temperatura.

T_m = Temperatura promedio del colector

T_{int} = Temperatura a la entrada del colector (20°C ≈ 293,15K)

T_{out} = Temperatura a la salida del colector (40°C ≈ 313,15K)

$$T_m = \frac{T_{int} + T_{out}}{2}$$

$$T_m = \frac{20 + 40}{2} = 30^\circ\text{C} \approx 303,15\text{K}$$

Los valores $T_{int} - T_{out}$, son supuestos y están considerados a cambios una vez se conozcan los datos del experimento físico para su validación.

Hecha la consideración anterior $T_{pm} = T_m$, se procede a calcular el factor IV.

$$e = 0,431 \left(1 - \frac{100}{303,15} \right)$$

$$e = 0,2881$$

Para el valor de la emisividad de la cubierta transparente (ϵ_g), se tiene conocimiento que la cubierta transparente presenta bajo contenido de óxido de hierro, a partir de esta característica se busca la emisividad para cubiertas transparentes con bajo contenido de hierro y se asume como el valor de esta cubierta para el colector PSHC-1C.

⁷² Performance coefficients test for collector. [En línea]. [Citado 18-mar-2015]. Disponible en: (<http://mailman.cae.wisc.edu/pipermail/trnsys-users>).

Tabla 9. Propiedades ópticas del vidrio utilizadas para cálculos teóricos.

Glass design	Name	Solar transmittance τ_s	Emissivity ϵ
Low iron glass	REF	0.90	0.84
Low iron antireflective glass	AR	0.96	0.84
AZO / low iron glass	AZO _{min}	0.85	0.30
AZO / low iron glass / AR	AZO _{max}	0.87	0.30
ITO / low iron glass	ITO _{min}	0.84	0.20
ITO / low iron glass / AR	ITO _{max}	0.86	0.20

Fuente: GIOVANNETTI, Federico et al. High transmittance, low emissivity glass covers for flat plate collectors: applications and performance. In ScienceDirect. No. (30) 2012; p.106-115.

La aplicación de óxidos metálicos, mejoran las propiedades mecánicas del vidrio, su resistencia a agentes atmosféricos y sus propiedades ópticas, aumentando su transmisividad solar y siendo espectralmente selectivos.⁷³ Significa entonces, que el dato a utilizar es:

$$\epsilon_g = 0,84$$

Para la temperatura ambiente, se ha relacionado el promedio de los datos de la temperatura mínima y máxima alcanzada en la ciudad de Bogotá.

$$T_a = 18,5^\circ\text{C} \approx 291,65\text{K}$$

Una vez obtenidas todas las variables, se procede a calcular las pérdidas del colector por la parte superior en relación a la ecuación 11.

⁷³ GIOVANNETTI, Federico et al. High transmittance, low emissivity glass covers for flat plate collectors: applications and performance. In ScienceDirect. No. (30) 2012; p.106-115.

$$U_t = \left(\frac{1}{\frac{453,7}{303,15} \left[\frac{303,15 - 291,65}{(1 + 1,9757)} \right]^{0,2881} + \frac{1}{10}} \right)^{-1}$$

$$+ \frac{5,67 \times 10^{-8} (303,15 + 291,65)(303,15^2 + 291,65^2)}{\frac{1}{0,05 + 0,00591(1)(10)} + \frac{2(1) + 1,9757 - 1 + 0,133(0,05)}{0,84} - 1}$$

$$U_t = 2,32 [W m^{-2} \text{°C}^{-1}]$$

Para las pérdidas en la parte inferior del colector, se asumen de la siguiente manera:⁷⁴

Ecuación 13. Pérdidas de la parte inferior de un colector de placa plana.

$$U_b = \frac{K}{L} \quad (13)$$

K = Conductividad térmica del aislamiento [$W m^{-1} \text{°C}^{-1}$]

L = Espesor del aislamiento [m]

En relación a los datos técnicos del colector, se tiene en cuenta que el material del aislamiento es resina de poliuretano de 50 [mm] de espesor. El valor de la conductividad térmica del aislamiento es de 0,026 [$W m^{-1} \text{°C}^{-1}$].⁷⁵

$$U_b = \frac{0,026}{0,05}$$

$$U_b = 0,52 [W m^{-2} \text{°C}^{-1}]$$

Para las pérdidas por los lados o bordes del colector, se determinan de la siguiente manera. Y se debe asumir la conducción en una dimensión alrededor del perímetro.

⁷⁴ DUFFIE John A and BECKMAN William A. Chapter 6: flat plate collectors In: Solar engineering of thermal process. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2006; p. 254-255.

⁷⁵ Resina de poliuretano. [En línea]. [Citado 19-mar-2015]. Disponible en: (<http://www.fao.org/docrep/008/y5013s/y5013s07.htm>).

Ecuación 14. Pérdidas de los lados de un colector de placa plana.

$$U_e = \frac{(UA)_{edge}}{A_c} \quad (14)$$

$(UA)_{edge}$ = Producto de área del coeficiente de pérdidas por los lados

A_c = Área del colector [m^{-2}]

Según Duffie and Beckmann este producto se calcula, teniendo en cuenta el espesor del aislamiento por los lados, no obstante este dato no se encuentra, razón por la cual se asume que el espesor de los lados tiene la misma dimensión que en la parte inferior del colector 50 [mm], al igual que el mismo material, también se considera, para el producto el perímetro del colector que se halla en relación a los datos de las especificaciones técnicas (tabla 4):

$$P = 1115 + 1115 + 1110 + 1110 = 4450 \text{ [mm]} * \frac{1 \text{ [m]}}{1000 \text{ [mm]}} = 4,45 \text{ [m]}$$

$$U_e = \frac{\left(\frac{0,026}{0,05}\right) (4,45)(0,05)}{1,13}$$

$$U_e = 0,12 \text{ [W m}^{-2}\text{°C}^{-1}\text{]}$$

Ahora bien, según la ecuación 10, se calcula el coeficiente global de pérdidas del colector de placa plana:

$$U_L = 2,32 + 0,52 + 0,11$$

$$U_L = 2,96 \text{ [W m}^{-2}\text{°C}^{-1}\text{]}$$

Una vez calculado U_L , se retoma la ecuación 9, para hallar el denominado factor I, en relación a este factor y sus variables, K del material de la superficie absorbadora, en este caso el cobre es de 385 [$W m^{-1} °C^{-1}$], según los datos técnicos no se encuentra el espesor de la superficie de absorción, sin embargo, aparece el espesor medio del tratamiento que se le aplica a la superficie que es de 0,00021[m], y se busca en internet, un calibre para láminas de cobre, en este caso un calibre 24 cuyo espesor es 0,0005[m],⁷⁶ para sumar estos dos espesores y finalmente hallar el factor I:

⁷⁶ Láminas de cobre. [En línea]. [Citado 20-mar-2015]. Disponible en: (<http://www.acerosmetalescuautitlan.com.mx/catalogo/lamina-de-cobre/50-hoja-1.html>).

$$m = \sqrt{\frac{2,96}{385 (0,00071)}}$$

$$m = 3,30$$

Ahora, con base en la ecuación 8, se puede calcular el factor de eficiencia de aleta, pero según los datos técnicos no se encuentra el valor exacto del número de tubos ascendentes del colector, observando la cubierta transparente se pueden contar nueve tubos y este valor es el que se utiliza, a continuación el valor se divide por el área de apertura 1, [m²], para encontrar la distancia de separación entre tubos de la superficie absorbadora $W = 0,11$ [m], tampoco aparece exacto el valor del diámetro de la tubería ascendente, entonces se asume un valor de $D = 0,01$ [m].

$$F = \frac{\tanh[3,30(0,11 - 0,01)/2]}{3,30(0,11 - 0,01)/2}$$

$$F = 0,991$$

Este es el factor teórico hallado para la eficiencia de aleta del colector, y que se utiliza en el numeral 4 de la tabla 5. El siguiente parámetro son las pérdidas entre la parte inferior y de los lados, representa el numeral 5 de la misma tabla.

$$U_{b-e} = U_b + U_e = 0,52 + 0,11$$

$$U_{b-e} = 0,63 [W m^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}]$$

Una vez calculados, los datos, se prosigue a relacionar los numerales 9 y 10 de la tabla 8, datos de ajuste para la simulación, generalmente el índice de refracción y el coeficiente de extinción de la cubierta transparente (vidrio), son funciones de la longitud de onda de la radiación en relación a las propiedades del material.⁷⁷ Ahora bien como no se conoce la longitud de onda en la que emite la lámpara que simula el comportamiento de la radiación solar, los datos relacionados, serán los considerados por diversos autores en cuanto al espectro solar.

⁷⁷ DUFFIE John A and BECKMAN William A. Chapter 5: *Radiation transmission through glazing: absorbed radiation In: Solar engineering of thermal process*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2006; p. 204-224.

Tabla 10. Propiedades de los materiales para la cubierta transparente de colectores de placa plana.

Material	Index of refraction
Soda lime float glass	1.52
Water white low-iron glass	1.52
Fiberglass reinforced polyester (Sunlite)	1.54
Acrylic (plexiglass)	1.49
Polycarbonate (Lexan)	1.586
Polytetrafluoroethylene (Teflon)	1.343
Polyvinyl fluoride (Tedlar)	1.46
Polyester (Mylar)	1.64
Polyvinylidene fluoride (Kynar)	1.413
Polyethylene (Marlex)	1.500

^aAdapted from Butler and Claassen [1980] and Jorger

Fuente: RABL, Ari. *Active solar collector and their applications*. Oxford: Oxford university press. 1985; p. 370.

En relación con la tabla 10, como la cubierta transparente del colector PSHC-1C, contiene bajo contenido en hierro, el valor a utilizar es de 1,52.

Ahora bien, para hallar el producto del espesor y el coeficiente de extinción de la cubierta transparente (vidrio), se realiza de la siguiente manera, en relación a parámetros de ajuste. Por datos técnicos de la cubierta transparente su espesor es de 3,2 [mm], además tiene bajo contenido en hierro.

En relación a los anteriores criterios descritos y a una base de datos encontrada de estudios de índices de refracción de cubiertas para diferentes aplicaciones,⁷⁸ se asume que el comportamiento del vidrio “soda lime silica glasses”, presenta propiedades similares al vidrio con el que cuenta el colector solar PSHC-1C, entonces. Según lo revisado se halla: el coeficiente de extinción de ese material de $K = 0,0000010200$, su índice de refracción de $n \approx 1,52$, a una longitud de onda de $\lambda = 1 [\mu m]$, Ahora bien para expresarlo en términos del producto del espesor de la cubierta, se realiza lo siguiente:

⁷⁸ RUBIN, M. *Optical properties of soda lime silica glasses*. [En línea]. [Citado 24-mar-2015]. Disponible en: (<http://refractiveindex.info/?shelf=glass&book=soda-lime&page=Rubin-lowiron>).

$$3,2 [mm] \cdot \frac{1000 [\mu m]}{1 [mm]} = 3200 [\mu m] * K = 0,003264$$

Así se obtiene este producto mediante valores de ajuste. Finalmente una vez encontrados todas las variables que el software TRNSYS requiere, se ingresan estos valores, como se observa en la figura 27:

Figura 27: Ingreso de las variables en TRNSYS

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
2	🔒	Collector area	1.13	m ²	More...	↑
3	🔒	Fluid specific heat	4182	J/kg.K	More...	
4	🔒	Collector fin efficiency factor	0.991	-	More...	
5	🔒	Bottom, edge loss coefficient	0.63	W/m ² .K	More...	
6	🔒	Absorber plate emittance	0.05	-	More...	
7	🔒	Absorptance of absorber plate	0.95	-	More...	
8	🔒	Number of covers	1	-	More...	
9	🔒	Index of refraction of cover	1.52	-	More...	
10	🔒	Extinction coeff. thickness product	0.003264	-	More...	↓

Fuente: Los autores

6.6 ECUACIONES NO CONSIDERADAS EN TRNSYS PARA COLECTORES SOLARES DE PLACA PLANA.

Ahora bien, una vez hallados los parámetros del colector para la simulación, se realizan otros cálculos para determinar ciertas características de los colectores solares, que se desarrollan más adelante y que no se consideran en TRNSYS, sin embargo representan ciertos, análisis de fenómenos de transferencia de calor que existen en el dispositivo y determinan características de funcionamiento y rendimiento.

6.6.1 Factor de eficiencia del colector

Este factor se denomina F' y representa la relación de ganancia de la energía útil real a la ganancia útil que resultaría si la superficie absorbadora del colector solar,

ha estado a la temperatura media del fluido. El factor de eficiencia depende de la temperatura pero no representa una función fuerte de la temperatura. A continuación se expresa en la ecuación 15 este factor:

$$F' = \frac{1/U_L}{W \left[\frac{1}{U_L[D+(W-D)F]} + \frac{1}{c_b} + \frac{1}{\pi D_i h_{fi}} \right]} \quad (15)$$

Ecuación 15. Factor de eficiencia del colector

U_L = Coeficiente de pérdidas totales del colector [$W m^{-2} \text{°C}^{-1}$]

W = Distancia entre tubos ascendentes del colector [m]

D = Diámetro exterior de la tubería ascendente [m]

F = Factor de eficiencia de aleta del colector

c_b = Conductividad térmica de la hoja en relación a sus dimensiones [$W m^{-1} \text{°C}^{-1}$]

D_i = Diámetro interno de la tubería [m]

h_{fi} = Coeficiente de transferencia de calor entre el fluido y la pared del tubo [$W m^{-2} K^{-1}$]

La expresión del numerador de la ecuación 15, representa la resistencia de transferencia de calor de la placa de absorción al aire ambiente, y la expresión del denominador representa la resistencia de transferencia de calor desde el fluido al aire ambiente⁷⁹.

6.6.2 Factor de remoción de calor

Este factor se denomina F_R y representa la relación de la ganancia de energía útil real de un colector a la ganancia útil si toda la superficie del colector está a la temperatura de entrada del fluido. Es equivalente a la relación de la transferencia de calor real a la transferencia de calor máxima posible. La energía útil ganada es calculada como función de la temperatura de entrada del fluido. A continuación se expresa en la ecuación 16 este factor:

$$F_R = \frac{\dot{m} c_p}{A_c U_L} \left(1 - \exp \left(- \frac{A_c U_L F'}{\dot{m} c_p} \right) \right) \quad (16)$$

Ecuación 16. Factor de remoción de calor

⁷⁹ DUFFIE John A and BECKMAN William A. Chapter 6: *flat plate collectors* In: *Solar engineering of thermal process*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2006; p. 256-266.

El efecto de multiplicar F_R en los análisis que se realizan, es reducir la energía útil ganada de lo que hubiera sido si toda la placa de absorción del colector ha estado a la temperatura de entrada del fluido⁸⁰.

6.6.3 Factor de flujo del colector

Este factor se denomina F'' y representa la relación de la energía que el colector puede entregar con la temperatura media del fluido a la energía que el colector puede suministrar en la temperatura de entrada del colector. A continuación se expresa en la ecuación 17 este factor:

$$F'' = \frac{F_R}{F'} = \frac{\dot{m}C_p}{A_C U_L F'} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_C U_L F'}{\dot{m}C_p}\right) \right] \quad (17)$$

Ecuación 17. Factor de flujo del colector

6.6.4 Resolución de las ecuaciones no consideradas en TRNSYS para el colector PSHC-1C

Para hallar el factor de eficiencia del colector F' , previamente se tienen los siguientes datos:

$$U_L = 2,97 [W/m^2\text{°C}]$$

$$F = 0,991$$

$$D = 0,01 [m]^{81}$$

$$D_i = 0,008 [m]^{82}$$

$$W = 0,11 [m]$$

En los datos del entrenador no aparece la distancia de separación que hay entre los tubos ascendentes, sin embargo se realiza el siguiente proceso para hallarlo, en relación a la cantidad de tubos ascendentes del colector (9) y el área del colector:

⁸⁰ DUFFIE John A and BECKMAN William A. Chapter 6: flat plate collectors In: Solar engineering of thermal process. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2006; p.264-266.

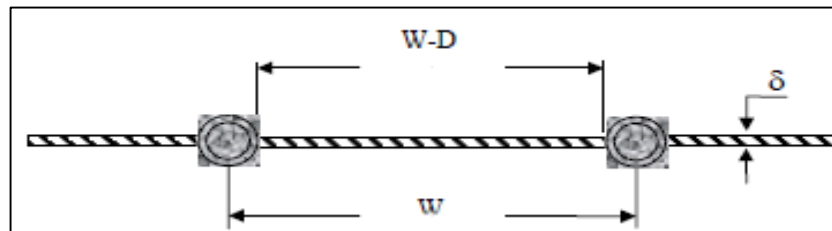
⁸¹ Ver. Tabla 4. Especificaciones del colector solar PSHC-1C, tamaño de la tubería ascendente

⁸² Características de los tubos de cobre, según la norma UNE 37.141-76. [En línea]. [Citado 24-mar-2015]. Disponible en: (<http://www.cleanergysolar.com/2012/02/03/tablas-para-saber-las-caracteristicas-de-las-tuberias-de-cobre/>).

$$W = \frac{1 [m]}{9 \text{ tubos ascendentes}} \approx 0,11 [m]$$

$C_b =$ Ya que se desconoce la distribución de la tubería de cobre sobre la superficie absorbidora y de acuerdo con Whillier and Bliss (1959), se asume que la tubería del colector PSHC-1C, son centrados en la superficie absorbidora y son integrales a la estructura de la misma, tal como se muestra en la figura 28. En relación a esta consideración, este factor se simplifica en la ecuación de F' .

Figura 28. Distribución de la tubería en relación a la superficie absorbidora



Fuente: DUFFIE John A and BECKMAN William A. *Chapter 6: Liquid heater plate geometries In: Solar engineering of thermal process*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2006; p. 277-281.

h_{fi} = Este coeficiente se halla por medio de relaciones empíricas la cual, intenta generalizar el resultado, adicionalmente para desarrollar este análisis se deben suponer ciertas condiciones, las cuales son:

- Propiedades de los materiales permanecen constantes.
- Flujo de transmisión de calor en la pared de la tubería debe ser constante.
- Temperatura exterior de la tubería debe ser constante.
- Flujo turbulento o laminar, es completamente desarrollado en los tubos.

Una vez consideradas estas suposiciones, el proceso se desarrolla de la siguiente manera:

Ecuación 18. Área de la sección transversal de la tubería.

$$A_{pipe} = \pi r^2 \quad (18)$$

$$A_{pipe} = \pi(0,004)^2 = 0,00005 [m^2]$$

Según la medición observada en el flujómetro, del entrenador solar térmico que se ubica después de la bomba, el caudal máximo que se registra cuando fluye agua es:

$$Q = 4 [lpm] \cdot \frac{1,67 * 10^{-5} [m^3/s]}{1 [lpm]} = 0,000064 [m^3/s]$$

Siguiendo con el procedimiento se encuentran las siguientes propiedades del agua en relación a la temperatura de entrada anteriormente establecida de 20 °C, para los siguientes cálculos.

Tabla 11. Propiedades del agua a T= 20°C

Propiedades del agua T=20°C			
Variable	Símbolo	Unidad	valor
Densidad	ρ	$[kg\ m^{-3}]$	998
viscosidad cinemática	N	$[m^2\ s^{-1}]$	$1,006 \times 10^{-6}$
Conductividad térmica	K	$[W\ m^{-1}\ k^{-1}]$	0,597
Número de Prandtl	Pr		7,02

Fuente: JANNA, William S. Engineering heat transfer. Taylor & Francis group.2009; p. A.20.

Ecuación 19. Flujo másico del agua.

$$\dot{m} = \rho * Q \quad (19)$$

$$\dot{m} = 998 * (0,000064) = 0,063 [Kg\ s^{-1}]$$

Ecuación 20. Velocidad promedio del agua en la tubería.

$$V_{prom} = \frac{\dot{m}}{\rho A_{pipe}} \quad (20)$$

$$V_{prom} = \frac{0,063 [Kg\ s^{-1}]}{998 [Kg\ m^{-3}] (0,00005 [m^2])} = 1,27 [m\ s^{-1}]$$

Ecuación 21. Número de Reynolds.

$$Re = \frac{V_{prom} D}{\nu} \quad (21)$$

$$Re = \frac{1,27 [m\ s^{-1}] (0,01 [m])}{1,006 \times 10^{-6} [m^2\ s^{-1}]} = 12624,3$$

Entonces como el número de Reynolds es mayor a 10000, esto indica que el flujo al interior del colector es de tipo turbulento; Dittus & Boelter (1930) presenta la siguiente relación empírica asumiendo el flujo turbulento completamente desarrollado en tubos y considerando que en el colector PSHC-1C, ocurre este proceso:⁸³

$$Nu_d = 0,023 Re^{0.8} Pr^n \quad (22)$$

Ecuación 22. Número de Nusselt para flujo turbulento completamente desarrollado.

En esta ecuación las propiedades se evalúan a la temperatura global del fluido y el exponente $n = 0,4$, para calentamiento.

$$Nu_d = 0,023 (12624,3)^{0.8} (7,02)^{0.4} = 95,77$$

Ahora bien, utilizando la ecuación para Nusselt bajo los parámetros específicos definidos anteriormente, se despeja el coeficiente de transferencia de calor por convección para hallarlo.⁸⁴

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (23)$$

Ecuación 23. Numero de Nusselt.

Despejando $h = h_{fi}$, se obtiene:

$$h_{fi} = \frac{Nu k}{D}$$

$$h_{fi} = \frac{95,77 (0,597 [W m^{-1}k^{-1}])}{0,01[m]} = 5716,9 [W m^{-2}K^{-1}]$$

⁸³ HOLMAN, J P. Capítulo 6: relaciones empíricas y prácticas para transferencia de calor por convección forzada. En: Transferencia de calor. Compañía editorial continental México. 1998; p.256.

⁸⁴ HOLMAN, J P. Op.cit, principios de convección. p.218.

Para hallar el factor de eficiencia del colector, con la ecuación 15.

$$F' = \frac{1/2,85}{0,11 \left[\frac{1}{2,97[0,01 + (0,11 - 0,01)0,991]} + \frac{1}{\pi(0,008)(5716,9)} \right]}$$

$$F' = 0,990$$

Para hallar el factor de remoción de calor, con la ecuación 16.

$$F_R = \frac{0,06(4182)}{1,13(2,97)} \left(1 - \exp \left(- \frac{1,13(2,97)(0,990)}{0,06(4182)} \right) \right)$$

$$F_R = 0,984$$

Para hallar el factor de flujo del colector, con la ecuación 17.

$$F'' = \frac{0,06(4182)}{1(2,97)(0,990)} \left(1 - \exp \left(- \frac{1(2,97)(0,990)}{0,06(4182)} \right) \right)$$

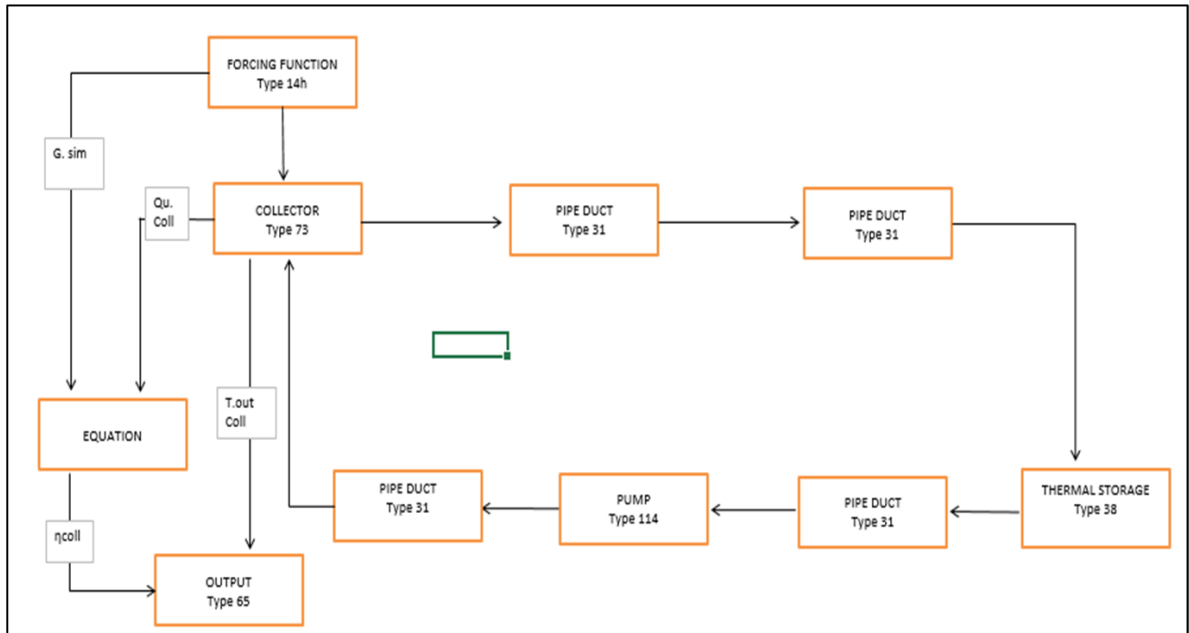
$$F'' = 0,994$$

6.5 DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE AGUA.

En relación al apartado 3.5.4 (Proceso para estructurar simulaciones), siguiendo la metodología propuesta, y teniendo previamente estructurado el diagrama real del sistema, se procedió a estructurar la simulación. Sin embargo debido a la extensa librería y la amplia gama de componentes que presenta TRNSYS, es necesario realizar nuevamente un diagrama de flujo, en el cual se definen las principales características y los modelos matemáticos que se pueden adaptar al sistema real.

Una vez identificados todos los componentes, la información descrita se segmenta generando así, el diagrama de flujo final para poder correr la simulación, como puede observarse en la figura.

Figura 29. Diagrama de flujo final para la simulación en TRNSYS.



Fuente: Los autores.

La figura 29, muestra el nombre de cada componente en cada caja del diagrama, seguido de la identificación del *type* que caracteriza el mismo. La figura resalta la arquitectura modular.

También cabe resaltar que en comparación al modelo real, se han omitido varios componentes es el caso de: (válvulas, elementos análogos de medición, tanque de llenado, controlador), por diversos motivos, tales como: algunos componentes no aparecen en las librerías del programa. En otros casos, el componente no representa significativamente la información característica del mismo.

Adicionalmente aparecen nuevos componentes que no tiene el sistema físico, pero que para el proceso de simulación es necesario vincularlos. Estos componentes son: “*forcing fuction*” el cual tiene integrado los valores de la radiación simulada medida previamente, el componente “*equation*”, la cual reúne dos características como lo son la radiación simulada y el calor útil que gana el colector. Finalmente el componente “*output*”, que genera los plotters o gráficas del comportamiento del sistema mediante las condiciones establecidas y permite estudiar su comportamiento a lo largo de diversos periodos de tiempo.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 RESULTADOS DE LA MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN EMITIDA POR LA LÁMPARA

Las mediciones realizadas para determinar la cantidad de radiación emitida por la lámpara utilizada para los experimentos se presentan en la tabla 12.

Tabla 12. Datos de la medición de la radiación simulada emitida por la lámpara.

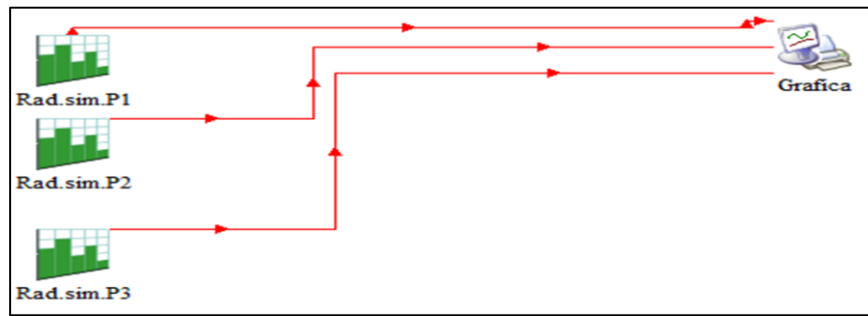
Ensayos de medición	Promedio de medición	Cte de calibración piranómetro	Promedio de radiación (Potencia)	Promedio de radiación (Potencia)
	[$\mu\text{v}(\text{dc})$]	[$\mu\text{v}/\text{wm}^2$]	[w/m^2]	[KJ/hm^2]
Prueba 1 (3 [m])	214,72	15,05	14,27	51,36
Prueba 2 (3 [m])	239,70		15,93	57,34
Prueba 3 (0,5 [m])	5326,10		353,89	1274,02

Fuente: Los autores

En la tabla 12, se observan los valores promedio de las tres pruebas realizadas. Las pruebas 1 y 2 se realizaron con base en lineamientos expuestos por las normativas consultadas, en contraste la prueba 3 fue realizada a criterio de los autores, para verificar el comportamiento de las medidas en relación a una menor distancia y comparándola respecto a las dos anteriores pruebas. También se observan el promedio de la medición obtenida por el multímetro, el valor de la constante de calibración del piranómetro utilizado y el promedio de la irradiancia.

A continuación los datos instantáneos de radiación (KJ/hm^2), se exportan al *software* de simulación TRNSYS (ver Anexo D), para comparar su comportamiento. Así como se muestra en la figura 30.

Figura 30. Esquema en TRNSYS para la radiación simulada.

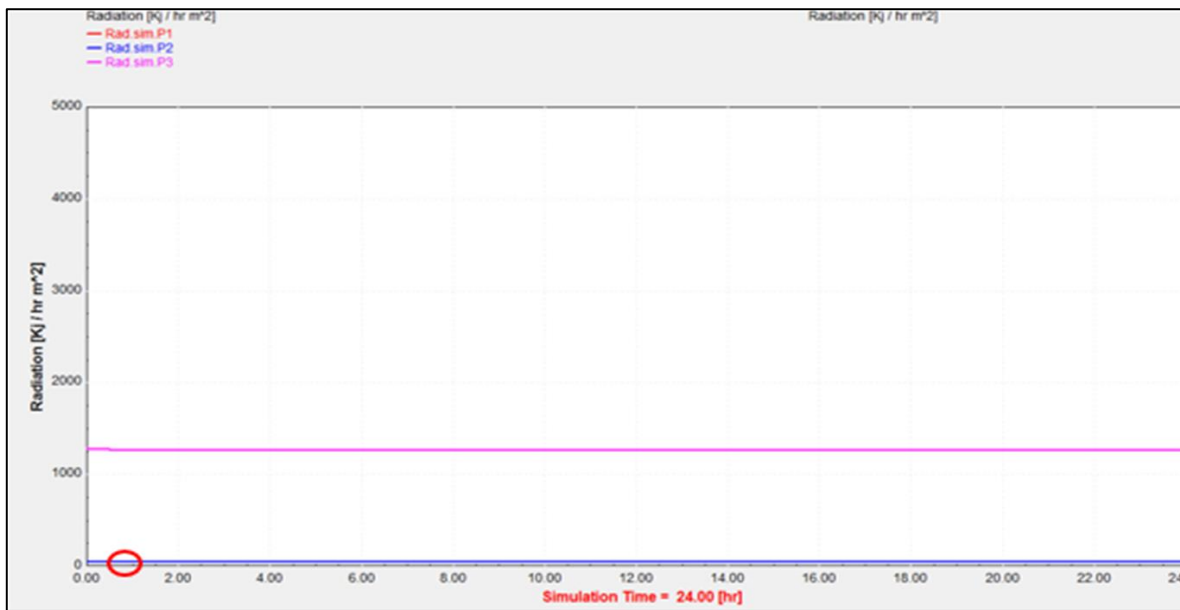


Fuente: Los autores.

En la figura 30. Se observa en primera instancia tres preformas similares que corresponden al *type* 14h, (Rad.sim.P1, Rad.sim.P2, Rad.sim.P3) en las cuales se adjuntan previamente los datos instantáneos obtenidos de las pruebas 1, 2 y 3 y finalmente el *type* 65a (Gráfica), el cual representa el comportamiento de los datos en función del tiempo que se relacionan por medio de la línea de color rojo, generando un archivo gráfico (plotter) y un archivo externo al programa (.plt).

Los resultados de estos procesos se observan en la gráfica 1.

Gráfica 1. Resultados de la simulación de las pruebas de radiación simulada.

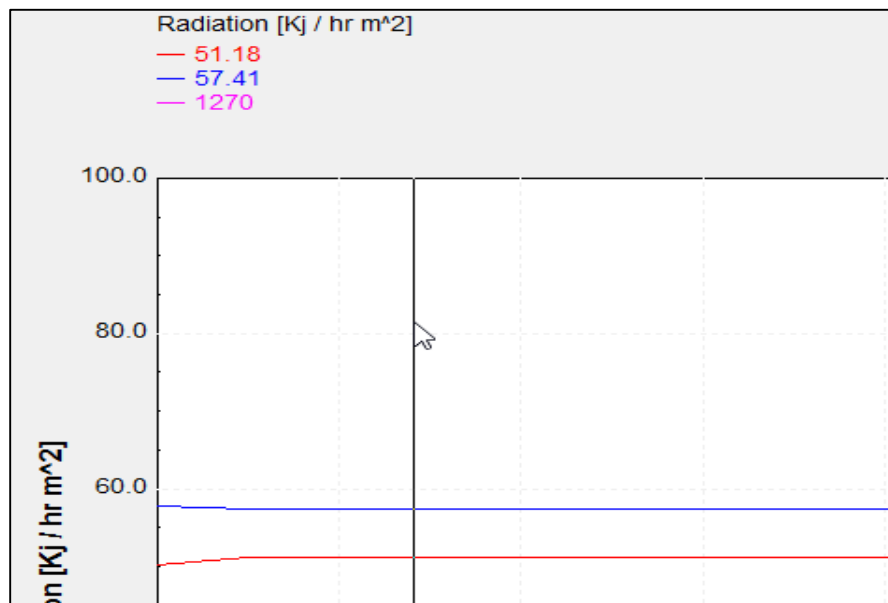


Fuente: Los autores.

En la gráfica 1, se puede observar en el costado izquierdo los datos de la radiación simulada medida de la lámpara, así como sus respectivas unidades. El círculo de color rojo representa los valores de la prueba 1 y 2.

La radiación simulada de las tres pruebas realizadas presenta un comportamiento lineal o constante, destacándose por su valor máximo alcanzado la prueba 3 de color violeta. En contraste, los datos de las pruebas 1 (color rojo) y 2 (color azul) representan valores muy pequeños y para ver mejor su comportamiento se debe realizar un aumento de la gráfica 1, representado por el círculo rojo y posteriormente un cambio en la escala para observar su comportamiento en la gráfica 2.

Gráfica 2. Comportamiento de las pruebas 1 y 2



Fuente: Los autores.

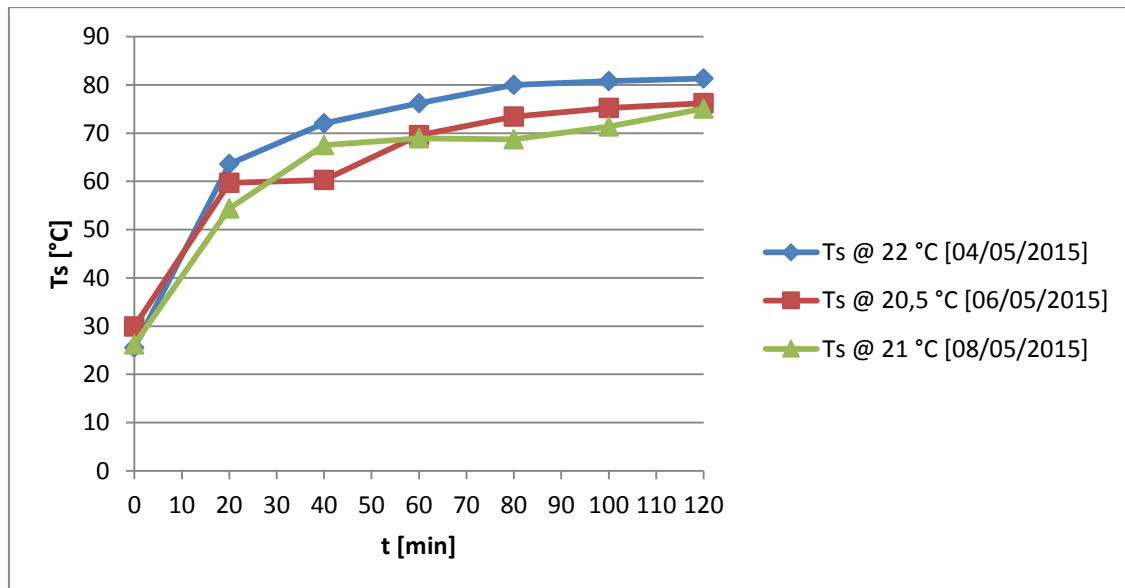
En la Gráfica 2, se observa el valor promedio que se obtiene de las tres pruebas realizadas para la medición de la radiación simulada. De los planteamientos anteriores se deduce que los datos de las pruebas 1 y 2, no representan significativamente valores para utilizarse en el análisis del rendimiento del sistema, tanto en la parte experimental como en la simulación, por sus valores bajos, en efecto, los datos a utilizar son los obtenidos en la prueba 3.

Una vez seleccionada la radiación simulada de la prueba 3 e identificada la caracterización del colector solar en su respectiva preforma, se adecuan los demás elementos que hacen parte del ciclo de proceso en el programa de simulación.

7.2 RESULTADOS DEL EXPERIMENTO

En primera instancia se presenta en la gráfica 3, el comportamiento del pre-acondicionamiento del colector solar en vacío de acuerdo al anexo E.

Gráfica 3. Temperaturas de salida del pre-acondicionamiento del colector solar.



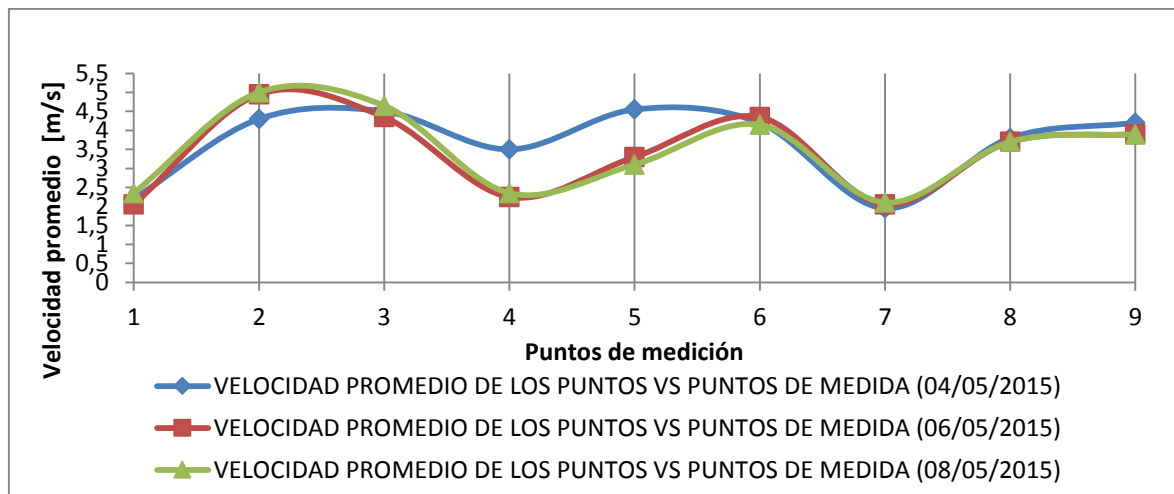
Fuente: Los autores

En la gráfica 3, se observa el comportamiento de la temperatura de salida del colector solar en función del tiempo, durante el pre-acondicionamiento del colector. Cada experimento comienza con una temperatura ambiente diferente debido a condiciones no controladas en el sitio donde se realizaron las pruebas.

Se puede observar que las tres temperaturas de salida durante los primeros 20 minutos aumentan de forma rápida, debido al calentamiento exponencial del sistema; después del minuto 40, la temperatura de salida cambia en menor grado de proporción, debido al calentamiento distribuido en toda su área de captación y a la reducción del gradiente de temperatura en el interior del colector solar. Sin embargo al final del pre-acondicionamiento, los tres ensayos tienden a mantener una temperatura de salida en un valor cercano, para la prueba 3, representada por la línea de color verde $T_s = 75,1^\circ\text{C}$, la prueba 2, representada por la línea de color rojo $T_s = 76,2^\circ\text{C}$ y la prueba 1, representada por la línea de color azul $T_s = 81,3^\circ\text{C}$.

A continuación se presenta los resultados de la medición del flujo de aire simulado obtenido durante los experimentos. Para ver los puntos de medición ver Anexo G. Con base a estos puntos se obtiene la gráfica 4.

Gráfica 4. Velocidad promedio del aire, en relación a los puntos de medición de los experimentos.

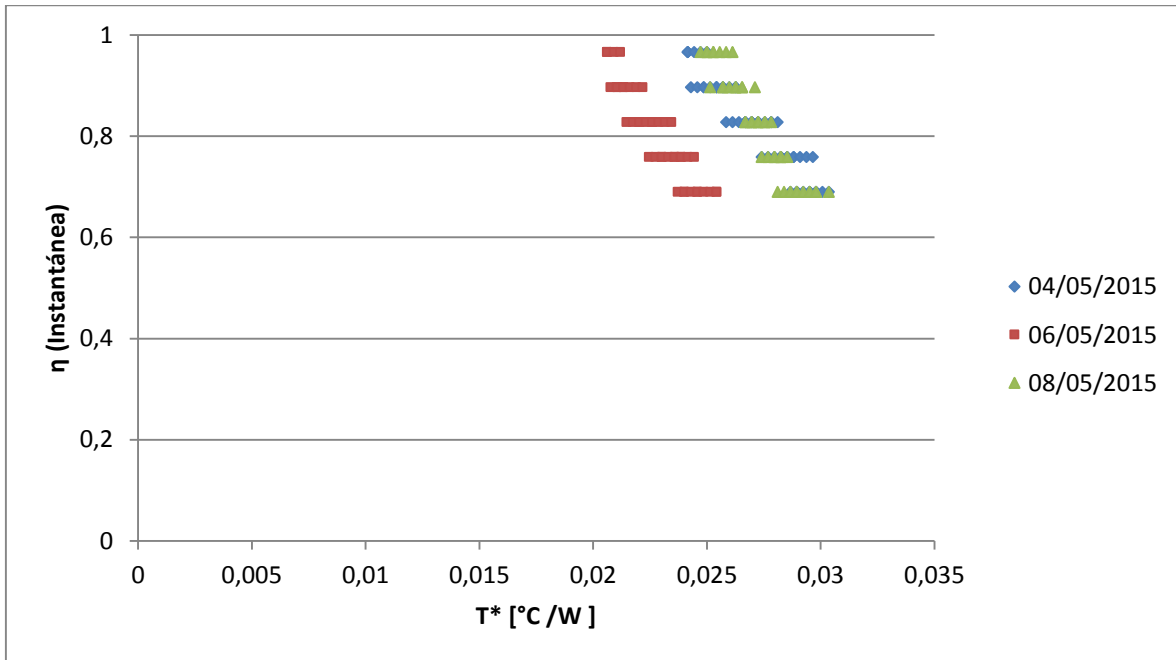


Fuente: Los autores.

En la gráfica 4, se observa el comportamiento promedio, al inicio y final de cada ensayo, de la velocidad del aire en los tres experimentos realizados, en referencia a nueve puntos de medición, distribuidos en el área de apertura del colector solar.

Los puntos que registran menor flujo de aire en todos los tres experimentos son: 1,4 y 7, estos puntos están ubicados en la parte inferior del colector solar. Sin embargo, los puntos en donde el flujo de aire es mayor oscilan entre la parte media y superior del colector para los tres experimentos, (puntos 2, 3, 5, 6 ,8 y 9). Esto se presenta ya que, en medio del ventilador y el colector se encuentra la estructura del foco de radiación simulada y este obstruye el paso de aire, también puede presentarse por la variación del suministro eléctrico que hace funcionar el ventilador. Cabe agregar que para cada prueba la velocidad promedio fue: prueba 1, representada por la línea de color azul de $3,68 \text{ ms}^{-1}$, prueba 2, representada por la línea de color rojo = $3,43 \text{ ms}^{-1}$ y la prueba 3, representada por la línea de color verde = $3,47 \text{ ms}^{-1}$.

Gráfica 5. Comportamiento general de la temperatura de salida para los experimentos.

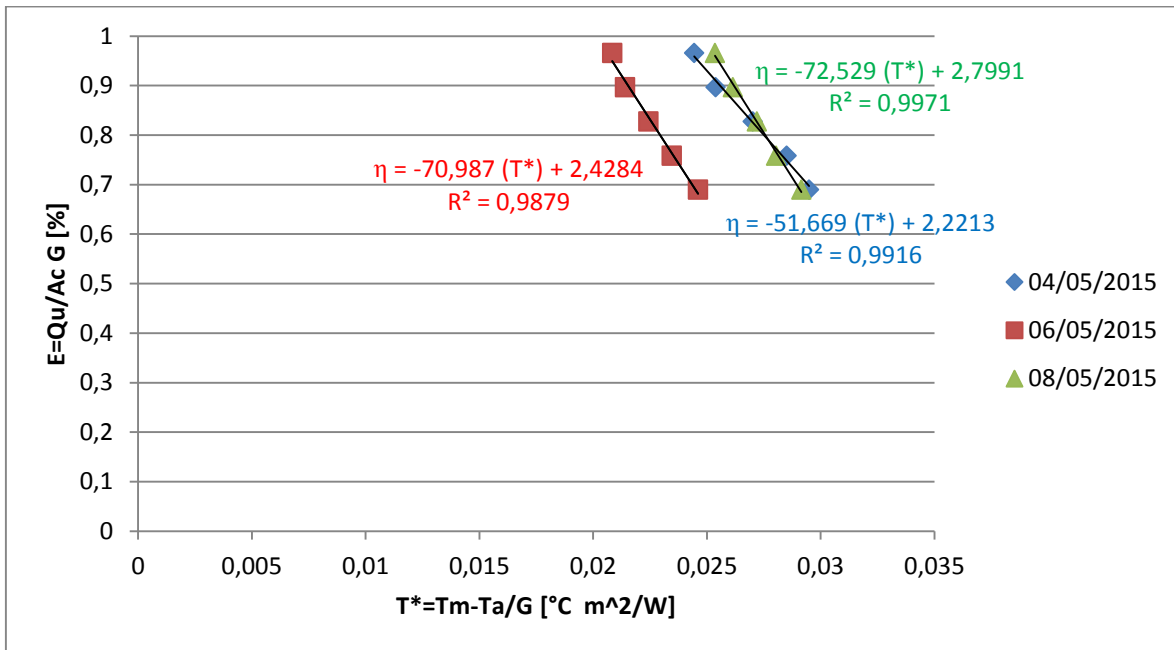


Fuente: Los autores.

En la gráfica 5, se presenta el resultado de los tres experimentos realizados al colector solar, durante diferentes fechas de ensayo se realiza una comparación del rendimiento térmico instantáneo ($\eta_{instantanea}$), obtenido en función de la temperatura reducida (T^*), hasta que culmina el tiempo de las pruebas. Se observan diferentes figuras que representan cada prueba así: rombos de color azul la primera prueba, cuadrados de color rojo la segunda prueba y triángulos de color verde la tercera prueba.

Este comportamiento se presenta debido al incremento de la temperatura media del fluido en relación a la temperatura ambiente a medida que transcurre el tiempo de los experimentos y en relación a este incremento se presentan mayores pérdidas de energía por esta razón el rendimiento del colector es menor.

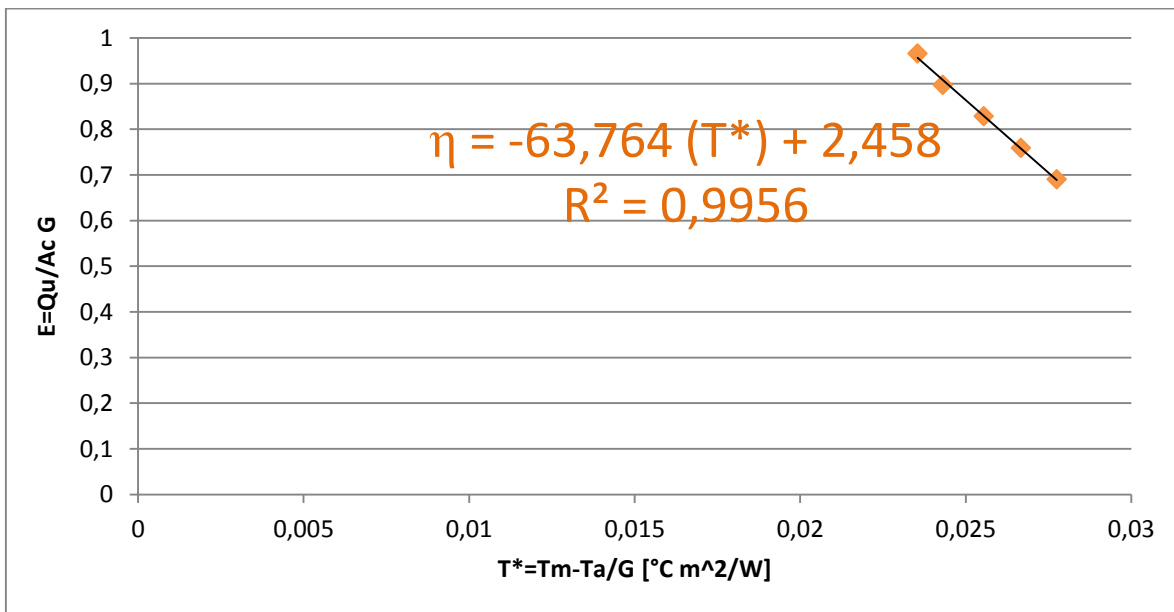
Gráfica 6. Eficiencia instantánea vs T* (promedio de cada experimento).



Fuente: Los autores.

En la gráfica 6, se observa el ajuste de datos promedio para cada experimento.

Gráfica 7. Eficiencia instantánea Vs T* (promedio los experimentos)



Fuente: Los autores.

En la gráfica 7, se observa el ajuste de datos promediado en los tres experimentos.

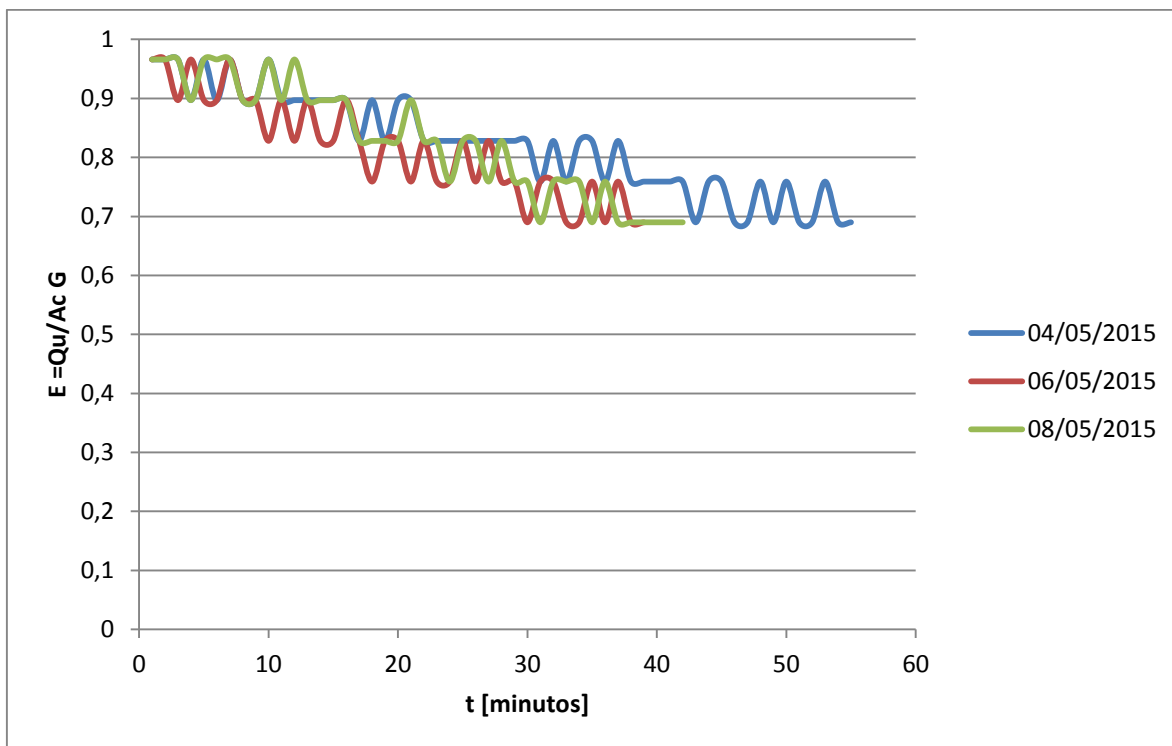
La función $\eta(T^*) = -63,764(T^*) + 2,458$ representa el resultado de eficiencia instantánea experimental del colector solar PSHC-1C, en condición cuasi-estable.

La función $\eta(T^*) = -63,764(T^*) + 2,458$ representa la tendencia de los datos propuestos para la ecuación de la recta, con un coeficiente $R^2 = 0,9956$. Esta función se asocia con el modelo analítico de rendimiento térmico instantáneo representado matemáticamente como $\eta(T^*) = -F_R U_L(T^*) + F_R(\tau\alpha)$.

El término $[Y(\chi)]$ representa la eficiencia térmica instantánea $\eta(T^*)$ (variable dependiente), el término $[-63,764(T^*)]$ representa el producto $[U_L(T^*)]$ definido como pérdidas térmicas, ese valor es la inclinación de la recta con pendiente negativa (siendo T^* la variable independiente). El término $(+2,458)$ representa el producto $[\tau\alpha]$ definido como pérdidas ópticas.

Una vez definida la anterior relación, se presenta el comportamiento la eficiencia del colector solar en función del tiempo, para los tres experimentos realizados, como se observa en la gráfica 8.

Gráfica 8. Eficiencia Vs tiempo.



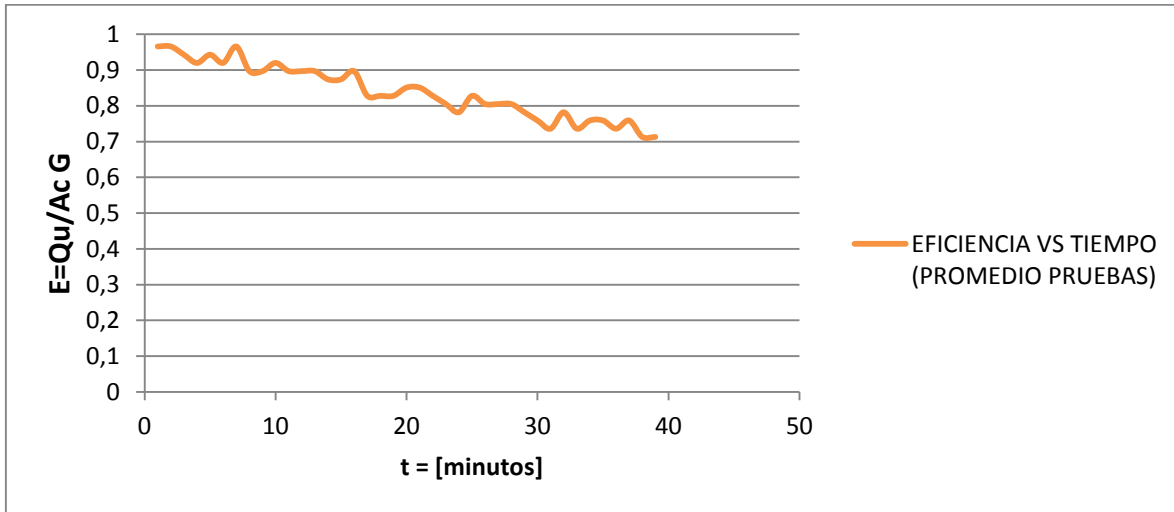
Fuente: Los autores.

En la gráfica 8, se observa el comportamiento de la eficiencia experimental en función del tiempo, para las pruebas realizadas. En referencia a la anterior gráfica, se observa el tiempo que tomo cada prueba, sobresaliendo la fecha 04/05/2015,

representada por la línea de color azul; seguido de la fecha 06/05/2015, representado por la línea de color rojo y finalmente la fecha 08/05/2015, representada por la línea de color verde.

Una vez visto el comportamiento de los tres experimentos se determina el comportamiento promedio de las pruebas, como se observa en la gráfica 9.

Gráfica 9. Eficiencia vs tiempo (promedio de los experimentos).

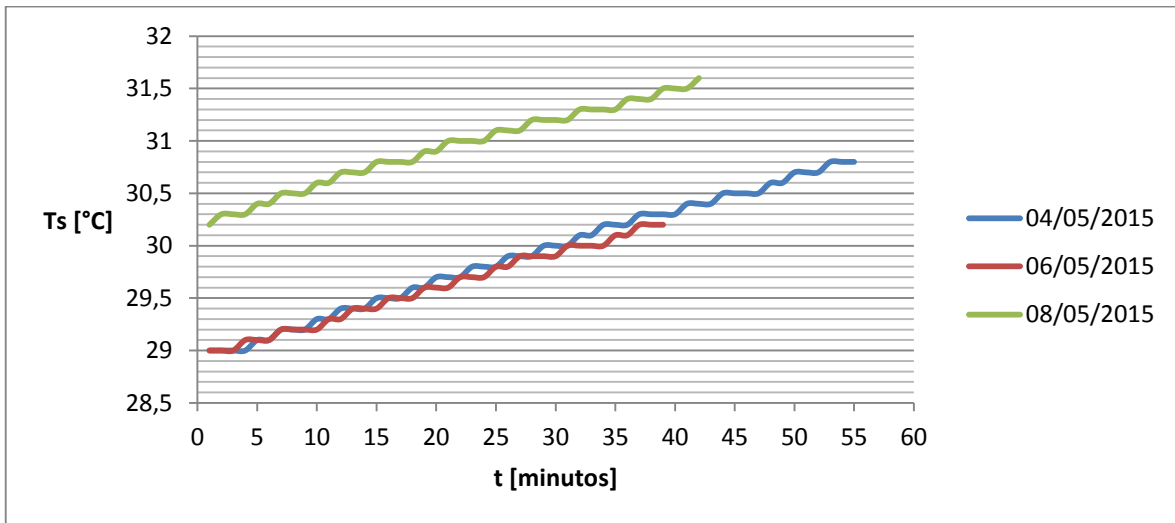


Fuente: Los autores.

En la gráfica 9 se presenta el comportamiento promedio de los tres experimentos en relación a la eficiencia en función del tiempo. Se observa con claridad que la eficiencia instantánea promedio decrece conforme aumenta el tiempo.

Una vez hallada la eficiencia instantánea promedio en función de la temperatura reducida y el tiempo, se procedió a estimar el comportamiento experimental de la temperatura de salida del colector solar para las tres pruebas, de forma similar a los procesos descritos anteriormente para la eficiencia instantánea. El comportamiento experimental de la temperatura de salida del colector solar se observa en la gráfica 10.

Gráfica 10. Temperatura de salida vs tiempo

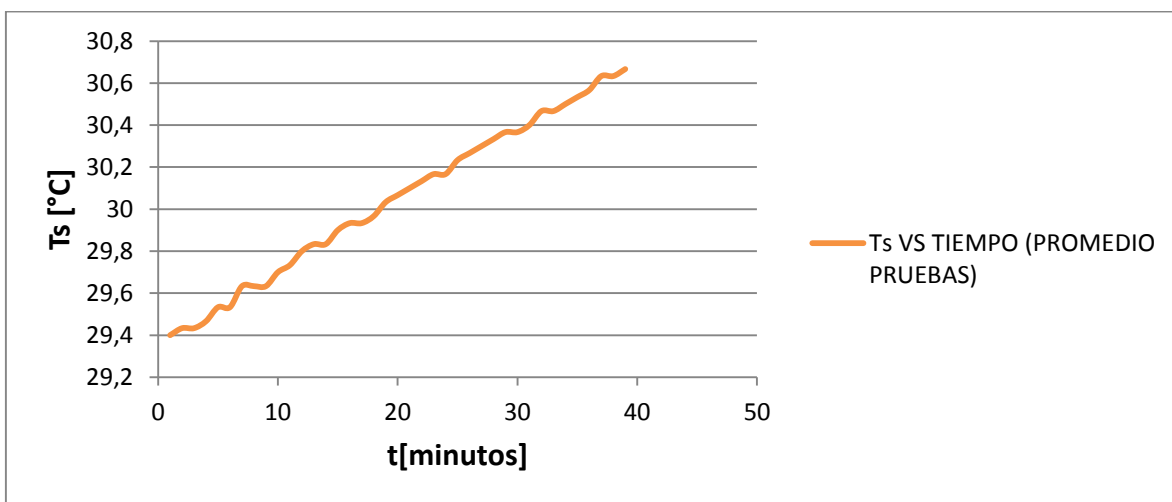


Fuente: Los autores

La gráfica 10 se presenta el comportamiento de la temperatura de salida del colector solar en función del tiempo, para las tres pruebas.

Una vez visto el comportamiento de la temperatura de salida del colector solar, en las tres pruebas, se determina el comportamiento promedio de las pruebas, como se observa en la gráfica 11.

Gráfica 11. Temperatura de salida vs tiempo (promedio de las pruebas).



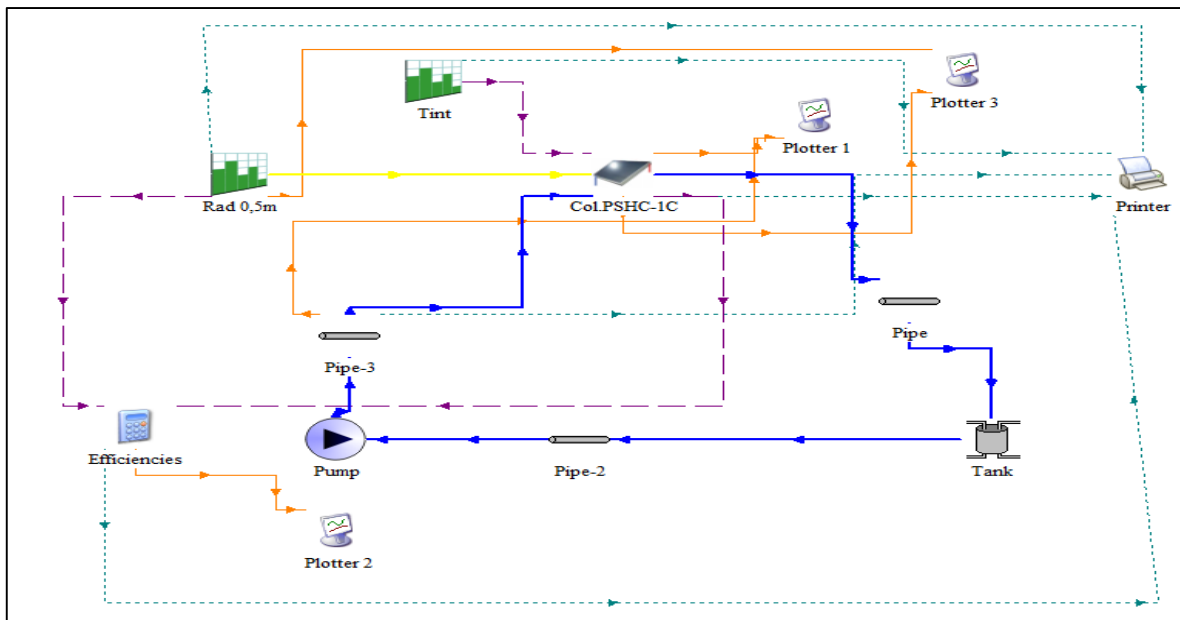
Fuente: Los autores

En la gráfica 11 se presenta el comportamiento promedio de los tres experimentos en relación a la temperatura de salida del colector solar como función del tiempo. Se observa que la temperatura de salida del colector solar incrementa conforme aumenta el tiempo, esta relación es directamente proporcional.

7.3 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN EN TRNSYS

Se procede a realizar la simulación en el software TRNSYS, con base al diagrama de flujo para la simulación del sistema de calentamiento de agua, presentado en el apartado 6.5.

Figura 31. Esquema final del experimento en TRNSYS



Fuente: Los autores.

En la figura 31, se presenta el montaje final para la simulación, con todos los elementos enlazados en relación a las variables que inciden en cada preforma, así como las variables a las cuales se desea ver su comportamiento con respecto al tiempo.

El flujo de la medición de la radiación medida está representado por la línea de color amarillo y se conecta al colector para que pueda leer los resultados de los valores de radiación y los relacione como su radiación incidente.

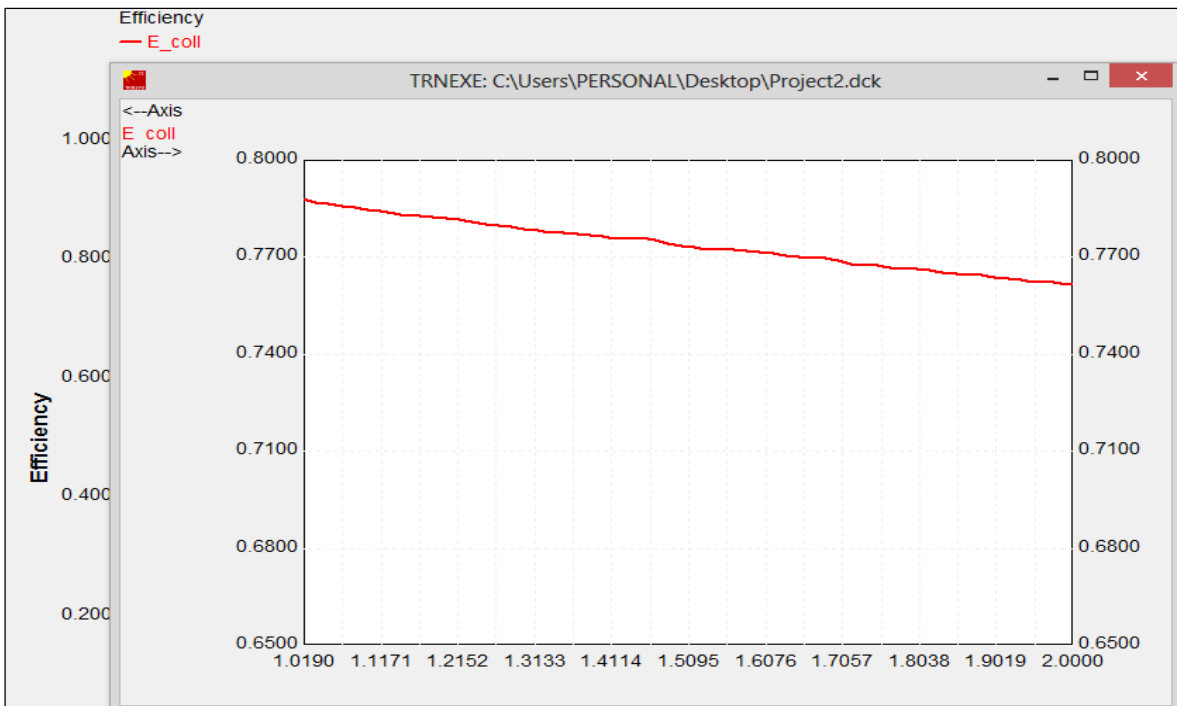
Las líneas de color azul, representan el ciclo del fluido de trabajo. Las variables a leer en este ciclo son: las temperaturas y el flujo másico.

Las líneas de color morado, representan como tal las variables de la función que se utilizan para hallar la eficiencia del colector y una función forzada de paso que representa la temperatura de entrada al colector.

Las líneas de color naranja representan las variables que se exportan a un archivo gráfico (*plotter*), para ser estudiado su proceso en relación al tiempo y las líneas punteadas de color verde, están enlazadas a la preforma (*printer*), que exporta los datos a un archivo externo. Las variables a leer para toda la simulación son la eficiencia, temperaturas de salida del colector la radiación simulada y la energía útil que aprovecha el colector.

Una vez definido el esquema, se procesa la información que caracteriza el sistema, tal como se observa en la gráfica 12.

Gráfica 12. Comportamiento de la eficiencia en función al tiempo en la simulación.

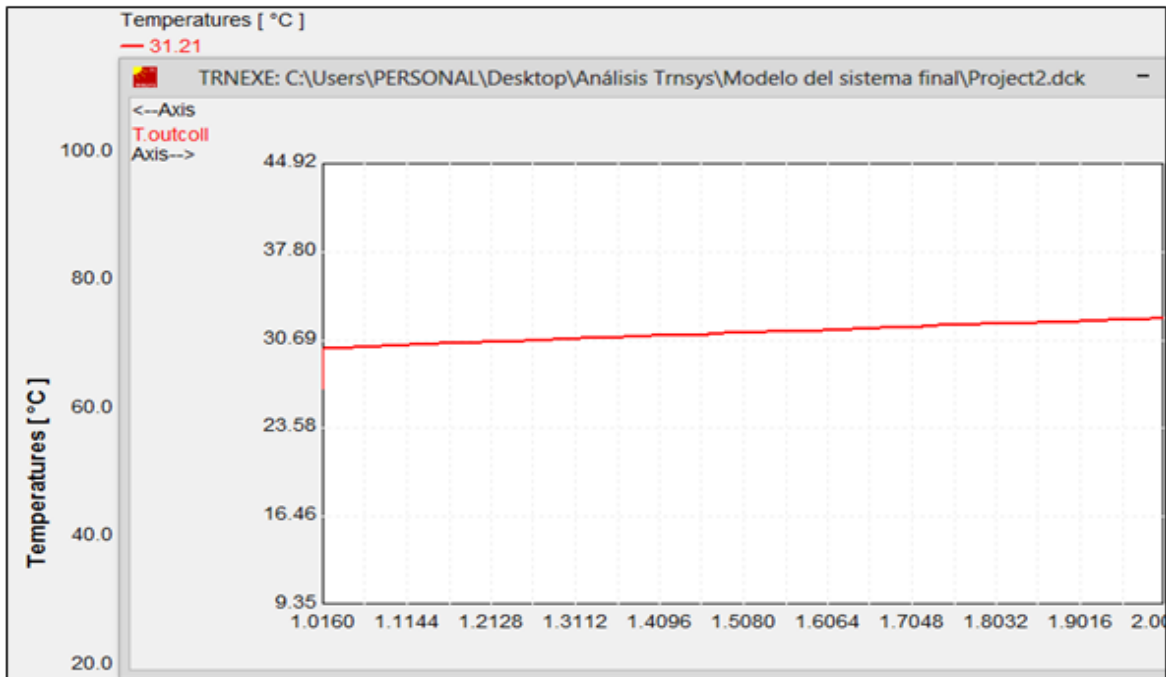


Fuente: Los autores.

En la gráfica 12, se muestra la eficiencia del colector solar de placa plana PSHC-1C, representada por la línea de color rojo, durante el período de una hora. Se observa claramente que el valor de la eficiencia prácticamente no fluctúa y que desciende a medida que avanza el tiempo.

La gráfica 13, muestra el comportamiento de la temperatura de salida del agua, para el mismo período de tiempo de la eficiencia.

Gráfica 13. Comportamiento de la temperatura de salida en la simulación.



Fuente: Los autores

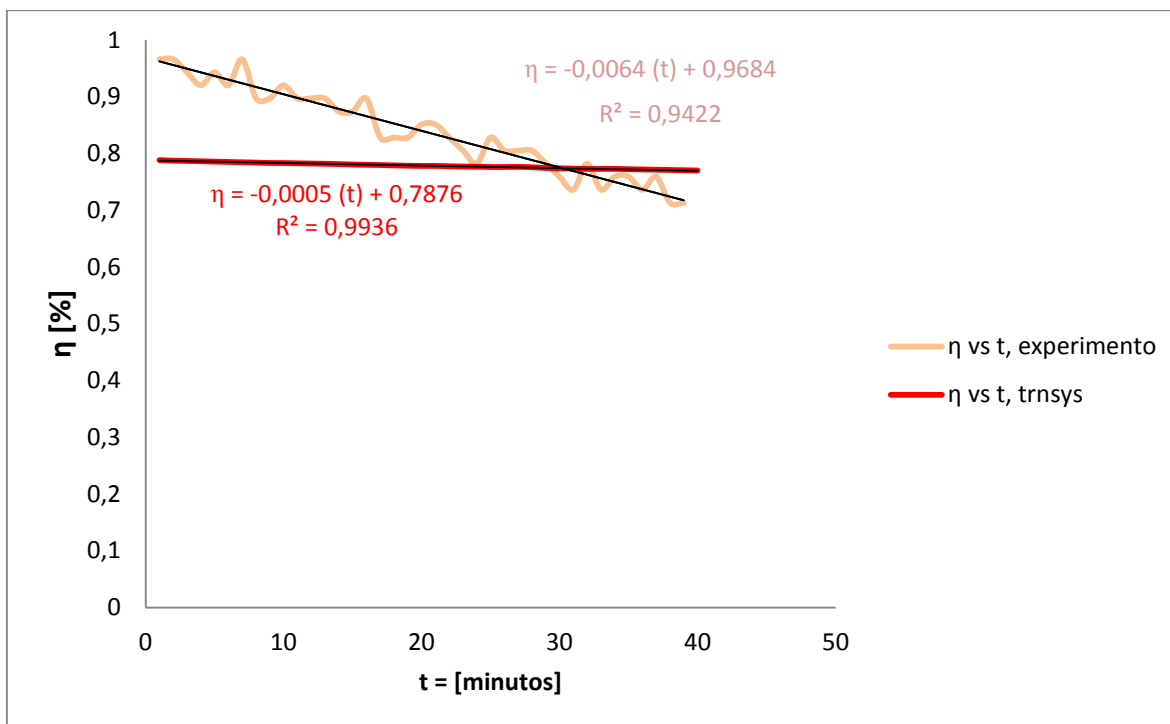
En la gráfica 13, se puede apreciar el comportamiento de la temperatura de salida del colector solar de placa plana PSHC-1C, representado por la línea de color rojo en unidades de temperatura de grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$), para un tiempo de simulación de una hora. Se observa claramente un comportamiento ascendente de la temperatura de salida del colector solar y que no fluctúa a medida que transcurre la simulación.

Una vez hallados los valores promedio de las pruebas tanto simuladas como experimentales, se procede a comparar.

7.4 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN Y SIMULACIÓN.

Se compara el comportamiento de la eficiencia obtenida por la eficiencia instantánea experimental y la simulación en TRNSYS del colector solar, como se observa en la gráfica 14.

Gráfica 14. Comparación de la eficiencia simulada con la eficiencia instantánea experimental.



Fuente: Los autores

Como se observa en la gráfica 14, los valores extremos (inicio y final), de la eficiencia instantánea experimental, están en el rango de 0,96 a 0,71. De la misma manera los valores para la eficiencia simulada están en el rango de 0,7882 a 0,7703. Para un tiempo de evaluación de 39 minutos.

Con referencia en lo anterior se observa que el comportamiento de las dos eficiencias tiende a disminuir conforme aumenta el tiempo. Sin embargo el comportamiento de la eficiencia experimental fluctúa con mayor frecuencia y su pendiente es más pronunciada comparado con la eficiencia simulada.

Para la comparación de los datos obtenidos, estadísticamente se realiza la prueba de hipótesis de Kolmogorov Smirnov, (KS), ya que esta prueba permite medir el grado de concordancia existente entre una distribución teórica en este caso la simulación y una distribución experimental⁸⁵.

⁸⁵ Prueba de Kolmogorov Smirnov. [En línea]. [Citado 02-jun-2015]. Disponible en: (http://www-01.ibm.com/support/knowledgecenter/SSLVMB_21.0.0/com.ibm.spss.statistics.help/idh_ntk1.htm?c p=SSLVMB_21.0.0%2F0-1-26-5-3&lang=es).

A continuación se presenta en la tabla 13, los resultados obtenidos de la prueba de hipótesis para las eficiencias simulada y experimental realizados en Excel.

Tabla 13. Prueba de hipótesis para eficiencia simulada con la eficiencia instantánea experimental.

	Teóricos (simulación)	Experimentales
Media	0,7785	0,8397
Observaciones	39	39
Coeficiente de correlación de Pearson	0,972321215	
P-valor	$3,54832 \times 10^{-6}$	

Fuente: Los autores.

Para realizar la prueba de hipótesis se plantea la siguiente relación:

$$f(x) = \text{teórico (sim)}$$

$$g(x) = \text{experimental}$$

De acuerdo a la anterior denominación se plantea una hipótesis nula (H_o) para la prueba, así como una hipótesis alternativa (H_a).

$$H_o = f(x) \geq g(x)$$

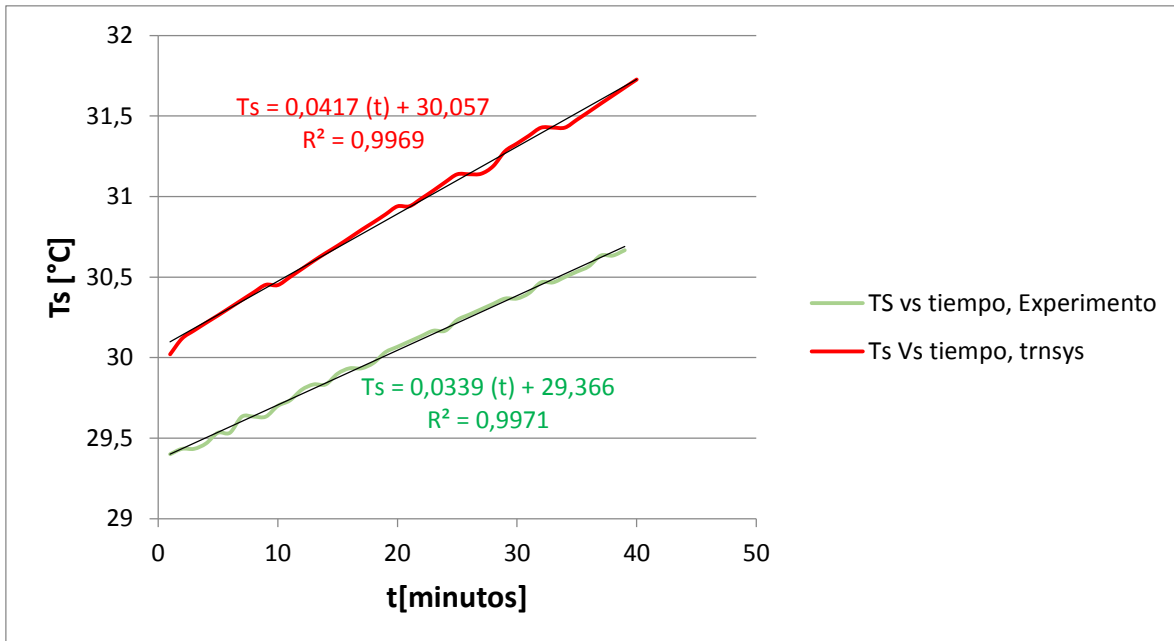
$$H_a = f(x) < g(x)$$

Planteadas las hipótesis anteriores se obtiene el nivel de significancia observado (P-valor), el cual mide el grado de confianza que se puede tener si el valor verdadero es muy diferente al valor especificado por la hipótesis nula (H_o).

Con respecto a la diferencia de la media de la eficiencia instantánea experimental con la eficiencia simulada, se obtiene un valor de: $0,0612 \cong 6,12\%$.

Posteriormente, se compara el comportamiento de las temperaturas de salida del colector solar en la simulación realizada en el programa TRNSYS y el experimento, como se observa en la gráfica 15.

Gráfica 15. Comparación entre las temperaturas de salida del colector solar simulado y experimental.



Fuente: Los autores

Como se observa en la gráfica 15, los valores extremos (inicio y final), de la temperatura de salida simulada, están en el rango de 30,02°C a 31,67 °C. De la misma manera los valores para la eficiencia simulada están en el rango de 29,4 °C a 30,6 °C. Para un intervalo de tiempo de 39 minutos.

Con referencia en lo anterior, se observa que el comportamiento de las dos temperaturas de salida tiende a aumentar conforme transcurre el tiempo, sin embargo el incremento de la temperatura de salida en la simulación es mayor que el incremento de la temperatura de salida en el experimento.

Para la comparación de los datos obtenidos, estadísticamente, se realiza la prueba de hipótesis de Kolmogorov Smirnov, (KS), de la misma manera que para los valores de eficiencia.

A continuación se presenta en la tabla 14, los resultados obtenidos de la prueba de hipótesis para las temperaturas de salida simulada y experimental realizadas en Excel.

Tabla 14. Prueba de hipótesis para temperaturas de salida simulada y experimental

	Teóricos (simulación)	Experimentales
Media	30,8914	30,0444
Observaciones	39	39
Coeficiente de correlación de Pearson	0,997499577	
P-valor	3,43329E-38	

Fuente: Los autores

Para realizar la prueba de hipótesis se plantea la siguiente relación:

$$f(x) = \text{teórico (sim)}$$

$$g(x) = \text{experimental}$$

De acuerdo a la anterior denominación se plantea una hipótesis nula (H_o) para la prueba, así como una hipótesis alternativa (H_a).

$$H_o = f(x) \leq g(x)$$

$$H_a = f(x) > g(x)$$

Planteadas las hipótesis anteriores se obtiene el nivel de significancia observado (P-valor), el cual mide el grado de confianza que se puede tener si el valor verdadero es muy diferente al valor especificado por la hipótesis nula (H_o).

Con respecto a la diferencia de la media de la temperatura de salida teórica (simulada) con la temperatura de salida experimental, se obtiene un valor de 0,85°C.

8. CONCLUSIONES

No se obtuvo la curva característica del colector solar PSHC-.1C, debido a que el valor hallado de F_R no está acorde con la teoría (≤ 1), esto debido al no cumplimiento de las condiciones postuladas en las normativas consultadas. Para lograr los datos que construyen la curva característica del colector de debe manipular la variable independiente (T^*) en diferentes pruebas, lo cual no se pudo realizar.

El comportamiento de la eficiencia experimental y simulada tienden a disminuir respecto al tiempo, de acuerdo a la teoría, esto se debe al calentamiento progresivo del agua en el sistema y a sus pérdidas térmicas. La eficiencia experimental oscila con mayor frecuencia que la simulada, debido a que TRNSYS no considera pérdidas de calor por tubería y accesorios, en la experimentación esta variación se presenta debido a las condiciones del ambiente no controladas.

El comportamiento de la temperatura de Salida experimental y simulada tienden a aumentar respecto al tiempo, de acuerdo a la teoría, esto se debe al calentamiento progresivo del agua en el sistema. La temperatura de salida simulada presenta un mayor aumento debido a que la simulación ejecuta su proceso bajo condiciones teóricas e ideales, puede ser más exacta pero menos precisa.

La comparación estadística (prueba de hipótesis de Kolmogorov Smirnov) realizada entre la simulación y la experimentación. Se obtuvo el nivel de significancia observado muy pequeño $< 0,05$, razón por la cual las frecuencias simulada y experimental difieren significativamente y no se puede realizar la comparación por esta prueba no paramétrica.

9. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar pruebas experimentales en estado transitorio, para mejorar la comparación con la simulación.

Se recomienda para realizar una completa caracterización del colector realizar las pruebas de: constante temporal y la determinación de la respuesta del colector al ángulo de incidencia.

Se recomienda registrar datos cuando la diferencia de temperatura sea mayor a 1K, para evitar problemas asociados con la precisión de los instrumentos.

Se recomienda para posteriores estudios, evaluar el colector siguiendo rigurosamente las condiciones de evaluación presentados por las normativas para ensayos en interior.

Para futuros proyectos con el Sistema de entrenamiento en energía solar térmica se recomienda utilizar un sistema de adquisición de datos (data logger), y conectarlo al controlador diferencial. Ya que posiblemente se puede inferir en errores en la medición por parte de la persona que toma los datos (errores de apreciación).

BIBLIOGRAFIA

- ALTAMUSH SIDDIQUI, M. (1997). Heat transfer and fluid flow studies in the collector tubes of a closed – loop natural circulation solar wáter heater. *Energy conversion*(8 (38)), 799-812.
- ANDERSON, T. N. (2010). The effect of color on the termal performance of building integrated of building solar collectors. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 94 (1), 350-354.
- BURBANO, J. C. (2007). Ensayos y Pruebas de un Calentador Solar de Agua operando por Termosifón. *Scientia et Technica*(34 (13)), 189-194.
- CANSECO, M. (2010). Energías renovables en America Latina. *Fundación ciudadanía y valores*, 1-12.
- CAÑADA RIBERA, J. (2008). *Manual de energía solar térmica diseño y cálculo de instalaciones. Componentes de una instalación solar*. Valencia: Editorial de la UPV.
- CENGEL, Y. A. (2007). *Transferencia de calor y masa* (Tercera ed.). México: McGraw-Hil.
- CHUAWITTAYAWUTH, K. K. (2002). Experimental investigation of temperature and flow distribution in a thermosyphon solar water heating system. *Renewable Energy*, 26 (1), 4313-448.
- Council, H. M. (1991). *Performance Rating Procedure Using Indoor Test Methods*. New Delhi: Copyright.
- CREUS SOLÉ, A. (2010). *energía termosolar*. Catalunya, España: Cano Pina, S.L. Ceysa.
- CREUS, A. (2010). *Instrumentación industrial* (Octava ed.). México D.F: Alfaomega.
- DAS, S. (2006). Sensitivity analysis of the test parameters of a solar flat plate collector for performance studies. *Advances in energy research*.
- DUFFIE, J. &. (2006). *Solar Engineering of Thermal Process* (sexta ed.). New York: Wiley & Sons, inc.
- FERNANDEZ SALGADO, J. M. (2010). *Guia completa de la energía solar térmica y termoeléctrica*. Madrid: amv ediciones.

- GARCIA VALLADARES, D. P. (2008). Outdoor test method to determinate the thermal behavior of solar domestic water heating systems. *Solar energy*(82 (1)), 4650-4658.
- GIOVANNETTI, F., Sebastian, F., EHRMANN, N., & Gunter., R. (2012). High transmittance, low emissivity glass covers for flat plate collectors: applications and performance. *ScienceDirect*(30), 106-115.
- HO, C.-D. (2010). Experimental and theoretical studies of recyclic flat-plate solar water heaters equipped with rectangle conduits. *Renewable Energy*, 35 (1), 2279-2287.
- HOBBI, A. &. (2009). Optimal desing of a forced circulation solar water heating system for a residential unit in cold climate using TRNSYS. *Solor Energy*, 700-714.
- HOBBI, A. (2009). Experimental study on the effect of heat transfer enhancement devices in flat-plate solar collectors. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52 (1), 3707-3716.
- HOLMAN, J. (1998). *Transferencia de calor* (Vol. IX). Mexico: Continental, S.A. de C.V.
- Investigación científica RO Ltda. (1996). *Censo, caracterización y grado de satisfacción de los sistemas solares termicos instalados en Colombia* . Bogotá Colombia.
- JANNA, W. S. (2009). *Engineering heat transfer* (Tercera ed.). New York: Taylor & Francis group.
- JUTGLAR, L. (2004). *Energía solar*. Barcelona: Ceac.
- KALOGIROU, S. (2009). *Solar energy engineering: processes and system*. California : Elseiver Inc.
- KALOGIROU, S. A. (2000). Modeling of a thermosyphon solar water heating system and simple model validation. *Renewable Energy*, 471 – 493.
- KLEIN, S. e. (2010). *Trnsys version 17 program manual*. Madison: Solar energy laboratory, University Wisconsin.
- KOFFI, P. e. (2008). Theoretical and experimental study of solar water heater with internal exchanger using thermosiphon system. *Energy conversion and managment*, 49 (1), 2279-2290.
- LAB-VOLT. (02 de 03 de 2015). *Energía alternativa y renovable*. Obtenido de Sistema de entrenamiento en energía solar térmica modelo 46121: <http://www.labvolt.com>

- LEE, D. W. (2007). Thermal performances of the active and passive water heating systems based on annual operation. *Solar Energy*(81 (1)), 207-215.
- M, S. F. (2010). *Guía Completa de la Energía Solar Térmica y Termoeléctrica*. Madrid.
- MANRIQUE, J. A. (1984). *Energía solar, fundamentos y aplicaciones*. Mexico D.F: Harla s.a de c.v.
- MASSIPE HERNÁNDEZ, J. R. (2005). Estudio comparativo del comportamiento térmico de colectores solares integrales y planos en el clima de cuba. *Tecnología química, XXV*(3), 5-13.
- MICHAELIDES, I. M. (2011). An experimental investigation of the performance boundaries of a solar water heating system. *Experimental Thermal and Fluid Science, 35* (1), 1002-1009.
- NOPPER, R. (2012). Mathematical modeling: an industrial perspective . *Guest Editorial. COMSOL News, 21*(1).
- PERALES BENITO, T. (2008). *Energía solar térmica*. Madrid: Ediciones copyright.
- POLO BRAVO, C. &. (2004). Métodos experimentales para la evaluación de colectores y termas solares. *Centro de energías renovables de Tacna*.
- RABL, A. (1985). *Active solar collector and their applications*. Oxford: Oxford university press.
- REPÚBLICA, P. D. (3 de febrero de 2015). *Presidencia de la república*. Obtenido de Ley 1715 2014: <http://wsp.presidencia.gov.co>.
- RODRIGUEZ HÍDALGO, M. e. (2011). Flat plate thermal solar collector efficiency: transient behavior under working conditions. Part I: Model description and experimental validation. *Applied Thermal Engineering, 31* (1), 2394-2404.
- RODRIGUEZ MURCIA, H. (2008). Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. *Revista de ingeniería Universidad de los Andes, 84-86*.
- RODRÍGUEZ MURCIA, H. (2009). Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. *Revista de ingeniería Universidad de los Andes, 28* (1), 83-89.
- RUBIN, M. (1985). Properties of soda lime silica glases. *Solar energy materials*(12), 275-288.
- SAFWAT Nafeyh, A. H. (2005). Simulation of solar heating systems: an overview. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*(91), 576 – 591.
- SHARIAH, A. H. (1997). Optimal design for a thermosyphon solar water heater. *Renewable Energy*(11 (1)), 351-361.

- SILINGIRI, T. (2002). Back absorbing parallel plate polymer in solar collector design. *Energy conversion and management*, 43 (1), 135-150.
- SUAREZ VARGAS, D. A. (02 de 03 de 2015). *Bdigital Unal*. Obtenido de <http://www.bdigital.unal.edu.co/11223/1/01194139.2013.pdf>
- TAHERIAN, H. e. (2011). Experimental validation of dynamic simulation of the flat plate collector in a closed thermosyphon solar water heater. *Energy Conversion and Managment*, 52 (1), 301-307.
- Unidad de Planeación Minero- Energética. (2003). Guia de especificaciones de sistemas de calentamiento de agua para uso domestico con energía solar en Colombia. Bogotá.
- William, N. (s.f.). *Estadística para ingenieros y científicos*.
- WILLS, A. D. (2013). *Desing and co-simulation of a seasonal thermal system for a Canadian single family detached house*. Otawwa, Ontario: Departament of mechanical and aerospace engineering Carlenton University.
- ZAMBOLIN, E. &. (2010). Experimental analysis of thermal performance of flat plate and evacuated tube solar collectors in stationary standard and daily conditions. *Solar Energy*(84 (1)), 1382-1396.

ANEXOS

Anexo A. Protocolo de medición radiación simulada.

Protocolo realizado para la medición de la radiación simulada en condiciones controladas.

Nombre del experimento: Medición radiación simulada

Fecha:

Hora:

Lugar:

Participantes:

1. Condiciones ambientales

1.1. Temperatura ambiente:

1.2. Estado del tiempo durante la prueba:

2. Objetivo

Obtener la radiación directa, del simulador de radiación solar PL 2532Q2, en relación con algunos parámetros establecidos en las normas NTC 5434-2 (Colombia) y NMX-ES-001 (México).

3. Metodología

3.1. Referencias:

- ICONTEC. NTC 5434-2. Sistemas Solares Térmicos Y Componentes, Colectores Solares, Parte 2: Metodos de Ensayo. Revisión 28/10/14.
- NORMEX. NMX-ES-001.Energía Solar – Rendimiento Térmico Y Funcionalidad De Colectores Solares Para Calentamiento De Agua – Métodos De Prueba Y Etiquetado. Revisión 01/11/14.

3.2. Materiales:

- 2 cables de conexión
- 1 Valletilla
- 1 Base de soporte para el piranómetro
- 1 Flexómetro
- 1 Cinta de demarcación
- Cartón

3.3. Equipos:

- 1 piranómetro espectral de precisión. Kipp & Zonen CMP 3.


- 1 multímetro digital Fluke 287 True rms Multimeters.
- 1 cronometro
- 1 simulador de radiación solar (Telescopic halogen work lights PL253Q2). 1000 W.

3.4. Procedimiento:

- Con un trapo, se limpia suavemente la cúpula del piranómetro y los focos del simulador de radiación solar (lámpara).
- Se debe colocar un cartón en las entradas de luz solar del laboratorio (ventanas), para evitar que fuentes de radiación solar natural incidan y afecten la medición.
- Se debe ocultar con un cartón tableros o fuentes reflejantes, ya que estas pueden afectar la medición.
- Se debe colocar el piranómetro en posición horizontal y por medio de los tornillos niveladores ubicar la burbuja en posición concéntrica al círculo inscrito en el nivel de burbuja⁸⁶.
- Se debe montar el piranómetro en la base de soporte con el ángulo de inclinación de apertura del colector solar, el mismo ángulo está dentro de las tolerancias, de las normas consultadas (50°).
- Una vez montado el piranómetro en la posición típica de ensayo, se debe permitir que el instrumento alcance su equilibrio térmico durante al menos 30 minutos.
- Se conecta el cable del piranómetro – con los cables del multímetro digital FLUKE 287.
- Se coloca la cinta de demarcación en el suelo, en relación a la horizontal de la mesa de ensayo.
- Se mide con el flexómetro las distancias de 0,5 y 3 [m] teniendo como referencia la cinta colocada anteriormente, y posteriormente se colocan cintas demarcando cada distancia medida (ninguna norma específica la distancia de colocación de las lámparas).
- Se ubica la base de las lámparas paralela a la cinta de la primera distancia medida.
- Se debe ubicar los focos de la radiación solar simulada de manera que incidan en el piranómetro y su ángulo de incidencia sea menor a 20°.
- Conectar El simulador de radiación solar a la fuente de distribución local de energía eléctrica.
- Seleccionar en el multímetro el modo de medición de corriente directa (DC) y posteriormente sus unidades, ya sean milivoltios [mV] o voltios [V].
- Cerrar la puerta del laboratorio y apagar la luz de los bombillos.
- Se debe encender los focos de la lámpara de radiación solar simulada y esperar 10 minutos que estas se estabilicen para comenzar la toma de datos.

⁸⁶ Bitácoras calibración de piranómetro. Jiménez. Silvio A. Procedimiento página 2. 2011.

Anexo B. Certificado de la constante de calibración del piranómetro.

	KIPP & ZONEN SINCE 1830	CALIBRATION CERTIFICATE
---	---------------------------------------	--------------------------------

CERTIFICATE NUMBER	009410139720
PYRANOMETER MODEL	CMP 3
SERIAL NUMBER	139720
SENSITIVITY	15.05 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$ at normal incidence on horizontal pyranometer
IMPEDANCE	46 Ω
TEMPERATURE	22 \pm 2 $^{\circ}\text{C}$
REFERENCE PYRANOMETER	Kipp & Zonen CMP 3 sn 060193 active from 01 January 2013
CALIBRATION DATE	12 November 2013
CLASSIFICATION	ISO 9060, Second Class

Calibration procedure

The indoor calibration procedure is based on a side-by-side comparison with a reference pyranometer under an artificial sun fed by an AC voltage stabiliser. It embodies a 150-W Neon-Halide high-pressure gas discharge lamp. Behind the lamp is a reflector with a diameter of 16.2 cm. The reflector is above the pyranometers producing a vertical beam. The reference and test pyranometers are mounted horizontally on a table, which can rotate. The irradiance at the pyranometers is approximately 500 W/m^2 . During the calibration procedure the reference and test pyranometer are interchanged to correct for any non-homogeneity of the beam. This procedure is in accordance with ISO 9847, Type IIc.

Hierarchy of traceability

The reference pyranometer was compared with the sun and sky radiation as source under mainly clear sky conditions using the "continuous sun-and-shade method". The measurements were performed in Dares (latitude: 46.8143; longitude: -9.8458; altitude: 1588 m above sea level). The readings are referred to the World Radiometric Reference (WRR) as stated in the WMO Technical Regulations. The originally estimated uncertainty of the WRR relative to SI is $\pm 0.3\%$.

The inclination of the receiver surface versus the true horizontal plane was set to 0.0 degrees; the instrument signal wire to the north. During the comparisons, the instrument received global radiation intensities from 629 to 1021 with a mean of 840 W/m^2 . The angle between the solar beam and the normal of the receiver surface varied from 26.2 to 49.9 with a mean of 36.2 degrees. The ambient temperature ranged from +11.3 to +23.1 with a mean of +17.0 $^{\circ}\text{C}$. The sensitivity calculation and the single measurements deviation (rd) are based on 381 individual measurements. The obtained sensitivity value and its expanded uncertainty (95% level of confidence) are valid for similar conditions and are: 14.8 \pm 0.49 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$ that is corrected by Kipp & Zonen to 15.12 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$. See "correction applied" below.

Dates of measurements: 5, 9, 10, 18, 23, 24 July 2012

Global radiation data were calculated from the direct solar radiation as measured with the absolute cavity pyrheliometer PMO2 (member of the WSG, WRR-factor: 0.998623, based on the last International Pyrheliometer Comparison IPC-2010) as d from the diffuse radiation as measured with a continuous disk shaded pyranometer Kipp & Zonen CM22 SN 920059 with sensitivity 8.91 (ventilated with heated air, instrument-wire to the north).

Justification of total instrument calibration uncertainty

The combined uncertainty of the result of the calibration is the positive "root sum square" of two uncertainties.

1. The expanded uncertainty due to random effects and instrumental errors during the calibration of the reference CMP 3 as given by the World Radiation Center in Dares is $\pm 0.49/14.8 = \pm 3.3\%$. (See traceability text).
2. Also based on experience the expanded uncertainty of the transfer procedure (calibration by comparison) is estimated to be $\pm 0.5\%$.

The estimated combined expanded uncertainty is the positive "root sum square" of these two uncertainties: $\pm 3.3\% + 0.5\% = \pm 3.4\%$.

Notice

The calibration certificate supplied with the instrument is at the date of first use. Even though the calibration certificate is dated relative to manufacture, or recalibration, the instrument does not undergo any sensitivity changes when kept in the original packing. From the moment the instrument is taken from its packaging and exposed to irradiance the sensitivity may deviate with time. See the "non-stability" value (5 change in sensitivity per year) given in the radiometer specifications.

Delft, The Netherlands, 12 November 2013

	
J. Mes (in charge of calibration facility)	G. van der Wilt (in charge of test)

Anexo C. Planos de la estructura para soporte del piranómetro.

Figura 1. Vista isométrica de la estructura, para el soporte del piranómetro.

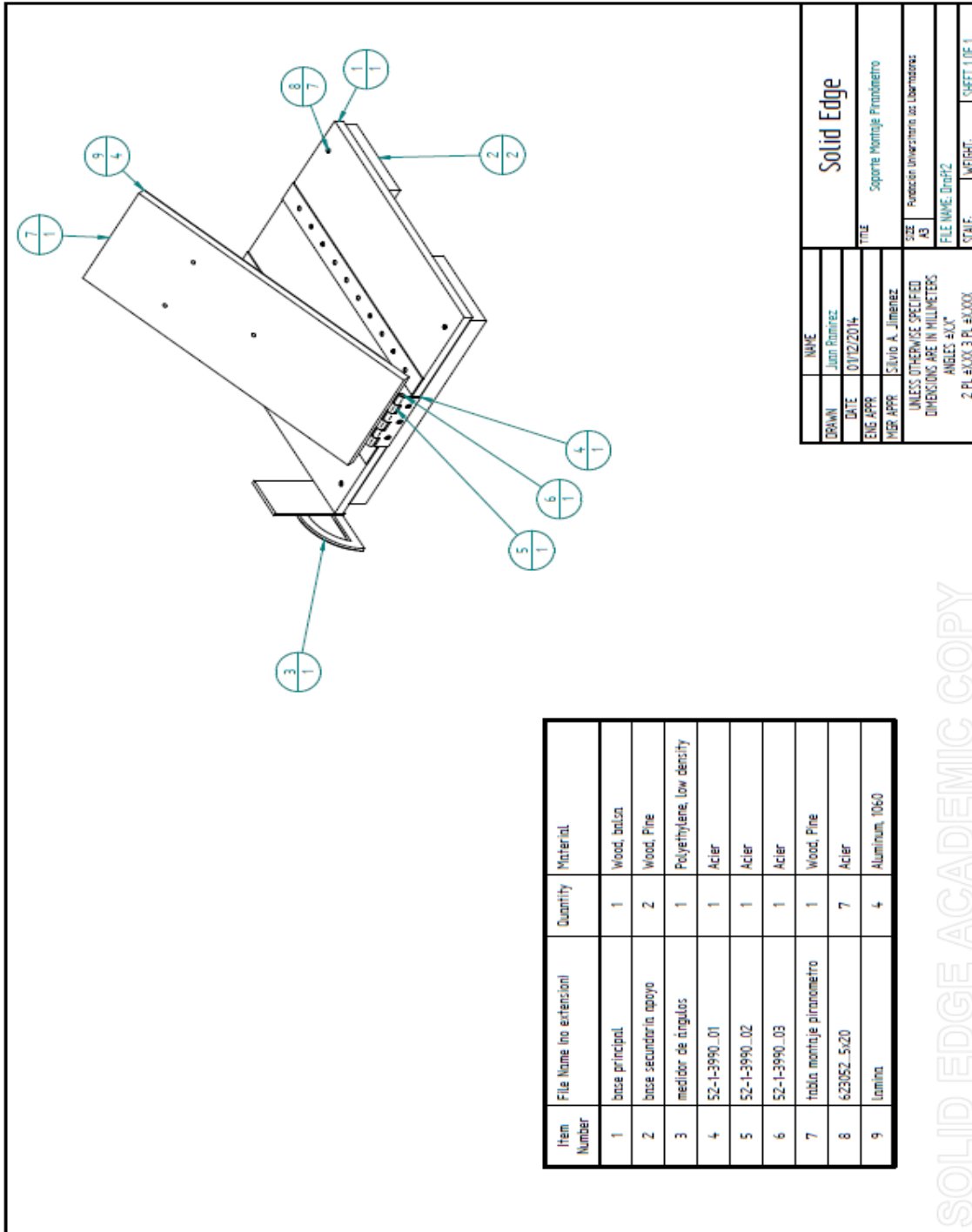
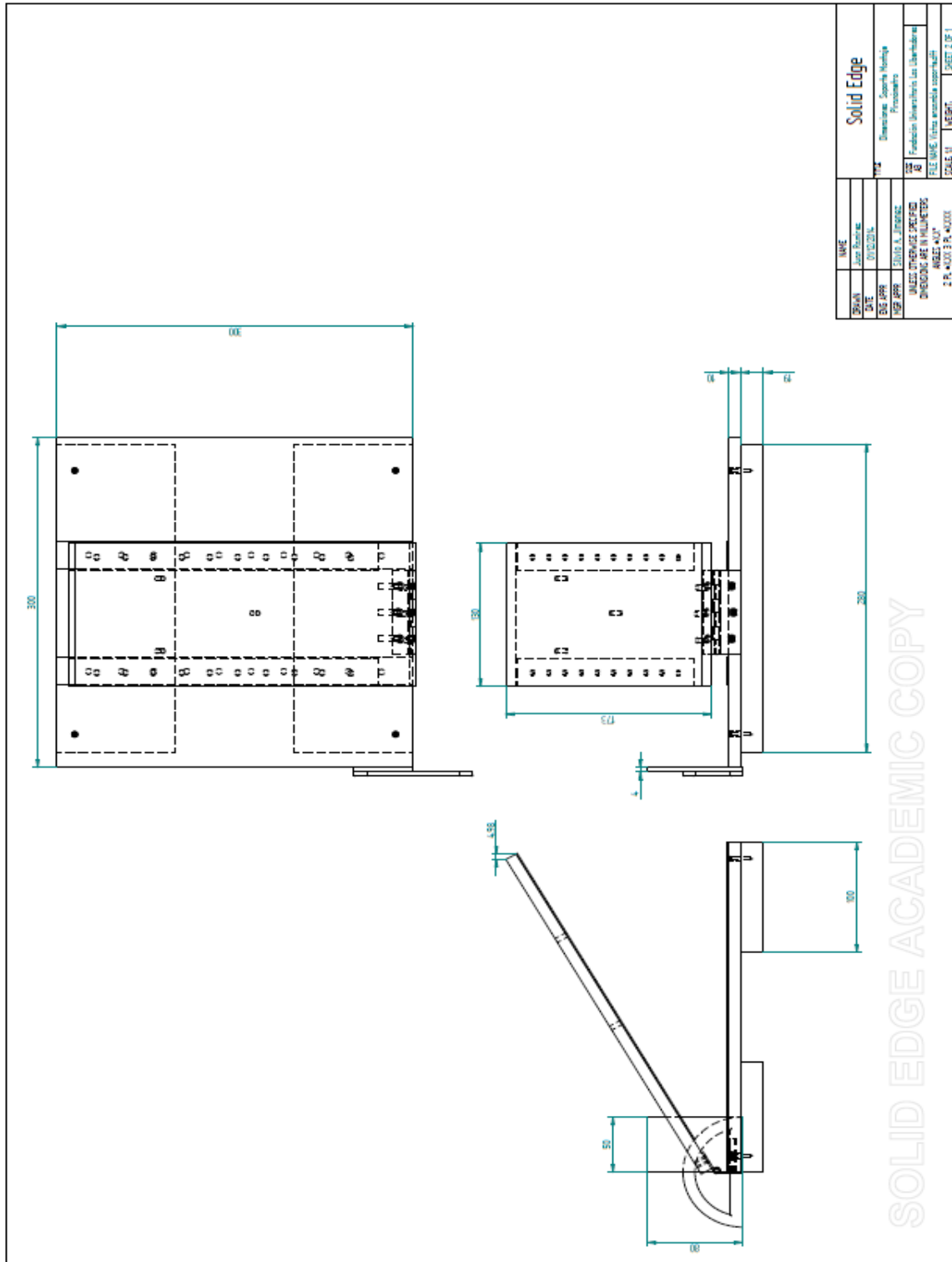


Figura 2. Vistas frontal, lateral izquierda y de planta de la estructura para el soporte del piranómetro.



Anexo D. Datos medición radiación simulada

PRUEBA 1							
FECHA		16/12/2014					
PIRÁNOMETRO		KIPP & ZONEN					
CTE CALIBRACIÓN		15,05 [$\mu\text{v}/\text{w}/\text{m}^2$]					
	voltaje	Rad. Directa	Rad. Directa		voltaje	Rad. Directa	Rad. Directa
	$\mu\text{v}(\text{dc})$	[W/m ²]	[Kj/hm ²]		$\mu\text{v}(\text{dc})$	[W/m ²]	[Kj/hm ²]
1	210	13,95	50,23	31	214	14,22	51,19
2	210	13,95	50,23	32	215	14,29	51,43
3	211	14,02	50,47	33	215	14,29	51,43
4	212	14,09	50,71	34	215	14,29	51,43
5	212	14,09	50,71	35	215	14,29	51,43
6	212	14,09	50,71	36	216	14,35	51,67
7	213	14,15	50,95	37	215	14,29	51,43
8	213	14,15	50,95	38	215	14,29	51,43
9	212	14,09	50,71	39	215	14,29	51,43
10	212	14,09	50,71	40	215	14,29	51,43
11	212	14,09	50,71	41	216	14,35	51,67
12	213	14,15	50,95	42	216	14,35	51,67
13	213	14,15	50,95	43	216	14,35	51,67
14	214	14,22	51,19	44	216	14,35	51,67
15	215	14,29	51,43	45	217	14,42	51,91
16	215	14,29	51,43	46	216	14,35	51,67
17	215	14,29	51,43	47	216	14,35	51,67
18	214	14,22	51,19	48	216	14,35	51,67
19	215	14,29	51,43	49	216	14,35	51,67
20	215	14,29	51,43	50	215	14,29	51,43
21	216	14,35	51,67	51	215	14,29	51,43
22	216	14,35	51,67	52	215	14,29	51,43
23	216	14,35	51,67	53	216	14,35	51,67
24	216	14,35	51,67	54	216	14,35	51,67
25	217	14,42	51,91	55	215	14,29	51,43
26	217	14,42	51,91	56	216	14,35	51,67
27	217	14,42	51,91	57	215	14,29	51,43
28	216	14,35	51,67	58	216	14,35	51,67
29	216	14,35	51,67	59	215	14,29	51,43
30	214	14,22	51,19	60	215	14,29	51,43
			PROMEDIO			14,2669	51,3608

PRUEBA 2							
FECHA		16/12/2014					
PIRÁNOMETRO		KIPP & ZONEN					
CTE CALIBRACIÓN		15,05 [$\mu\text{v}/\text{w}/\text{m}^2$]					
	voltaje	Rad. Directa	Rad. Directa		voltaje	Rad. Directa	Rad. Directa
	$\mu\text{v}(\text{dc})$	[W/m^2]	[Kj/hm^2]		$\mu\text{v}(\text{dc})$	[W/m^2]	[Kj/hm^2]
1	246	16,35	58,84	31	239	15,88	57,17
2	245	16,28	58,60	32	239	15,88	57,17
3	245	16,28	58,60	33	239	15,88	57,17
4	244	16,21	58,37	34	239	15,88	57,17
5	244	16,21	58,37	35	239	15,88	57,17
6	244	16,21	58,37	36	239	15,88	57,17
7	242	16,08	57,89	37	239	15,88	57,17
8	242	16,08	57,89	38	239	15,88	57,17
9	242	16,08	57,89	39	239	15,88	57,17
10	242	16,08	57,89	40	239	15,88	57,17
11	241	16,01	57,65	41	238	15,81	56,93
12	241	16,01	57,65	42	238	15,81	56,93
13	241	16,01	57,65	43	238	15,81	56,93
14	240	15,95	57,41	44	237	15,75	56,69
15	240	15,95	57,41	45	237	15,75	56,69
16	240	15,95	57,41	46	239	15,88	57,17
17	239	15,88	57,17	47	238	15,81	56,93
18	238	15,81	56,93	48	238	15,81	56,93
19	239	15,88	57,17	49	239	15,88	57,17
20	238	15,81	56,93	50	238	15,81	56,93
21	239	15,88	57,17	51	239	15,88	57,17
22	239	15,88	57,17	52	238	15,81	56,93
23	239	15,88	57,17	53	238	15,81	56,93
24	239	15,88	57,17	54	238	15,81	56,93
25	239	15,88	57,17	55	239	15,88	57,17
26	239	15,88	57,17	56	239	15,88	57,17
27	240	15,95	57,41	57	238	15,81	56,93
28	241	16,01	57,65	58	238	15,81	56,93
29	241	16,01	57,65	59	238	15,81	56,93
30	240	15,95	57,41	60	238	15,81	56,93
			PROMEDIO			15,92691	57,3369

PRUEBA 3							
FECHA		16/12/2014					
PIRÁNOMETRO		KIPP & ZONEN					
CTE CALIBRACIÓN		15,05 [$\mu\text{v}/\text{w}/\text{m}^2$]					
	voltaje	Rad. Directa	Rad. Directa		voltaje	Rad. Directa	Rad. Directa
	$\mu\text{v}(\text{dc})$	[W/m ²]	[Kj/hm ²]		$\mu\text{v}(\text{dc})$	[W/m ²]	[Kj/hm ²]
1	5383	357,67	1287,63	31	5304	352,43	1268,73
2	5385	357,81	1288,11	32	5311	352,89	1270,41
3	5387	357,94	1288,58	33	5310	352,82	1270,17
4	5372	356,94	1285,00	34	5311	352,89	1270,41
5	5363	356,35	1282,84	35	5305	352,49	1268,97
6	5360	356,15	1282,13	36	5314	353,09	1271,12
7	5356	355,88	1281,17	37	5318	353,36	1272,08
8	5348	355,35	1279,26	38	5318	353,36	1272,08
9	5334	354,42	1275,91	39	5324	353,75	1273,51
10	5335	354,49	1276,15	40	5324	353,75	1273,51
11	5333	354,35	1275,67	41	5322	353,62	1273,04
12	5344	355,08	1278,30	42	5311	352,89	1270,41
13	5345	355,15	1278,54	43	5316	353,22	1271,60
14	5336	354,55	1276,39	44	5316	353,22	1271,60
15	5317	353,29	1271,84	45	5304	352,43	1268,73
16	5332	354,29	1275,43	46	5311	352,89	1270,41
17	5325	353,82	1273,75	47	5305	352,49	1268,97
18	5314	353,09	1271,12	48	5308	352,69	1269,69
19	5321	353,55	1272,80	49	5311	352,89	1270,41
20	5324	353,75	1273,51	50	5311	352,89	1270,41
21	5324	353,75	1273,51	51	5314	353,09	1271,12
22	5312	352,96	1270,64	52	5312	352,96	1270,64
23	5328	354,02	1274,47	53	5314	353,09	1271,12
24	5337	354,62	1276,62	54	5309	352,76	1269,93
25	5325	353,82	1273,75	55	5321	353,55	1272,80
26	5338	354,68	1276,86	56	5314	353,09	1271,12
27	5351	355,55	1279,97	57	5310	352,82	1270,17
28	5318	353,36	1272,08	58	5324	353,75	1273,51
29	5310	352,82	1270,17	59	5319	353,42	1272,32
30	5309	352,76	1269,93	60	5309	352,76	1269,93
			PROMEDIO			353,894	1274,017

Anexo E. Protocolo de eficiencia térmica del colector PSHC-1C, en estado cuasi-estable, sistema de recirculación para condiciones en interior.

Fecha:

Hora:

Lugar:

Participantes:

1. Condiciones ambientales.

1.1 Temperatura ambiental:

Tabla 1. Temperatura ambiental.

INICIO DEL ENSAYO	FINAL DEL ENSAYO	PROMEDIO DEL ENSAYO

FUENTE: Autores.

1.2 Humedad relativa:

Tabla 2. Humedad relativa.

INICIO DEL ENSAYO	FINAL DEL ENSAYO	PROMEDIO DEL ENSAYO

FUENTE. Autores.

1.3 Velocidad del viento (alrededores):

Tabla 3. Velocidad del viento (alrededores).

INICIO DEL ENSAYO	FINAL DEL ENSAYO	PROMEDIO DEL ENSAYO

FUENTE. Autores.

2. Objetivo

Determinar experimentalmente la eficiencia térmica del colector solar PSHC-1C, el cual está ubicado en el laboratorio de Energías Alternativas – 118R en la Fundación Universitaria Los Libertadores (FULL), basado en parámetros establecidos por estándares nacionales e internacionales.

3. Metodología.

3.1 Referencias.

Nacionales:

- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC). NTC 4368: Eficiencia Energética. Sistemas de Calentamiento de Agua con Energía solar y componentes. Bogotá D.C.: ICONTEC, ratificada 17/12/1997.
- -----, NTC 5434-2: Sistemas solares térmicos y componentes. Colectores solares, Parte 2: Métodos de ensayo. Bogotá D.C.: ICONTEC, ratificada 30/08/2006.

Internacionales:

- *A GUIDE TO THE STANDARD UNE - EN 12975: 2006+A1:2011. Reported 28/05/2012.*
- *BUREAU OF INDIAN STANDARDS. IS 13129-1 PART-1 (1991): SOLAR HEATING – Domestic water heating system. Performance rating procedure using indoor test methods. Reaffirmed 2005. Manak Bhavan, 9 Bahadur Shah Zafar Marg: BIS 110002, 1991.*
- -----, *IS/ISO 9488 (1999): SOLAR ENERGY – Vocabulary. Superseding IS 12934 (1990). Manak Bhavan, 9 Bahadur Shah Zafar Marg: BIS 110002, 2010.*
- *Development and Validation of flat-Plate Collector Testing Procedures. Report for November 2006.*
- -----, *Report for February 2007.*
- -----, *Report for March 2007.*
- *LAB – VOLT SYSTEMS, INC. Solar Thermal Energy Training System No. 46121 – Introduction to Solar Thermal Energy, Job sheets – student. Fourth edition. March 2012. ISBN 987-1-60533-451-6.*
- -----, -----, *Solar Thermal Energy Systems, job sheets – student. Fourth edition. March 2012. ISBN 987-1-60533-449-3.*
- -----, -----, *Multi Loop Systems, job sheets – student. Fourth edition. March 2012. ISBN 978-1-60533-453-0.*

Instrumentación:

- BRAND SILBER. Termómetro de vidrio (Columna de mercurio) – 8000 03.
- EXTECH INSTRUMENTS. Manual del usuario. Medidor 3 en 1 modelo 45160 versión 1.4 12/2006
- FLUKE. Manual de uso 287/289 True-rms Digital Multimeter. Junio 2007.
- KIPP & ZONEN. Certificado de calibración Piranómetro CMP 3 de segunda clase (ISO 9060). Países bajos, 12 de Noviembre 2013.

- -----, Hoja de instrucciones Piranómetro CMP 3 de segunda clase (ISO 9060). Países bajos, 12 de Noviembre 2013.
- -----, Manual de usuario Piranómetro CMP 3 versión 1007.
- STIEBEL ELTRON. *Operation and installation – Solar Controller SOM 6 PLUS*.

3.2 Materiales:

- 1 valletilla.
- 1 concentrador de luz (estructura).
- 1 base soporte para el simulador de radiación solar.
- 1 base soporte para el piranómetro.
- 1 base soporte para el ventilador.
- Hilo de 1 m.
- Pliegos de cartulina negra.
- 1 transportador.

3.3 Equipos:

Tabla 4. Sistema de entrenamiento de energía térmica solar (SEETS).

DENOMINACIÓN	NÚMERO DE FÁBRICA	CANTIDAD (UND.)
Estación de trabajo móvil	46500	1
Panel eléctrico	87780	1
Colector solar	87317	1
Moto-Bomba	46508	1
Tanque de almacenamiento (con 2 intercambiadores de calor)	87318	1
Controlador diferencial (TDIC) (con 3 sensores)	87781, 46509	1
Válvula Check (con 2 válvulas purga y llenado)	46507	1
Válvula de venteo automático	46511	1
Caja de potencia (con parada de emergencia)	87782	1
Foco de radiación solar simulada	87038	1
Kit de tubería	46520	1

FUENTE: LAB-VOLT SYSTEMS, INC. *Solar Thermal Energy Training System No. 46121. Introduction to Solar thermal Energy. Job Sheets-Students. Fourth edition. March 2012. 65 p. ISBN 987-1-60533-451-6.*

Tabla 5. Instrumentos de medición utilizados en el SEETS.

CONCEPTO	REFERENCIA	CANTIDAD	CAMPO DE MEDIDA (RANGE)	PRECISIÓN
Termómetro análogo	SEETS	1	0 °C a 121 °C	±2 % de la escala completa
Caudalímetro análogo (Rotámetro)	SEETS	1	2 LPM a 20 LPM	±2 % de la escala completa
Manómetro análogo	SEETS	1	0 PSI a 15 PSI	$\pm \frac{2}{\frac{1}{2}\%}$ del alcance
Sensor de temperatura en la salida del Colector Solar (S1)	SEETS	1	-10 °C a +115 °C	
Sensor de temperatura en el Tanque de almacenamiento térmico (S2)	SEETS	1	-10 °C a +115 °C	
Sensor de temperatura (opcional – S4)	SEETS	1	-10 °C a +115 °C	

FUENTE: LAB-VOLT SYSTEMS, INC. *Solar Thermal Energy Training System No. 46121. Introduction to Solar Thermal Energy. Job Sheets-Students. Fourth edition. March 2012. 65 p. ISBN 987-1-60533-451-6.*

Tabla 6. Instrumentos de medición utilizados para evaluar los alrededores (ambiente).

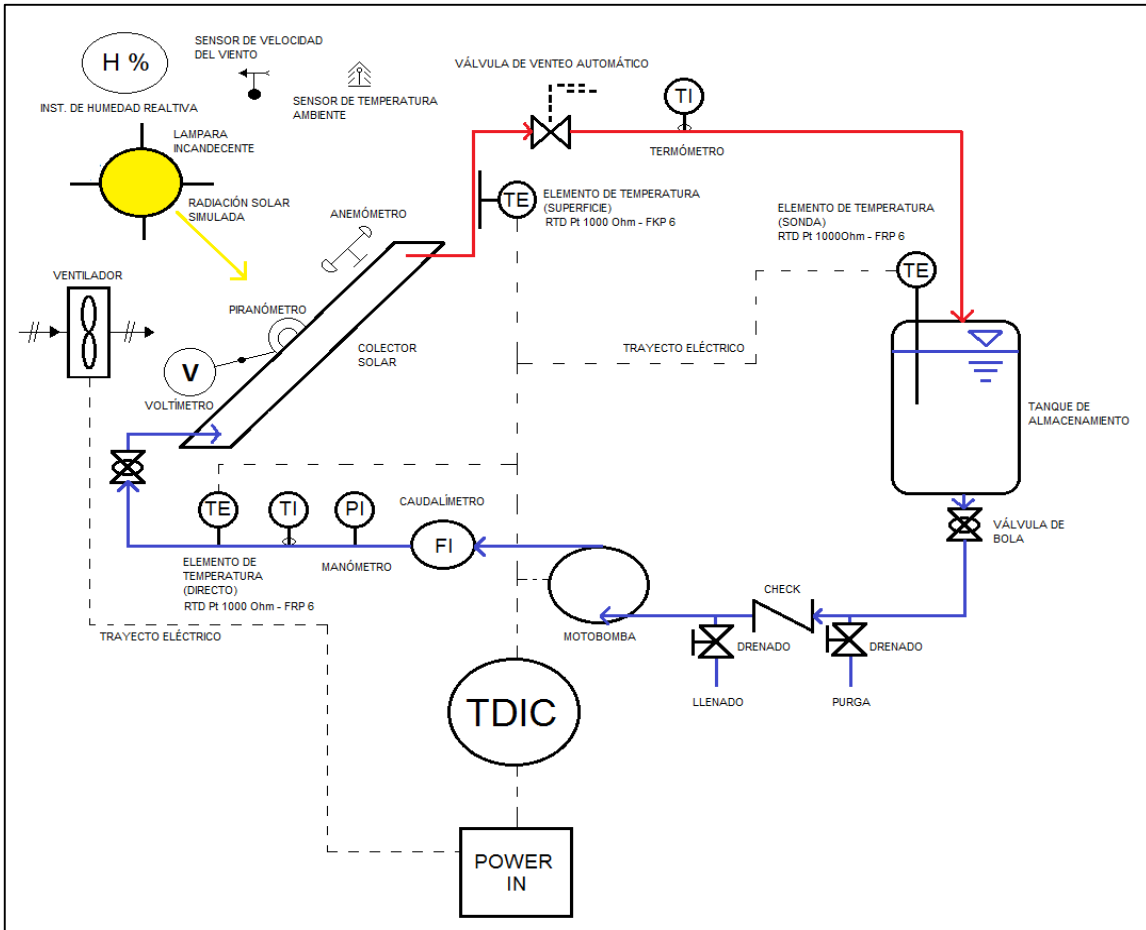
CONCEPTO	REFERENCIA	CANTIDAD	CAMPO DE MEDIDA (RANGE)	PRECISIÓN
Termómetro de vidrio	BRAND – 8000 03	1	-10 °C a +110 °C	±2
Medidor de temperatura	EXTECH INSTRUMENTS – 45160	1	0 °C a 50 °C	±1.2
Medidor de ambiente (humedad)	EXTECH INSTRUMENTS – 45160	1	10 % a 95%	10 % a 70 % RH: ±4 % RH, ≥ 70% RH: ±5,2 % RH
Anemómetro	EXTECH INSTRUMENTS – 45160	1	$0,4 \frac{m}{s}$ a $30 \frac{m}{s}$	$> 3937 \frac{Ft}{min}$: ±4 % de la escala completa
Piranómetro espectral	KIPP & ZONEN – CMP 3	1	300 nm a 2800 nm	±0.3 %
Multímetro digital	FLUKE 287 TRUE rms	1	50 mV a 500 mV	0,025 %
Ventilador	$\varnothing_{Ducto} = 12,5"$ 5 alabes, @ 110 V_{AC}	1	N/A ⁸⁷	N/E
Flexómetro	KOMELON – PEN59E	1	1 cm a 500 cm	N/E

FUENTE. Autores.

3.4 Diagrama del experimento.

⁸⁷ No encontrado.

Figura 1. Sistema activo (flujo forzado) y de recirculación (lazo abierto) para el experimento.



FUENTE. Autores.

4. Procedimiento.

Verifique la calibración, estado y funcionamiento de equipos e instrumentos de medida.

4.1 Pre-acondicionamiento del experimento.

- Se debe procurar ubicar el colector solar donde no existan sombras ni incidan fuentes de radiación térmica significativa, diferentes al foco de radiación solar simulada que se usa durante el ensayo (ya sea por emisión o reflexión)⁸⁸.

⁸⁸ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC). Sistemas Solares Térmicos y Componentes. Colectores Solares. Parte 2: Métodos de ensayo. NTC 5434-2. Bogotá D.C.: ICONTEC, 2006. 21,22 p.

- Con la valletilla, limpie la cubierta del colector solar.
- Inclíne el plano del colector solar a un ángulo de 50° respecto al plano horizontal⁸⁹.
- Encienda el controlador diferencial (TDIC) y ajústelo siguiendo el siguiente procedimiento: diríjase a la función **MAN**, acceda y modifique la función seleccionándola en modo **OFF** (por defecto del dispositivo aparecerá inicialmente en modo **AUTO**), en la pantalla se indicará una advertencia la cual indica que se encuentra en modo **OFF** y el bombillo que, controla la operación del dispositivo, alumbrará de color rojo.
- Exponga el colector solar vacío (sin agua) a irradiación proveniente del foco de radiación solar simulada durante dos horas (proceso de cuasi-equilibrio), para lo anterior, utilice la estructura construida por los autores y el foco de radiación solar simulada, como se puede observar en la Figura 1.

Figura 2. Posición del foco de radiación solar simulada incluido la estructura.



FUENTE: Autores.

Consigne las temperaturas medidas en la tabla 7.

⁸⁹ Ibid., p. 21.

Tabla 7. Pre-acondicionamiento del ensayo.

FECHA		
HORA DE INICIO		
TEMPERATURA AMBIENTAL INICIAL (°C)		
TEMPERATURA AMBIENTAL FINAL (°C)		
HUMEDAD RELATIVA (%)		
$T_{s, inicial}$	TIEMPO	T_s
°C	HORA	°C
	1	
	2	

FUENTE: Autores.

- Transcurridas las dos horas, apague el foco de radiación solar simulada y retírelo de las proximidades del SEETS, junto con la estructura.
- Opere el SEETS, configúrelo como un sistema activo (flujo forzado) y de recirculación (lazo abierto), de acuerdo al Figura 1, que aparece en el numeral 3.4., utilice longitudes cortas de manguera donde sea posible.
- Abra las válvulas del circuito, excepto las válvulas de llenado y purgado que están a los lados de la válvula Check.
- Llene el tanque de almacenamiento con agua de la red, hasta alcanzar 10 galones.
- Ajuste la Moto-Bomba para que opere con la tercera velocidad con un caudal aproximado de $5 \frac{L}{min}$.
- Purgue el sistema utilizando la válvula de venteo automático y la Moto-Bomba junto con el interruptor de palanca del controlador diferencial (TDIC), que permite accionar la Moto-Bomba, la válvula de purga (es opcional).
- El sistema debe adquirir una temperatura uniforme (condición de cuasi-equilibrio). Se considera alcanzada la condición anterior cuando las temperaturas del agua, a la entrada y a la salida del colector solar presentan una diferencia de menos de 2°C durante un periodo de cinco minutos⁹⁰.
- Permita que la Moto-Bomba permanezca encendida.
- Consigne las temperaturas medidas en la tabla 8.

⁹⁰ INTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC). Eficiencia Energética. Sistemas de Calentamiento de Agua con Energía solar y componentes. NTC 4368. Bogotá D.C.: ICONTEC, 1997. P. 11.

Tabla 8. Condición de cuasi-equilibrio.

FECHA							
HORA							
TEMPERATURA AMBIENTAL (°C)							
HUMEDAD RELATIVA (%)							
TIEMPO	T_e	T_s	$T_s - T_e$	TIEMPO	T_e	T_s	$T_s - T_e$
SEGUNDOS	°C	°C	°C	SEGUNDOS	°C	°C	°C
0				810			
30				840			
60				870			
90				900			
120				930			
150				960			
180				990			
210				1020			
240				1050			
270				1080			
300				1110			
330				1140			
360				1170			
390				1200			
420				1230			
450				1260			
480				1290			
510				1320			
540				1350			
570				1380			
600				1410			
630				1440			
660				1470			
690				1500			
720							
750				PROMEDIO			
780							

FUENTE: Autores.

- Una vez finalizada la toma de datos, apague la Moto-Bomba.

4.2 Acondicionamiento del ensayo.

- Ubique el foco de radiación solar simulada a una distancia (horizontal) de 50 cm respecto al plano medio del colector solar y a una distancia (vertical) de 50 cm respecto al plano medio del colector solar (utilice el flexómetro).
- Nuevamente encienda el foco de radiación solar simulada. Su luz debe colindar con el plano de apertura del colector solar en al menos 90% de la energía que este emite, con un ángulo de incidencia $\leq 20^\circ$ respecto al plano medio del colector solar⁹¹. Para garantizar lo anterior, utilice un hilo como haz trazador, desde el foco de radiación solar simulada hasta el plano medio del colector solar, como se puede observar en la ilustración 2.

Figura 3. Ángulo de incidencia para el flujo de radiación solar simulada.



FUENTE: Autores.

- Después de lo anterior, apague el foco de radiación solar simulada.
- Ubique el ventilador en un plano horizontal, enciéndalo y dirija el flujo de aire hacia el colector solar con 30° respecto a la normal del colector solar.⁹²
- Para garantizar lo anterior, utilice un hilo como haz trazador desde el eje del ventilador hasta el plano medio del colector solar, como se puede observar en la ilustración 3.

⁹¹ BUREAU OF INDIAN STANDARDS. IS 13129-1 PART-1 (1991): SOLAR HEATING – Domestic water heating system. Performance rating procedure using indoor test methods. Reaffirmed 2005. Manak Bhavan, 9 Bahadur Shah Zafar Marg: BIS 110002, 1991. 10 p.

⁹² BUREAU OF INDIAN STANDARDS. IS 13129-1 PART-1 (1991): SOLAR HEATING – Domestic water heating system. Performance rating procedure using indoor test methods. Reaffirmed 2005. Manak Bhavan, 9 Bahadur Shah Zafar Marg: BIS 110002, 1991. 11 p.

Figura 4. Ángulo de incidencia para el flujo de aire.



FUENTE: Autores.

- Después de lo anterior, apague el ventilador.
- Durante el experimento, evite la sombras y fuentes de radiación térmica, diferentes al foco de radiación solar simulada (ya sea por emisión o reflexión), ya que esto afecta la medición del piranómetro.
- Ubique el piranómetro a una altura correspondiente a la mitad del colector solar y paralelo a su plano de apertura, con una desviación máxima de 1° (o $\pm 0,5^\circ$)⁹³. La base donde se pone el piranómetro debe tener una superficie oscura para evitar efectos de radiación por albedo, como se puede observar en la Figura 5.

⁹³ A GUIDE TO THE STANDARD UNE - EN 12975: 2006+A1:2011. Reported 28/05/2012. 21 p.

Figura 5. Posición del piranómetro.



FUENTE: Autores.

- Con la valletilla, limpie suavemente la cúpula del piranómetro.
- Conecte el piranómetro al multímetro digital FLUKE 287 TRUE rms, como se puede observar en la figura 6. Encienda y configure el modo de medición del multímetro digital FLUKE 287 TRUE rms, en corriente directa (DC) y seleccione las unidades (milivoltios [mV]).

Figura 6. Conexión entre piranómetro CMP 3 y multímetro digital.



FUENTE. Autores

- La temperatura ambiental debe permanecer entre 15 °C y 30 °C, durante cualquier experimento no debe variar en más de ± 2 °C.⁹⁴
- Ubique el instrumento medidor de temperatura ambiental (protegiéndolo de la irradiación directa), el medidor de velocidad del viento (alrededores), y el medidor de humedad relativa en las cercanías del SEETS, como se puede observar en la Figura 7.

Figura 7. Ubicación de los instrumentos medidores.



FUENTE: Autores.

4.3 Procedimiento del experimento.

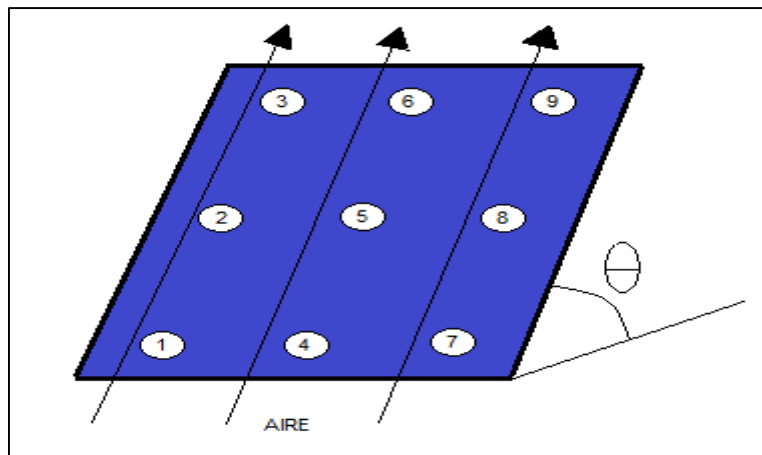
- Encienda el ventilador, mida la velocidad del viento a una distancia entre 10 mm a 50 mm frente de la apertura del colector, y en posiciones equidistantes (borde inferior, mitad, borde superior) sobre el área de apertura del colector⁹⁵, como se puede observar en la figura 8.
- El flujo de aire que genera el ventilador debe estar en un valor aproximado de $[2 \frac{m}{s} \text{ a } 4 \frac{m}{s}]$ ⁹⁶.

⁹⁴ BUREAU OF INDIAN STANDARDS. IS 13129-1 PART-1 (1991): SOLAR HEATING – Domestic water heating system. Performance rating procedure using indoor test methods. Reaffirmed 2005. Manak Bhavan, 9 Bahadur Shah Zafar Marg: BIS 110002, 1991. 11 p.

⁹⁵ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC). Sistemas Solares Térmicos y Componentes. Colectores Solares. Parte 2: Métodos de ensayo. NTC 5434-2. Bogotá D.C.: ICONTEC, 2006. 27 p.

⁹⁶ A guide to the standard UNE – EN 12975: 2006+A1:2011. Reported 28/05/2012.

Figura 8. Posiciones equidistantes para la medición del flujo de aire, $\theta=50^\circ$.



FUENTE: Adaptado de: *Development and Validation of Flat-Plate Collector Testing Procedures. Report for March, 2007*

Consigne los flujos medidos en la tabla 9.

TABLA 9. Velocidad del aire sobre el área de apertura del Colector Solar

FECHA									
HORA									
TEMPERATURA AMBIENTAL INICIAL (°C)									
TEMPERATURA AMBIENTAL FINAL (°C)									
HUMEDAD RELATIVA									
VELOCIDAD									
TIEMPO	P.1	P.2	P.3	P.4	P.5	P.6	P.7	P.8	P.9
INICIO DEL ENSAYO									
FINAL DEL ENSAYO									
PROMEDIO									
PROMEDIO TOTAL									

FUENTE: Adaptado de: *Development and Validation of Flat-Plate Collector Testing Procedures. Report for March, 2007*

- Ajuste la Moto-Bomba para que opere con la primera velocidad con un caudal aproximado de $4 \frac{L}{min}$.

- Haga circular el fluido de transferencia de calor por medio del interruptor de palanca del controlador diferencial (TDIC), que permite accionar la Moto-Bomba.
- Purgue el sistema de nuevo, si es necesario.
- Iguale las temperaturas a la entrada y a la salida del colector solar a un valor ($\leq 0,5^{\circ}\text{C}$).
- Mida las variables según los parámetros establecidos en la tabla 10 y determine el promedio para cada variable medida al terminar el experimento.

Tabla 10. Frecuencia en la toma de medidas

PARÁMETRO	FRECUENCIA
Irradiación solar simulada	60 segundos
Diferencia de temperatura	60 segundos

FUENTE. Adaptado de: INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC). Eficiencia Energética. Sistemas de Calentamiento de Agua con Energía solar y componentes. NTC 4368. Bogotá D.C.: ICONTEC, 1997. 20 p.

- Registre los datos en la tabla 11.

Tabla 11. Registro de datos

FECHA							
HORA							
TEMPERATURA AMBIENTAL INICIAL ($^{\circ}\text{C}$)							
TEMPERATURA AMBIENTAL FINAL ($^{\circ}\text{C}$)							
HUMEDAD RELATIVA (%)							
Sensibilidad del piranómetro ($\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$)							
TIEMPO	T_e	T_s	$T_s - T_e$	T_m	V DC	G_T	T^*
MINUTOS	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	mV	W/m^2	$\frac{^{\circ}\text{C} \times \text{m}^2}{\text{W}}$
1							
2							
3							
.....							

FUENTE. Autores

- Al terminar el experimento, revise las variables medidas y verifique que cumplen los parámetros que aparecen en la tabla 12.

Tabla 12. Parámetros establecidos que se consideran en el estado cuasi-estable.

PARÁMETRO	DESVIACIÓN PERMITIDA
Irradiancia solar (global) de ensayo	$\pm 50 \frac{W}{m^2}$
Temperatura ambiental	$\pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$

FUENTE. Adaptado de: INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC). Sistemas Solares Térmicos y Componentes. Colectores Solares. Parte 2: Métodos de ensayo. NTC 5434-2. Bogotá D.C.: ICONTEC, 2006. 34 p.

- Encienda el foco de radiación solar simulada.
- Proceda a tomar los datos.
- Realice el experimento, al menos para cuatro ocasiones diferentes con aproximadamente los mismos valores de temperatura ambiente promedio (T_{ap}) y temperatura a la entrada del colector (T_e)⁹⁷.

4.4 Predicciones.

En consecuencia a los valores registrados, se espera poder construir la curva de rendimiento térmico del colector PSHC-1C de 1 m² de absorción, en estado cuasi-estable, mediante ajuste estadístico de curvas usando el método de mínimos cuadrados para la forma:

$$\eta = \frac{\int Q_{\text{útil}} \, dt}{A_C \int G_T \, dt}$$

$$Q_{\text{útil}} = \dot{m} C_P (T_s - T_e)$$

Dónde:

- η : Eficiencia térmica instantánea [%]
 $Q_{\text{útil}}$: Energía útil [W]
 A_C : Área de apertura total del colector [m²]
 G_T : Irradiación total [$\frac{W}{m^2}$]

$$\eta = F_R(\tau\alpha)_n - F_R U_L \left(\frac{T_m - T_a}{G_T} \right)$$

$$T^* = \frac{T_m - T_a}{G_T}$$

⁹⁷ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC). Eficiencia Energética. Sistemas de Calentamiento de Agua con Energía solar y componentes. NTC 4368. Bogotá D.C.: ICONTEC, 1997. 11 p.

Donde

- η : Eficiencia térmica instantánea [%]
 F_R : Factor de remoción [%]
 $(\tau\alpha)_n$: Producto transmitancia de la cubierta – absorptancia de la placa, en incidencia normal [%]
 U_L : Coeficiente global de pérdidas térmicas [$\frac{W}{m^2\cdot^\circ C}$]
 T_m : Temperatura media del fluido [$^\circ C$]
 T_a : Temperatura ambiental [$^\circ C$]
 T^* : Temperatura reducida [$\frac{^\circ C m^2}{W}$]

5. Resultados.

5.1 Tablas y gráficas:

Tabla 15. Variables del ensayo

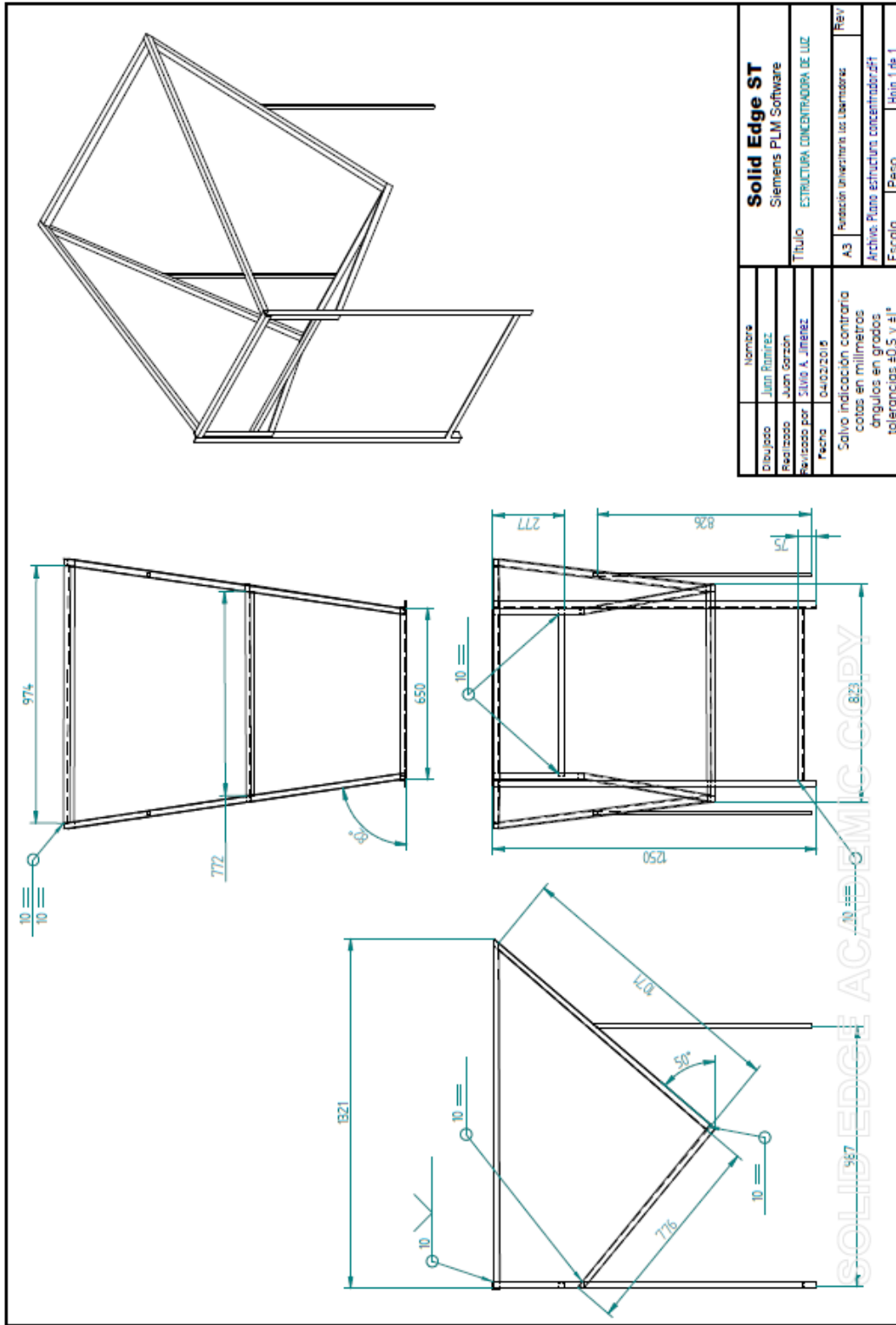
VARIABLES DEL ENSAYO	G_T	U_{s-prod}	T_e	T_s	$T_s - T_e$	T_m	T^* ($T_e - T_a$)	T^* ($T_m - T_a$)	T_a	\dot{Q}
	$\frac{W}{m^2}$	$\frac{m}{s}$	$^\circ C$	$^\circ C$	$^\circ C$	$^\circ C$	$\frac{^\circ C \times m}{W}$		$^\circ C$	$\frac{L}{min}$
PROMEDIO										

FUENTE. Autores

5.2 Resumen de los resultados:

6. Conclusiones.
7. Observaciones.

Anexo F. Plano estructura concentradora de radiación



FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
SEMINARIO DE GRADO FUENTES ALTERNAS DE ENERGÍA

TÍTULO DE LA PRÁCTICA: EFICIENCIA TÉRMICA INSTANTÁNEA DEL COLECTOR SOLAR PSHC-1C

PREINFORME:

- ✓ Consulte los conceptos de equilibrio térmico, energía térmica (sensible y latente), balance de energía, mecanismos de transferencia de calor (conducción, convección, radiación).
- ✓ Consulte los conceptos de radiación térmica y propiedades de radiación (emisividad, absorptividad, reflectividad, transmisividad).
- ✓ Consulte sobre los fundamentos de Energía Solar Térmica (EST).
- ✓ Consulte sobre los tipos y funcionamiento de colectores solares térmicos.

OBJETIVOS

• **GENERAL**

- ✓ Determinar experimentalmente la eficiencia térmica del colector solar PSHC-1C del Sistema de Entrenamiento en Energía Térmica Solar (SEETS), ubicado en el laboratorio de Energías Alternativas – 118R, de la Fundación Universitaria Los Libertadores.

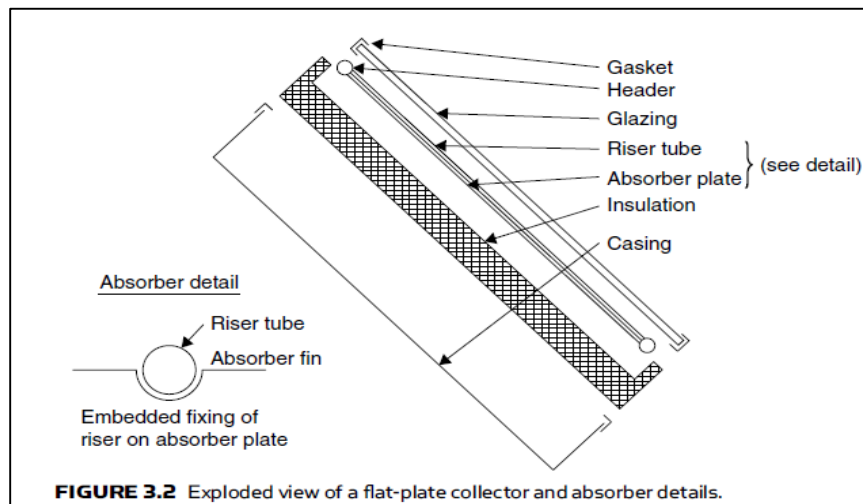
• **ESPECÍFICOS**

- ✓ Conocer y operar el SEETS.
- ✓ Configurar el SEETS para el calentamiento de agua.
- ✓ Medir la temperatura de entrada y a la salida del colector solar, la temperatura ambiental, el flujo másico, (*gross area*) el área total del colector solar, la irradiación que emite el foco de radiación solar simulada.
- ✓ Determinar la eficiencia experimentalmente del colector solar PSHC-1C a diferentes ángulos de inclinación (0°; 70°; 60°; 50°).

MARCO TEÓRICO

- ✓ El proceso de captación de los colectores solares se basa en el **efecto invernadero**. De las diferentes longitudes de onda que componen la radiación solar, son las radiaciones de longitud de onda corta (menores de $3 \mu\text{m}$), las que atraviesan una cubierta e inciden sobre el absorbedor del captador, donde parte es transferida al fluido portador de calor en forma de energía térmica. La cubierta es transparente a la radiación solar pero opaca a la radiación infrarroja: el absorbedor al calentarse emite una radiación de mayor longitud de onda (entre $4,5$ y $7,2 \mu\text{m}$) que no puede escapar por ella y es reflejada al interior otra vez, minimizándose las pérdidas por conducción como por convección. De esta forma se produce una “trampa energética de radiaciones” que impide que la energía radiante que ha atravesado la cubierta vuelva a salir; esta trampa constituye el efecto invernadero.⁹⁸
- ✓ Un colector solar placa plana (ver ilustración 1), básicamente captura y convierte la energía electromagnética del Sol (luz) en energía térmica sensible (calor), mientras que transfiere o intercambia el calor a un fluido (líquido o gas).

Figura 1. Componentes generales de un colector solar placa plana.



FUENTE. *KALOGIROU, Sosteris A. Solar energy engineering processes and system: Solar energy collectors, flat plate collectors. California: Elseiver inc.2009; p.128.*

⁹⁸ SANCHEZ MAZA, Miguel Ángel. Energía Solar Térmica. 1 Edición. México: LIMUSA, S.A., 2010. 23 p. ISBN 978-968-18-7197-0

Específicamente cuando la luz solar alumbra sobre el cristal de vidrio (cubierta), parte de la luz (radiación electromagnética) es reflejada o refractada, pero mucha de la luz (radiación de onda corta) pasa a través del vidrio llegando a un material oscuro (placa absorbadora), este absorbe una gran porción de radiación (energía electromagnética) y convierte esta en energía térmica (calor). El calor es transmitido del material absorbador a los tubos de cobre mediante el mecanismo de conducción, después el calor es conducido al fluido que está al interior de los tubos mediante el mecanismo de convección. El agua y el aire son dos de los fluidos comúnmente más usados en sistemas de energía térmica solar.

- ✓ La eficiencia térmica instantánea de los colectores solares se puede definir como la relación entre la energía útil y la radiación solar total que incide sobre el mismo (Miguel Ángel Sánchez Maza, 2010), y está definida matemáticamente como:

$$\eta = \frac{\int Q_{\text{útil}} \, dt}{A_C \int G_T \, dt}$$

$$Q_{\text{útil}} = \dot{m} C_p (T_s - T_e)$$

Donde:

η :	Eficiencia térmica instantánea [%]
$Q_{\text{útil}}$:	Energía útil [W]
A_C :	Área de apertura total del colector [m^2]
G_T :	Irradiación total [$\frac{W}{m^2}$]

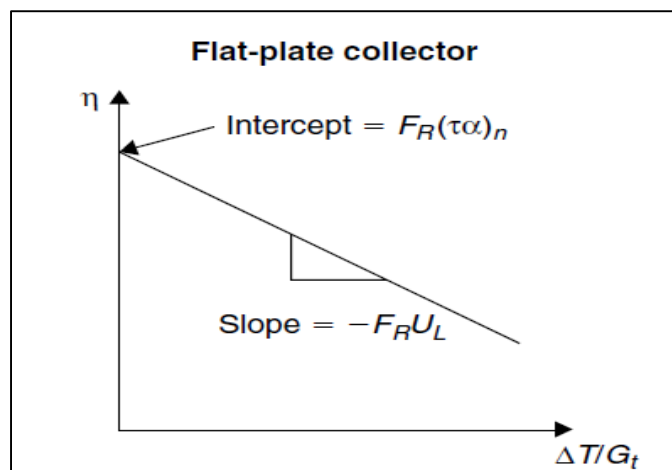
$$\eta = F_R (\tau\alpha)_n - F_R U_L \left(\frac{T_m - T_a}{G_T} \right)$$

Donde

η :	Eficiencia térmica instantánea [%]
F_R :	Factor de remoción [%]
$(\tau\alpha)_n$:	Producto transmitancia de la cubierta – absorptancia de la placa, en incidencia normal [%]
U_L :	Coefficiente global de pérdidas térmicas [$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$]
T_m :	Temperatura media del fluido [$^\circ C$]
T_a :	Temperatura ambiental [$^\circ C$]

De acuerdo al anterior modelo matemático se puede obtener la curva típica de rendimiento térmico experimentalmente, (ver figura 2).

Figura 2. Curva típica de rendimiento térmico de un colector solar placa plana.



FUENTE. KALOGIROU S. *Solar energy engineering processes and system: Solar energy collectors, Collector thermal efficiency*. California: Elseiver inc.2009; p. 224.

MATERIALES, EQUIPOS E INSTRUMENTOS DE MEDIDA

Tabla 1. Materiales, equipos e instrumentos de medida

DENOMINACIÓN	UNIDAD DE MEDIDA	CANTIDAD	CARACTERISTICA
MATERIALES			
Valletilla		1	Tela de algodón
Agua	Galón	10	
EQUIPOS			
SEETS		1	
Piranómetro		1	CMP 3
Foco de radiación solar simulada		1	Luz halógena de 1000 W
Extensión eléctrica		1	5 metros de longitud
INSTRUMENTOS DE MEDIDA			
Termómetro de vidrio	°C	1	Columna de mercurio (Hg)
Cronómetro	s	1	
Flexómetro		1	5 m

FUENTE. Autores

PROCEDIMIENTO

Antes de realizar el procedimiento se deben considerar los siguientes aspectos: Seguridad personal; Seguridad del laboratorio; Seguridad del equipo.

• **SEGURIDAD PERSONAL**

En el siguiente listado aparecen criterios puntuales de seguridad personal, deben llevarse a cabo obligatoriamente cuando se trabaja con el SEETS:

- Protección óptica (gafas de seguridad).
- Protección de manos (guantes de cuero flor vacuno) para manipular los componentes del SEETS, (guantes dieléctricos) para manipular las conexiones eléctricas del SEETS.
- Protección de pies (calzado de seguridad).
- Protección corporal (overol, bata de laboratorio).
- No llevar consigo elementos colgantes (relojes, cadenas, manillas, entre otros)
- Para las personas que tengan el cabello largo es necesario recogerlo.
- Se recomienda enrollar sus mangas para evitar quedar enganchados con algún componente del sistema.

• **SEGURIDAD DEL LABORATORIO**

En el siguiente listado aparecen criterios puntuales para el laboratorio de Energías Alternativas – 118R:

- Visualizar el orden y la limpieza.
- Visualizar las señalizaciones de seguridad.
- Visualizar los elementos de primeros auxilios.

• **SEGURIDAD DEL EQUIPO**

En el siguiente listado aparecen criterios puntuales de seguridad para el SEETS:

- Inspeccione el estado del SEETS.
- Inspeccione los dispositivos del SEETS.
- Consulte los manuales del SEETS.
- Consulte el procedimiento de montaje de los diferentes dispositivos del SEETS.

- Consulte el procedimiento de llenado del SEETS.
- Consulte el procedimiento de conexión eléctrica de los diferentes dispositivos del SEETS.

DESARROLLO:

- Sitúe los dispositivos requeridos para el calentamiento de agua sobre la estación de trabajo móvil (ver figura 3).
- La configuración de los dispositivos da lugar a un sistema de tipo directo (flujo forzado) y de recirculación (lazo abierto), (ver figura 4).
- Enlace los dispositivos con las mangueras de jardín, utilizando longitudes cortas.
- Conecte los sensores del colector solar, el tanque de almacenamiento y el sensor de tubería a los empalmes eléctricos correspondientes del controlador diferencial (TDIC), (ver figura 5).
- Conecte la Moto – Bomba al empalme del controlador diferencial (TDIC), (ver figura 6).

Figura 3. Dispositivos requeridos para el calentamiento de agua

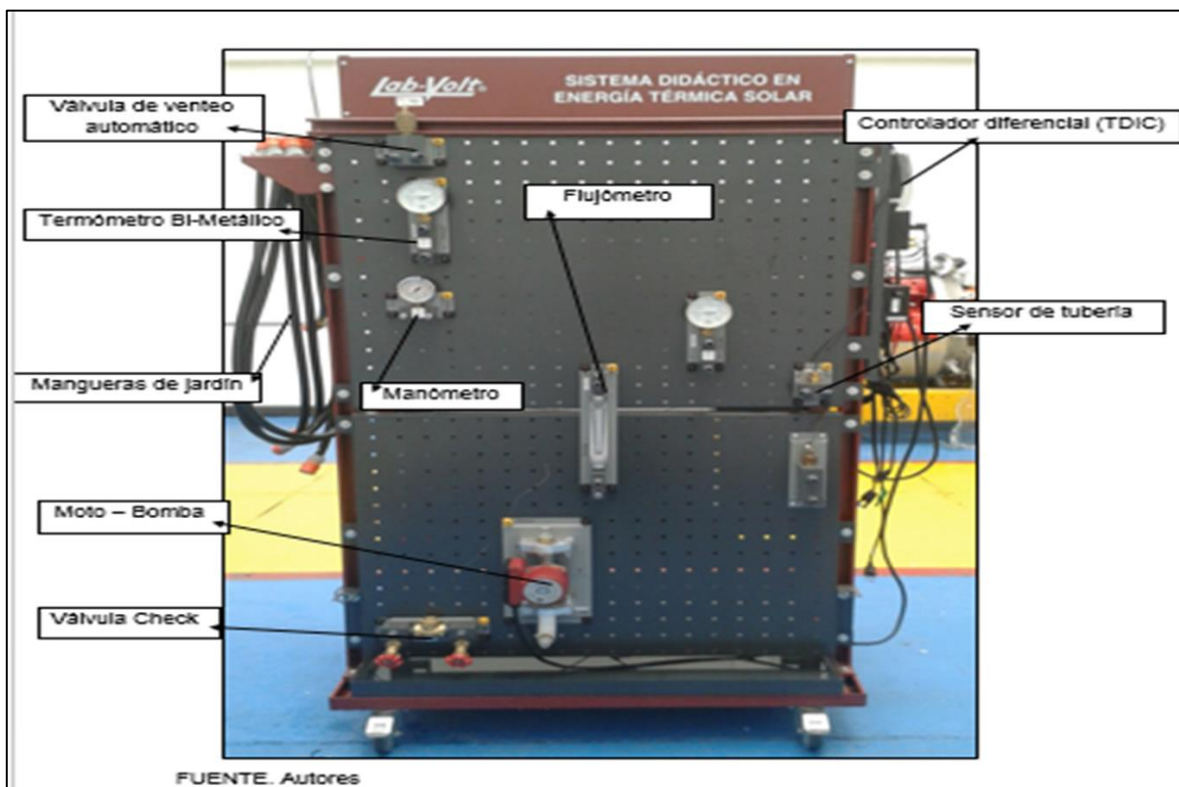
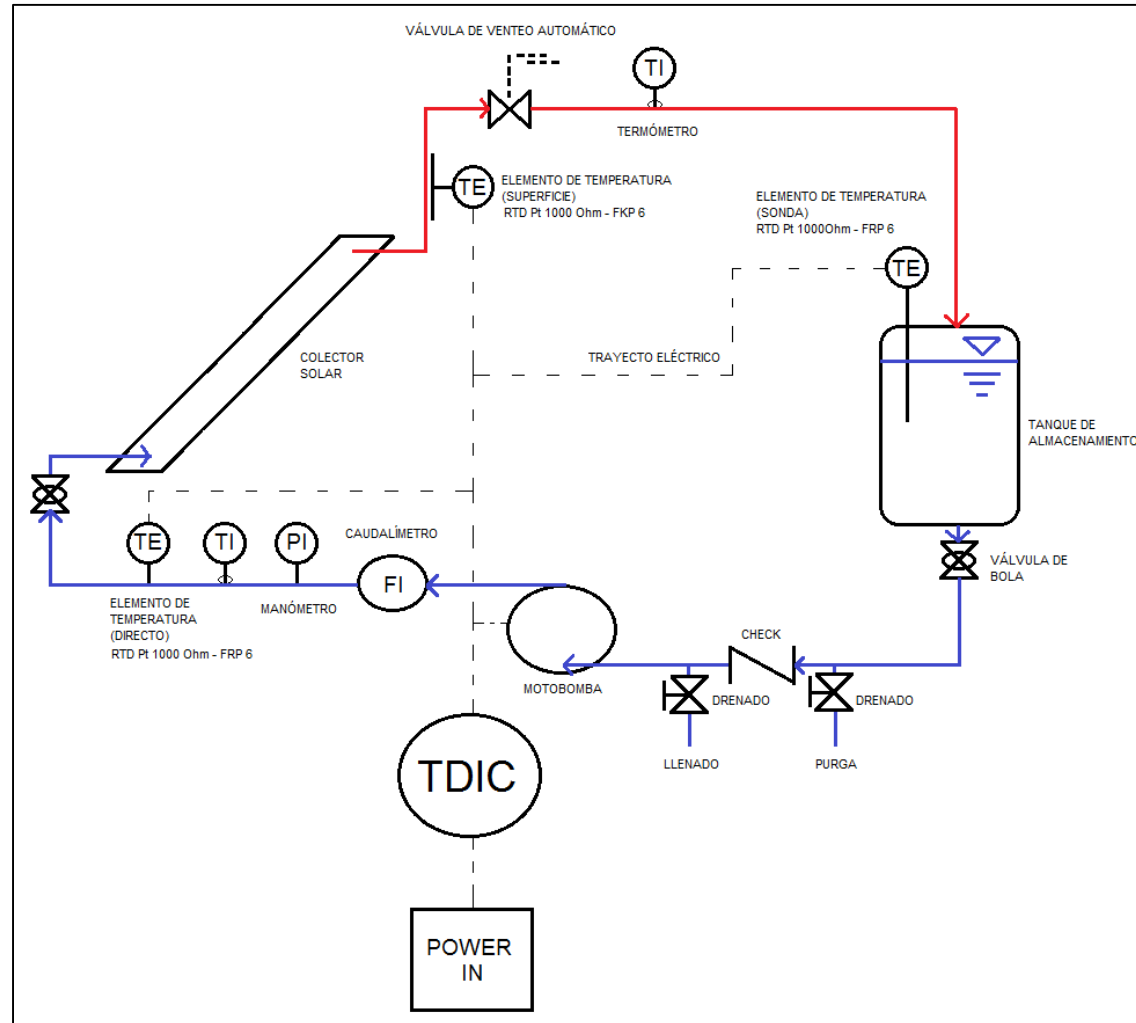


Figura 4. Sistema directo, de recirculación (lazo abierto)



FUENTE. Autores

Figura 5. Conexión eléctrica de sensores



Empalme del sensor
colector solar

FUENTE. Autores

Empalme del sensor tanque
de almacenamiento

Empalme del sensor de
tubería

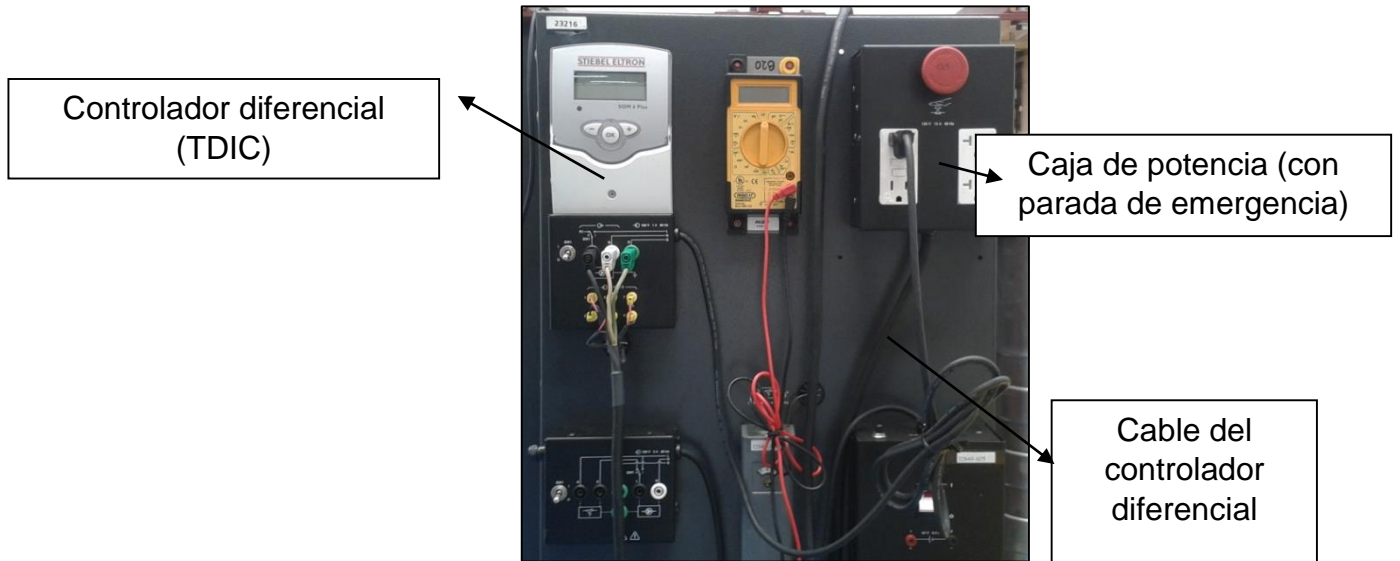
Figura 6. Conexión eléctrica de la Moto – Bomba



FUENTE. Autores

- Conecte el controlador diferencial (TDIC) a la caja de potencia (con parada de emergencia), (ver figura 7).

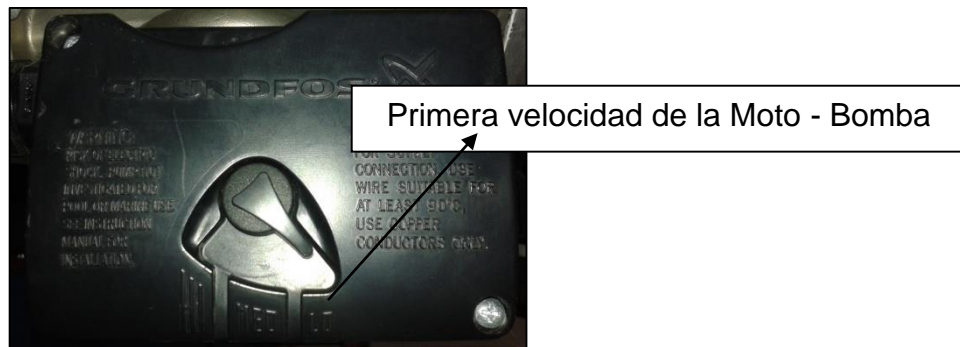
Figura 7. Tablero de control.



FUENTE. Autores

- Llene el tanque de almacenamiento con agua limpia, hasta alcanzar 10 galones.
- Abra las válvulas del circuito.
- Ajuste la Moto-Bomba para que opere con la primera velocidad con un caudal aproximado de $4 \frac{L}{min}$, (ver figura 8).

Figura 8. Primera velocidad de la Moto – Bomba



FUENTE. Autores

- Purgue el sistema utilizando las pautas propuestas por el apéndice D de los manuales del SEETS.
- Oprima la parada de emergencia de la caja de potencia
- Inclíne el colector solar llevándolo y anclándolo en la ranura que se encuentra en el extremo del ángulo, generando un ángulo de 50°.
- Limpie el área de apertura del colector solar con la valletilla, tenga cuidado con la cubierta, es frágil.
- Ubique el foco de radiación solar simulada a una distancia (horizontal) de 50 cm respecto al plano medio del colector solar, la luz que este emite hacia el colector solar, debe colindar con el plano de apertura del colector solar en al menos 90% de la energía que este emite, con un ángulo de incidencia $\leq 20^\circ$ respecto al plano medio del colector solar. Para garantizar lo anterior, utilice un hilo como haz trazador, desde el foco de radiación solar simulada hasta el plano medio del colector solar, (ver figura 9).

Figura 9. Ángulo de incidencia para el flujo de radiación solar simulada



FUENTE. Autores

- Conecte el foco de radiación solar simulada a uno de los empalmes eléctricos de la caja de potencia (con parada de emergencia), si es necesario utilice la extensión eléctrica.

- Para el siguiente procedimiento el estudiante debe conocer las posibles operaciones del controlador diferencial (TDIC):
http://www.stiebel-eltron-usa.com/pdf/install_som6plus.pdf.
- Manipule el controlador diferencial (TDIC).
- Gire la perilla de parada de emergencia, de la caja de potencia (el controlador diferencial (TDIC) se encenderá).
- Diríjase a la función **MAN**, acceda y modifique la función seleccionándola en modo **OFF** (por defecto del dispositivo aparecerá inicialmente en modo **AUTO**), en la pantalla se indicará una advertencia la cual indica que se encuentra en modo **OFF** y el bombillo que, controla la operación del dispositivo, alumbrará de color **rojo**.
- Consigne los datos iniciales del sistema, (ver tabla 2).

Tabla 2. Datos iniciales

FECHA				
HORA				
TEMPERATURA AMBIENTAL (°C)				
TIEMPO	T_e	T_s	$T_s - T_e$	T_m
MINUTOS	°C	°C	°C	°C
0				

FUENTE. Autores

- Encienda los focos del simulador de radiación solar
- Accione el interruptor de palanca del controlador diferencial (TDIC) que permite accionar la Moto-Bomba.
- El sistema está en funcionamiento
- Consigne los datos del sistema en intervalos de cinco minutos durante una hora, (ver tabla 3).

Tabla 3. Temperaturas a la entrada y a la salida del colector solar

FECHA				
HORA				
TEMPERATURA AMBIENTAL (°C)				
TIEMPO	T_e	T_s	$T_s - T_e$	T_m
MINUTOS	°C	°C	°C	°C
0				
5				
10				
15				
20				
25				
30				
35				
40				
45				
50				
55				
60				
PROMEDIO				

FUENTE. Autores

ACTIVIDADES PROPUESTAS

- ✓ Calcule la eficiencia instantánea del colector solar, para un ángulo de 50°.
- ✓ Grafique η VS. T^* ; T^* (en función de T_m).
- ✓ Grafique T_s VS. t .
- ✓ Repita el procedimiento para ángulos de 0°, 60° y 70°, compare el comportamiento térmico del colector solar para estos diferentes ángulos. ¿Cuál es la configuración con mayor rendimiento térmico?
- ✓ Compare sus resultados con la curva determinada por los autores. ¿Existen diferencias entre la curva que obtuvo y la curva de los autores?, ¿A qué se puede deber estas diferencias?
- ✓ ¿Qué sucede sí, se aumenta la distancia del foco de radiación solar simulada?
- ✓ ¿Qué sucede sí, cambia el flujo másico en el sistema?

ESTABLEZCA SUS CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- [1] CENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. Termodinámica. 6 Edición. México: MC GRAW HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V., 2009, ISBN 978-970-10-7286-8.
- [2] CENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. Transferencia de calor y masa “FUNDAMENTOS Y APLICACIONES”. 4 Edición. México: MC GRAW HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V., 2011, ISBN 978-0-07-339812-9.
- [3] KALIGIROU, Sosteris A. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems. 2 Edition*. Oxford: Elsevier, 2014, ISBN-12: 978-0-12-397270-5.
- [4] LAB – VOLT SYSTEMS, INC. *Solar Thermal Energy Training System No. 46121 – Introduction to Solar Thermal Energy, Job sheets – student. Fourth edition. March 2012*. ISBN 987-1-60533-451-6.
- [5] -----, -----, *Solar Thermal Energy Systems, job sheets – student. Fourth edition. March 2012*. ISBN 987-1-60533-449-3.
- [6] -----, -----, *Multi Loop Systems, job sheets – student. Fourth edition. March 2012*. ISBN 978-1-60533-453-0.
- [7] SANCHEZ MAZA, Miguel Ángel. Energía Solar Térmica. 1 Edición. México: LIMUSA, S.A., 2010. ISBN 978-968-18-7197-0.

Anexo H. Artículo del proyecto

DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA TÉRMICA INSTANTÁNEA Y TEMPERATURA DE SALIDA DEL COLECTOR SOLAR PSHC-1C

Juan David Garzón Romero⁹⁹, Juan Carlos Ramírez Sapuy¹⁰⁰, Silvio Alejandro Jiménez Castellanos¹⁰¹.

¹Fundación Universitaria Los Libertadores. jdgarzonr@libertadores.edu.co

²Fundación Universitaria Los Libertadores. jcramirezs@libertadores.edu.co

³Fundación Universitaria Los Libertadores. sajimenezc@libertadores.edu.co

RESUMEN

En este artículo se determinó la eficiencia térmica instantánea y temperatura del agua de salida del colector solar PSHC-1C calculadas por medio de dos procesos simulación y experimentación. La simulación se realizó en el programa TRNSYS, teniendo en cuenta características de los materiales de construcción del colector. Para el experimento se elaboró y aplicó un protocolo basado en aspectos normativos para pruebas en interior, para luego comparar los resultados obtenidos. Los resultados promedio de la simulación y la medición experimental fueron 77,8% - 83,9% y 30,89°C – 30,04°C, para la eficiencia térmica instantánea y la temperatura de salida respectivamente. Con los resultados se realizó la prueba de hipótesis “Kolmogorov – Smirnov”, La cual concluyó que las frecuencias observadas y las teóricas calculadas difieren significativamente por lo tanto las observaciones no tienen una distribución normal, pero la simulación logro predecir el comportamiento experimental.

PALABRAS CLAVE: Colector solar, eficiencia térmica, experimentación, simulación, temperatura de salida.

ABSTRACT

This paper presents the obtained values of the instantaneous thermal efficiency and water outlet temperature for the solar collector PSHC-1C calculated through of two processes simulation and experimentation. The simulation it developed using TRNSYS software, given to collector characteristic of building materials. For experiment was developed and implemented a test under national and international standard for indoor conditions, later to compare the obtained results. The average result for simulation and experimental measurement were 77,8% - 83,9% and 30,89°C – 30,04°C, for the instantaneous thermal efficiency and outlet temperature respectively. With the result was performed “Kolmogorov-Smirnov” hypothesis

⁹⁹ Estudiante de ingeniería mecánica. Semillero de investigación RETP SOLAR.

¹⁰⁰ Estudiante de ingeniería mecánica. Semillero de investigación REPT SOLAR.

¹⁰¹ Magister, Profesor de la Fundación Universitaria Los Libertadores, Director Semillero de investigación RETP SOLAR.

testing, which concluded that the observed frequencies and calculated theoretical differ significantly therefore they don't have a normal distribution.

KEYWORDS: *solar collector, thermal efficiency, experimentation, simulation, outlet temperature.*

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de baja temperatura son los sistemas solares térmicos más adecuados para operar en la ciudad de Bogotá, debido a la poca radiación disponible durante el año, promedio anual de 3,475 [$KW/h m^2$] (Suarez, 2013: p.149), y a que en las aplicaciones, el fluido de trabajo no alcanza temperaturas mayores a 80 °C (Perales, 2008: p.147), entre estos sistemas se destacan los calentadores solares de agua.

Para caracterizar un calentador solar de agua, primero se debe caracterizar el colector, el cual puede ser definido como. (Duffie & Beckman 2006: p.238). “Un tipo especial de intercambiador de calor que transforma la energía radiante del sol en calor, o energía interna del medio de transporte (fluido), que circula por él”.

En los últimos años se han realizado diversas investigaciones que han utilizado simulación y experimentación para analizar el comportamiento térmico de los colectores solares de placa plana; dentro de estos estudios se destacan los trabajos de:

(Hobbi & Siddiqui 2009: p.700-714), quienes modelaron sistemas solares para calentamiento de agua de circulación forzada con colector de placa plana, para determinar los requerimientos de una unidad residencial para una sola familia en Montreal, Canadá. Los autores estudiaron los parámetros de diseño y determinaron sus valores óptimos por medio del programa de simulación TRNSYS. La fracción solar fue utilizada como parámetro de optimización.

(Taherian et al 2011: p.301-307), realizaron la simulación dinámica en MATLAB de un colector de placa plana que forma parte de un calentador solar de agua por termosifón con intercambiador de calor tipo “chaqueta” en el tanque de almacenamiento, ubicado en el norte de Irán. Los resultados de la simulación fueron comparados con datos experimentales. La eficiencia media obtenida fue del 68%. También encontraron que la eficiencia instantánea del colector decrece conforme a la relación entre diferencias de temperatura cuando la radiación incidente se incrementa. Por lo tanto el estudio recomendó que el diseño del termo-tanque debía

ser tal que la temperatura de entrada del fluido al colector debería estar lo más cercana posible a la temperatura ambiente. La simulación logro predecir la eficiencia para días soleados, pero parcialmente para días nublados, más sin embargo, logro predecir la temperatura media del fluido de trabajo. Esto fue atribuido al paso temporal de la simulación y a los datos climatológicos suministrados al programa.

(Chuawittayawuth & Kumar 2002: p.431-448), quienes determinaron experimentalmente la curva de eficiencia de un colector solar de placa plana, realizando un ajuste de mínimos cuadrados. También estimaron los valores de $F_R(\tau\alpha) = 0,78$ y $F_R U_L = 8,02 [W/m^2\text{°C}]$ para hallar la temperatura de salida del colector.

(Rodríguez Hidalgo et al 2011: p. 2394-2404), realizaron una investigación experimental para describir el comportamiento transitorio de un campo de colectores de placa plana de 50 m² bajo condiciones de trabajo exteriores. Para tal fin armaron un modelo transitorio de colector utilizando resistencias y capacitancias térmicas. Ellos calcularon la eficiencia del colector, usando datos de desempeño experimentales y por medio de la aplicación de los modelos. A partir de dicho análisis, se estableció que los dos resultados gráficamente son similares pero con valores más bajos que el simple modelo de la curva de normalización de eficiencia, lo cual mostro que este modelo no es adecuado para calcular exactamente el desempeño del colector.

En Colombia, se destaca el estudio de Plazas et al (2001), quienes diseñaron, construyeron y evaluaron un colector de placa plana variando parámetros como número de tubos, espacio entre tubos, tipo de aislante y espesor del aislante. Se evaluaron cuatro configuraciones distintas y los valores de $F_R U_L$ y de $F_R(\tau\alpha)$, variaron entre 6.45[W/m²K] a 10.94 [W/m²K] y de 0.44 a 0.62, respectivamente. También obtuvieron las curvas de rendimiento instantáneo de estado estacionario bajo las condiciones climáticas de la Universidad Distrital Sede Macarena B. El colector que presento un mejor rendimiento fue el que tenía el mayor número de tubos, menor espacio entre tubos, con aislante de fibra de vidrio.

En este documento se muestran los resultados de experimentos físicos y computacionales realizados para describir el comportamiento térmico del colector PSCHC-1C, perteneciente al sistema solar térmico de entrenamiento ubicado en la Fundación Universitaria Los Libertadores (FULL).

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE AGUA

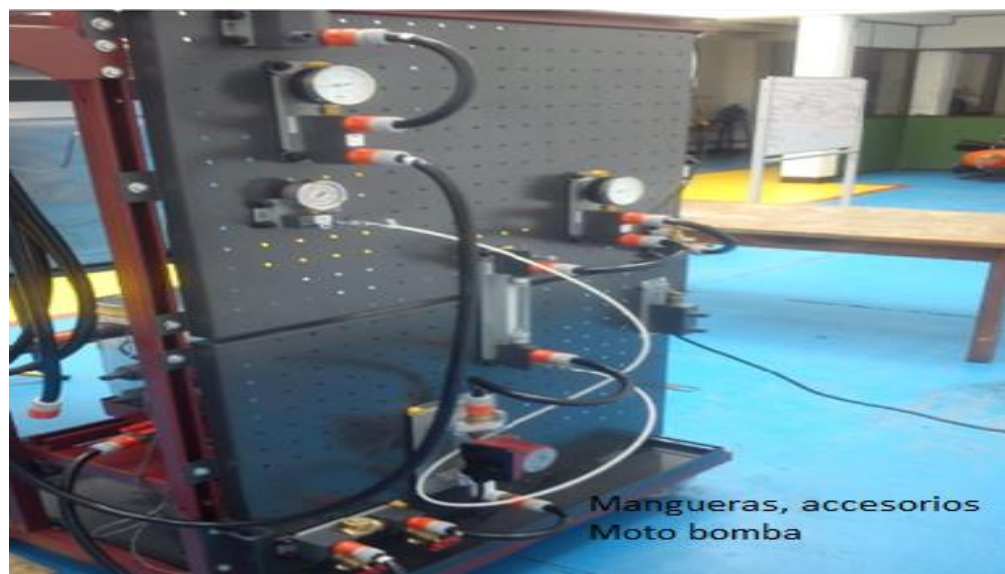
El sistema de entrenamiento en energía térmica solar (SEETS), modelo 46121 de la compañía LAB-VOLT, es un dispositivo didáctico que permite evidenciar los fundamentos de la energía solar térmica. El sistema provee un suministro de agua caliente a pequeña escala para ilustrar como la energía radiante solar puede ser aprovechada y se convierte en energía térmica con el fin de elevar la temperatura del agua, lo compone una estación de trabajo móvil, la cual consiste en un marco robusto de acero soldado, que incluye tres superficies de trabajo perforadas y un panel eléctrico. Los elementos del panel eléctrico son: la caja eléctrica con parada de emergencia 120 VAC, controlador diferencial (TDIC-SOM 6 PLUS). El tanque de almacenamiento, es un recipiente de acero inoxidable térmicamente aislado, utilizado para almacenar la energía térmica de un fluido (agua) en un medio, para su uso posterior, con capacidad de contener 13,5 Gal, incluye un puerto de drenaje con válvula de cierre y un puerto de retorno (fabricado por la compañía COLEMAN). La lámpara o foco de radiación simulada que utiliza dos bulbos de Quartz/halógeno/tungsteno de 500 W cada uno, soportada sobre un trípode ajustable. El Colector Solar PSHC-1C placa plana es un dispositivo que convierte la energía electromagnética del Sol en energía térmica (calor) y transfiere esta energía a un fluido calo-portador, es fabricado por PHNIX (GUANGZHOU) ELECTRIC CO, para las pruebas se inclina a 50° en relación a la horizontal de la estación trabajo móvil. El circuito de mangueras de vinilo especial con acoples rápidos de 3, 6,7 y 12". Moto bomba de referencia (UPS 15-55 SFC) es un dispositivo diseñado para el uso en sistemas de calefacción y sistemas de climatización en edificios comerciales (pequeña escala), esta operado por un motor eléctrico integrado y un impeler ensamblado que permite controlarlo electrónicamente básicamente es una moto bomba centrifuga con rotor encapsulado (o bomba sin cierre), el líquido bombeado se enfría, y de esta forma, lubrica el motor y las piezas giratorias. Accesorios como: termómetros bimetálicos, flujómetro (F400 N), válvula de check, válvula de venteo automático. Los anteriores elementos pueden observarse en las figuras 1,2.

Figura 1. Sistema de entrenamiento en energía solar



Fuente: Autores.

Figura 2. Vista posterior del Sistema de entrenamiento en energía solar superficie de trabajo perforada



Fuente: Autores

Algunos datos del colector solar son descritos en la tabla 1.

Tabla 15. Especificaciones del colector solar PSHC-1C

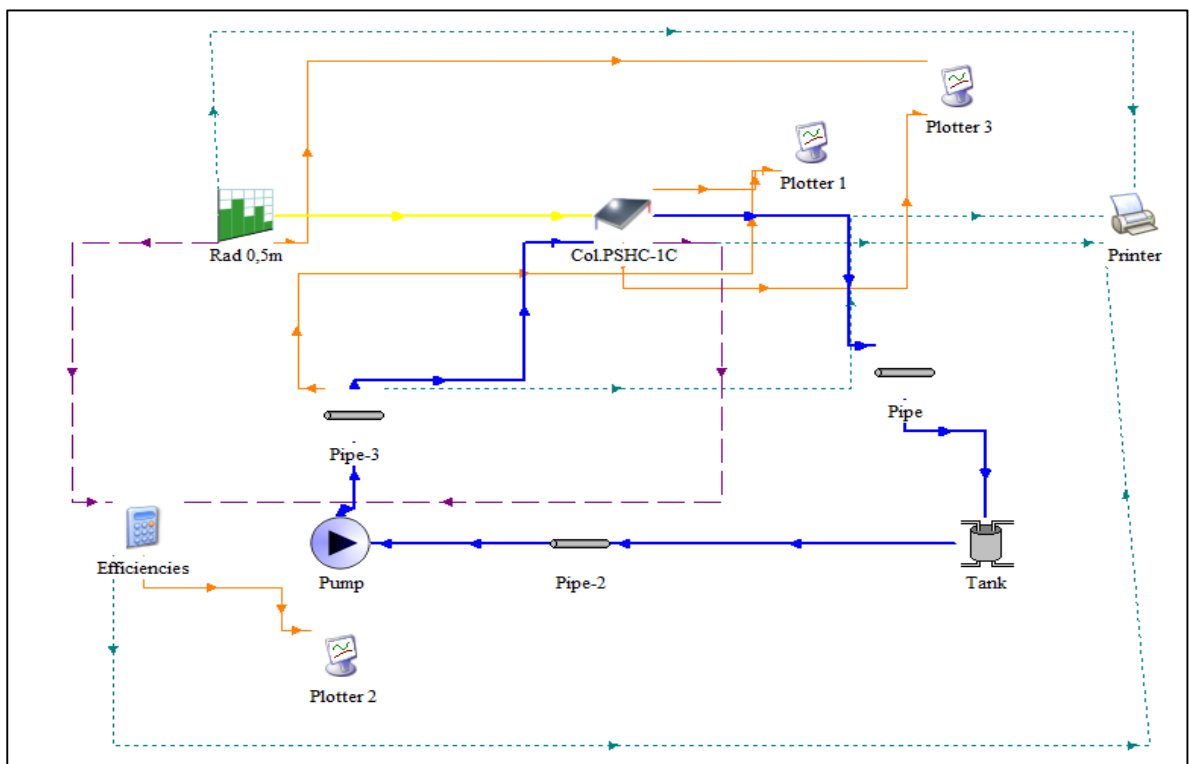
ESPECIFICACIÓN	UNIDAD DE MEDIDA	CARACTERISTICA
Tipo de circulación		Directo / Indirecto
Grado de protección		IP 65
Área Total	m ²	1,13
Área de absorción	m ²	1
Dimensiones (H*W*D)	Mm	1115*1110*105
Carcasa		Aluminio
Peso Neto	Kg	20,5 (en vacío)
Capacidad de contenido	L	0,75
Placa de absorción		Cobre (con 0,2 mm de revestimiento de vacío altamente selectivo – BLUETEC ETA PLUS-CU)
Capacidad calorífica	KJ	3,06
Absorción de la placa (α)	%	95 (+/- 2)
Emisión de la placa (ϵ)	%	5 (+/- 2)
Tubería		Cobre
Tubos de distribución		2
Tubos ascendentes		9
Diámetro exterior de los tubos	Mm	10
Diámetro interno de los tubos	Mm	8
Soldadura entre la placa de absorción y los tubos de cobre		Soldadura de tecnología ultrasónica
Aislante térmico	Mm	50 / resina de poliuretano
Cubierta de vidrio	Mm	3,2 bajo contenido de Hierro
Número de cubiertas		1
Presión máxima	Bar	12
Conexión exterior de la tubería	Pulgada	3/4
Fluido calo-portador		Agua potable / Agua mezclada/ Etilenglicol

Fuente: Autores

3. SIMULACIÓN

Los procesos para estructurar la simulación de sistemas, según (Safwat Nafeyh, 2011 p.576-591) son: a) : a) comprensión del fenómeno físico que ocurre en el dispositivo, b) estructurar el sistema, c) estructurar la simulación, d) conexión de las entradas y salidas de cada unidad de proceso, e) modelado de las ecuaciones para cada unidad de proceso. Para el colector solar PSHC-1C fue desarrollada la simulación utilizando un programa para la simulación de sistemas transitorios TRNSYS. Los componentes que representan el sistema de entrenamiento en energía solar también son vinculados al programa pero simplemente se toma en cuenta las longitudes de los tramos de manguera, la moto-bomba se maneja con la potencia mínima descrita en el manual 58 W. Para el tanque no se encuentra en la librería del programa un modelo que sea el más indicado por lo cual se opta por utilizar el componente más básico que presenta el programa para los tanques. Una vez definido el sistema, se plantea el diagrama de flujo para adaptarlo a TRNSYS con el nombre de cada elemento que hace parte programa, como se observa en la figura 3.

Figura 3. Esquema interfaz del sistema presentado en TRNSYS.



Fuente: Autores

El flujo de radiación medida está representado por la línea de color amarillo y se conecta al colector solar para que pueda leer los resultados de los valores de radiación y los tome como su radiación incidente; Las líneas de color azul representan el ciclo que realiza el agua en su trayecto a través del calentador; Las líneas de color morado representan la variable de la función que se utiliza para hallar la eficiencia del colector; las líneas de color naranja representan los elementos cuyas variables se van a graficar (*PLOTTER ONLINE*); Las líneas punteadas de color verde representan los flujos de información de resultados de la simulación que se exportan a un archivo externo (*PRINTER*).

Los parámetros que describirán el comportamiento del colector PSHC-1C se encuentran definidos en el type 73 (Theoretical Flat Plate Collector). Y son los que se describen en la tabla 2.

Tabla 16. Parámetros hallados para el colector PSHC-1C importados en TRNSYS

VARIABLE	VALOR	UNIDAD
Área del colector	1,13	m ²
Calor específico del fluido	4182	J/Kg K
Factor de eficiencia de aleta del colector	0,991	
Coefficiente de pérdidas inferior y bordes	0,63	w/m ² K
Emisividad de la placa absorbadora	0,05	
Absortividad de la placa absorbadora	0,95	
Número de cubiertas	1	
Índice de refracción de la cubierta	1,52	
Coefficiente de extinción. Producto del espesor	0,003264	

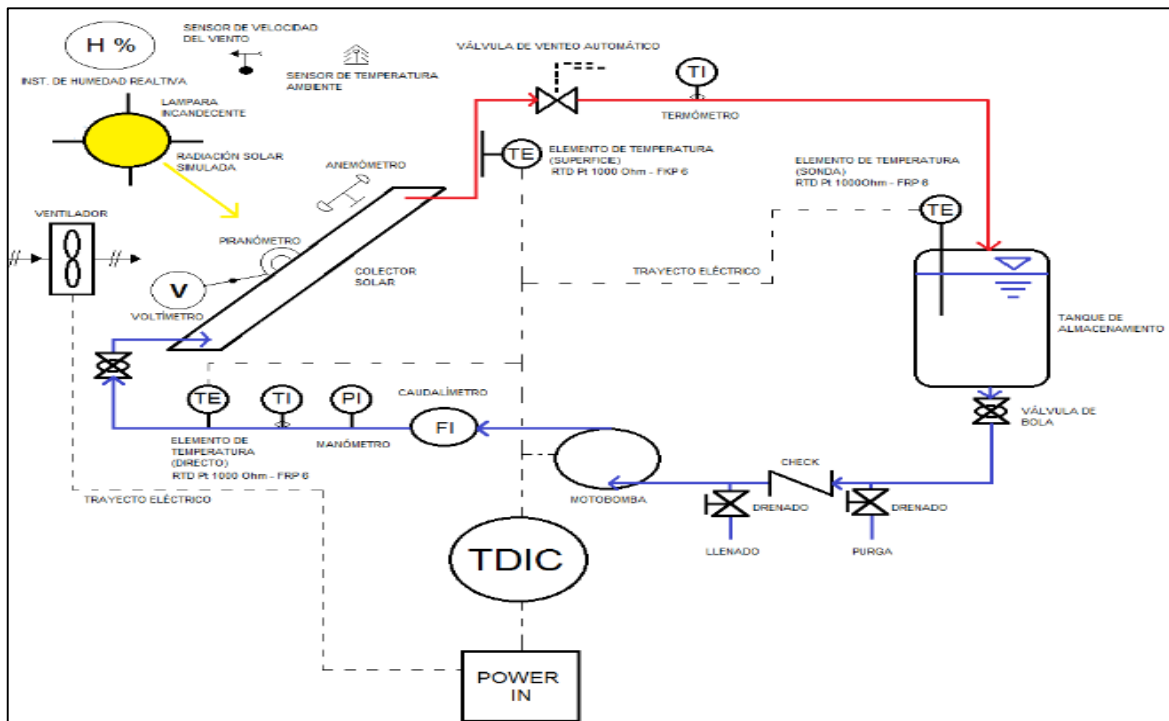
Fuente: Autores, adaptado de TRNSYS.

4. PRUEBAS EXPERIMENTALES

El montaje para determinar el comportamiento térmico del colector de placa plana PSHC-1C, se realizó en el laboratorio de energías alternativas de la Fundación Universitaria Los Libertadores, de acuerdo a las normativas: A GUIDE TO THE STANDARD UNE - EN 12975: 2006+A1:2011. Reported 28/05/2012, BUREAU OF INDIAN STANDARDS. IS 13129-1 PART-1 (1991): SOLAR HEATING – Domestic water heating system. Performance rating procedure using indoor test methods. Reaffirmed 2005. Manak Bhavan, 9 Bahadur Shah Zafar Marg: BIS 110002, 1991. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC). NTC 4368: Eficiencia Energética. Sistemas de Calentamiento de Agua con Energía solar y componentes. Bogotá D.C.: ICONTEC, ratificada 17/12/1997. NTC 5434-2: Sistemas solares térmicos y componentes. Colectores solares, Parte

2: Métodos de ensayo. Bogotá D.C.: ICONTEC, ratificada 30/08/2006. Se elaboró un protocolo para pruebas en interior (indoor test). Las pruebas se realizaron durante los días 04/05/2015; 06/05/2015 y 08/05/2015, comenzando cada prueba a las 14:00 y terminando aproximadamente a las 21:00 horas. El esquema del montaje experimental es el que se observa en la figura 4.

Figura 4. Esquema montaje experimental comportamiento térmico del colector PSHC-1C.



Fuente: Autores.

El procedimiento redactado en el protocolo de prueba, contempló las siguientes actividades: a) limpiar el área de captación al inicio del experimento, b) inclinar el plano del colector solar a un ángulo de 50° , respecto al plano horizontal, c) precondicionar el colector solar, d) lograr que el colector solar alcance la condición de estado cuasi-estable, e) distancia de 0,5 m entre el foco de radiación simulada y el plano de captación del colector solar, f) fijar un flujo de radiación simulada de 354 W/m^2 , g) dirigir el flujo de radiación simulada sobre el área de captación con un ángulo de incidencia $\leq 20^\circ$, h) garantizar que la temperatura ambiente no varíe en más de $\pm 2^\circ \text{C}$, durante el experimento, i) la velocidad del flujo de aire debe estar entre $2 \text{ m/s} - 4 \text{ m/s}$, j) dirigir el flujo de aire sobre el área de captación con un ángulo de incidencia de 30° , k) fijar un flujo másico en el circuito hidráulico de 4 l/min , l) medir la irradiación simulada cada 60 segundos, m) garantizar que la irradiación

simulada no se desvíe en más de $\pm 50 \text{ W/m}^2$, n) medir la diferencia de temperatura es cada 60 segundos y o) medir el flujo de aire me al inicio y al final del experimento.

Las ecuaciones base para la simulación y la experimentación son las descritas por (Duffie & Beckman. 2006 p. 290-300):

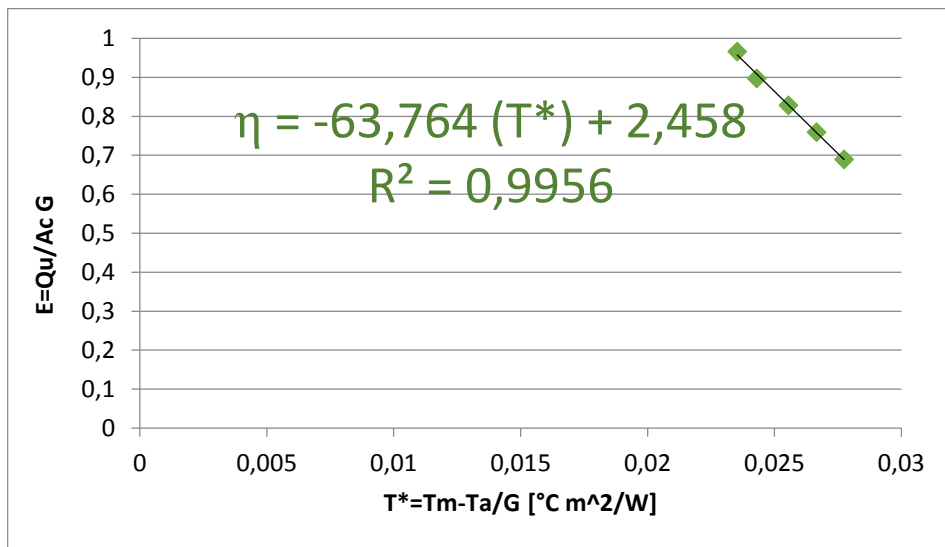
$$\eta = \frac{\int Q_{\text{útil}} dt}{A_C \int G_T dt} \quad (1)$$

$$\eta = F_R(\tau\alpha)_n - F_R U_L \left(\frac{T_m - T_a}{G_T} \right) \quad (2)$$

5. RESULTADOS

En la gráfica 1, se observa el ajuste promediado de los tres experimentos realizados. La función $\eta(T^*) = -63,764(T^*) + 2,458$ representa el resultado de eficiencia instantánea experimental del colector solar PSHC-1C, en condición cuasi-estable.

Gráfica 1. Eficiencia térmica instantánea experimental VS Temperatura reducida

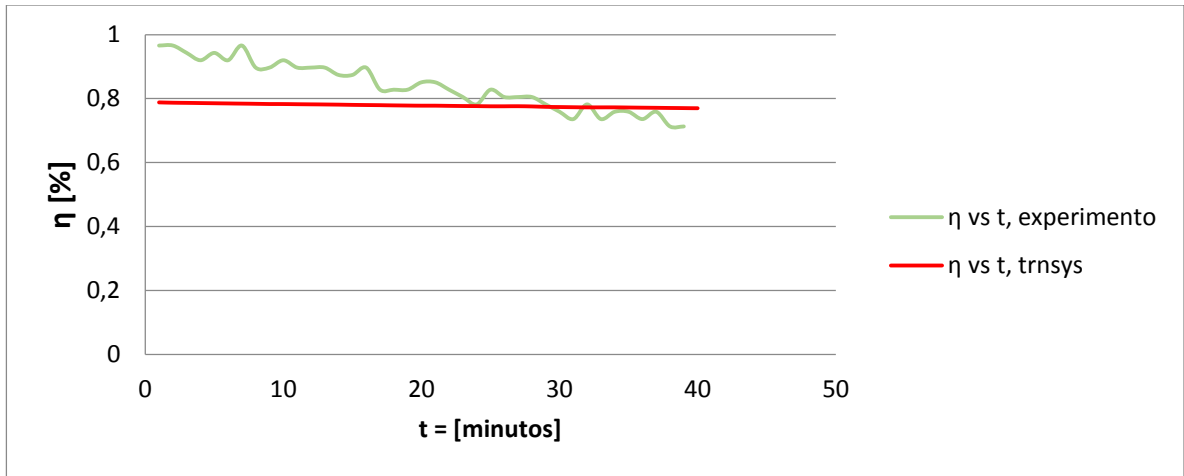


Fuente: Autores

La eficiencia es mayor cuando la temperatura reducida es menor, porque la temperatura media del fluido calo-portador es baja y se encuentra cerca de la temperatura ambiental.

En la gráfica 2. Se presenta la comparación de los resultados de eficiencia térmica, obtenidos por simulación y en forma experimental, en función del tiempo.

Gráfica 2. Comparación de la eficiencia simulada con la eficiencia térmica instantánea experimental.

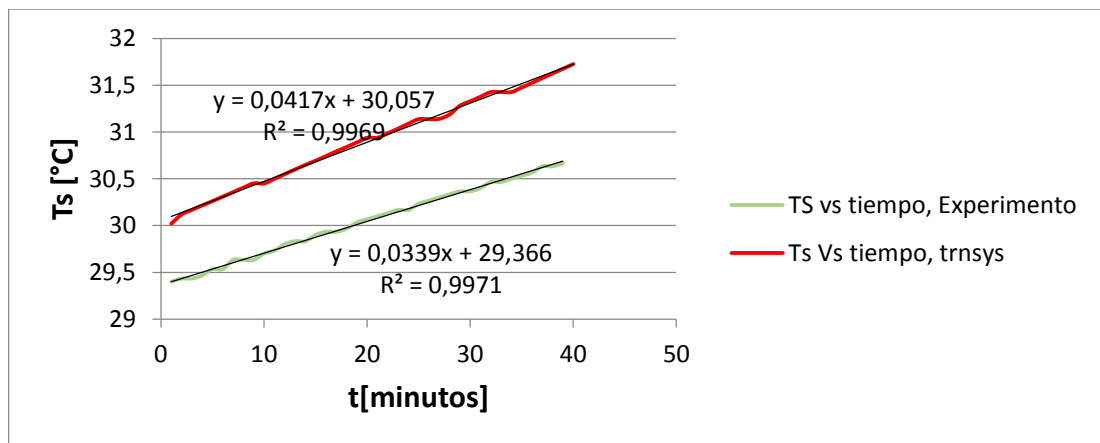


Fuente: Autores

Se observa que los valores de eficiencia térmica instantánea experimental, están en el rango de 0,96 % a 0,71 % y en el rango de 0,7882 % a 0,7703 % para la eficiencia obtenida por simulación. El tiempo de evaluación fue de 39 minutos. También se observa que ambas eficiencias tienden a disminuir conforme aumenta el tiempo, con una disminución más pronunciada para la eficiencia obtenida experimentalmente con respecto a la simulada.

En la gráfica 3. Se presenta la comparación de los resultados de la temperatura de salida, obtenidos por simulación y en forma experimental en función del tiempo.

Gráfica 3. Comparación entre las temperaturas de salida del colector solar simulado y experimental



Fuente: Autores

La gráfica 3 muestra que la temperatura simulada de salida del agua del colector está en el rango de 30,02 °C a 31,67 °C, Para los valores experimentales, esta temperatura está en el rango de 29,4 °C a 30,6 °C para un intervalo de tiempo de 39 minutos. Se observa que ambas temperaturas tienden a aumentar conforme transcurre el tiempo. Sin embargo el incremento de la temperatura de salida en la simulación es mayor que el incremento que la temperatura de salida en el experimento.

6. CONCLUSIONES

Para la simulación y la experimentación los valores obtenidos para F_R y U_L son: 0,984 – 2,87 y 2,96 – 22,21 [$W m^{-2} °C^{-1}$], respectivamente, como consecuencia de lo anterior no es posible realizar la comparación entre el modelo matemático y la curva obtenida experimentalmente ya que el valor experimental para F_R es mayor que 1. Las causas de lo anterior expuesto son: la baja cantidad de radiación simulada emitida al colector, el elevado caudal utilizado en el experimento, la temperatura ambiente no controlada y los intervalos de T^* son muy cortos para caracterizar el sistema.

El comportamiento de las eficiencias, experimental y simulada, tienden a disminuir respecto al tiempo, de acuerdo a la teoría. Esto se debe al calentamiento progresivo del agua en el sistema y a sus pérdidas térmicas. La eficiencia experimental oscila con mayor frecuencia que la simulada, debido a que TRNSYS no considera pérdidas de calor por tubería y accesorios, en la experimentación esta variación se presenta debido a las condiciones del ambiente no controladas.

El comportamiento de las temperaturas de salida, experimental y simulada, tienden a aumentar respecto al tiempo, de acuerdo a la teoría. Esto se debe al calentamiento progresivo del agua en el sistema. La temperatura de salida simulada presenta un mayor aumento debido a que la simulación ejecuta su proceso bajo condiciones teóricas e ideales.

En la comparación estadística (prueba de hipótesis de Kolmogorov Smirnov) realizada entre la simulación y la experimentación, se obtuvo un nivel de significancia observado $< 0,05$, razón por la cual las frecuencias, simulada y experimental, difieren significativamente y no se puede realizar la comparación estadística. Pero en la práctica la simulación si predijo el comportamiento del colector.

7. BIBLIOGRAFÍA

CHUAWITTAYAWUTH, K. K. (2002). Experimental investigation of temperature and flow distribution in a thermosyphon solar water heating system. *Renewable Energy*, 26 (1), 431-448.

DUFFIE John A and BECKMAN William A. Chapter 6: Flat plate collector. In: Solar engineering of thermal process. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2006; p.238.

DUFFIE, John A. & BECKMAN, William A. Solar engineering of thermal process. Chapter 6: Flat plate collector. Collector characterization. 2006, p. 290-300.

HOBBI, A. &. (2009). Optimal desing of a forced circulation solar water heating system for a residential unit in cold climate using TRNSYS. *Solor Energy*, 700-714.

RODRIGUEZ HÍDALGO, M. e. (2011). Flat plate thermal solar collector efficiency: transient behavior under working conditions. Part I: Model description and experimental validation. *Applied Thermal Engineering*, 31 (1), 2394-2404.

SAFWAT, Nafeyh A. H. Simulation of solar heating systems: an overview *Renewable & Sustainable Energy Reviews* (91), p. 576-591.

SUAREZ VAGAS, Diego Alejandro. Evaluación de la radiación solar en Bogotá a partir de imágenes satelitales GOES. Bogotá, 2013; p.149. Trabajo de investigación (magister en ciencias meteorología). Universidad Nacional. Facultad de ciencias.

TAHERIAN, H. e. (2011). Experimental validation of dynamic simulation of the flat plate collector in a closed thermosyphon solar water heater. *Energy Conversion and Managment*, 52 (1), 301-307

