



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y
TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA**

UNIDAD DE GESTIÓN DE POSGRADOS

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

**MAESTRÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES
IV PROMOCIÓN**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE MAGÍSTER EN ENERGÍAS RENOVABLES**

**“MODELADO MATEMÁTICO Y ANÁLISIS DE LAS
PROPIEDADES ÓPTICAS DE UN ABSORBEDOR DE
RADIACIÓN SOLAR DE TUBOS CONCÉNTRICOS”**

**AUTOR:
MAYORGA PAREDES, RICARDO MARCELO**

DIRECTOR: GUASUMBA CODENA, JOSÉ SEGUNDO

SANGOLQUÍ, 2016



VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA

UNIDAD DE GESTIÓN DE POSGRADOS

CERTIFICACIÓN

El suscrito Tutor Ing. José Guasumba Codena, MSc., con cédula de identidad No.1708318751, en calidad de Director de Tesis de la Maestría en Energías Renovables, **certifico** que el presente proyecto de grado que lleva como título, **“MODELADO MATEMÁTICO Y ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES ÓPTICAS DE UN ABSORBEDOR DE RADIACIÓN SOLAR DE TUBOS CONCÉNTRICOS”** realizado por el Ing. Ricardo Marcelo Mayorga Paredes, de nacionalidad ecuatoriana, con cédula de identidad No. 1710440874, como requisito para la obtención del título de Magíster en Energías Renovables, IV Promoción de la ESPE, fue desarrollada bajo mi **dirección y asesoría**. La misma que cumple con los requerimientos científicos, técnicos y académicos, razón por la cual autorizo su presentación y defensa.

Sangolquí, 15 de julio de 2016

ING. JOSÉ GUASUMBA CODENA, MSc.

DIRECTOR



VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA

UNIDAD DE GESTIÓN DE POSGRADOS

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

RICARDO MARCELO MAYORGA PAREDES

DECLARA QUE:

Este proyecto de investigación de posgrado, denominado **“MODELADO MATEMÁTICO Y ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES ÓPTICAS DE UN ABSORBEDOR DE RADIACIÓN SOLAR DE TUBOS CONCÉNTRICOS”**, ha sido elaborado con base a una investigación bibliográfica y técnica, respetando los derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan en las referencias bibliográficas, cuyas fuentes citadas, se incorporan en este documento. Consecuentemente este trabajo de tesis de grado de Magíster en Energías Renovables, es de mi autoría intelectual. En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto en mención.

Sangolquí, 15 de julio de 2016

RICARDO MARCELO MAYORGA PAREDES

C.C 1710440874



VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA

UNIDAD DE GESTIÓN DE POSGRADOS

AUTORIZACIÓN

Yo, RICARDO MARCELO MAYORGA PAREDES, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”, publicar, en la Biblioteca Virtual de la Institución, el presente trabajo de titulación “**MODELADO MATEMÁTICO Y ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES ÓPTICAS DE UN ABSORBEDOR DE RADIACIÓN SOLAR DE TUBOS CONCÉNTRICOS**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, 15 de julio de 2016

RICARDO MARCELO MAYORGA PAREDES

C.C 1710440874

DEDICATORIA

Con la fuerza espiritual que solo Dios la concede, ha sido posible culminar con éxito esta investigación, por lo que todo este esfuerzo va dedicado a Él. A mi esposa Magali quien con su amor y tenacidad ha sido un pilar fuerte en nuestro hogar. A mi hijo Sebitas, una gran bendición para nuestra familia, quien con solo su existencia basta para ver la manifestación de Dios en nuestras vidas. A mi Madre, quien es, ha sido y será una mujer muy valiosa y ejemplo para mi vida.

RICARDO MAYORGA PAREDES

Ambato, julio 15 de 2016

AGRADECIMIENTO

Mi aprecio y gran estima a todos quienes formaron parte de este logro:

A mis padres: Wilmo y Fanny por toda su colaboración, en especial a mi madre por su gran amor.

A mi hermano Santiago y su esposa por su apoyo permanente, a mis sobrinos.

A mis suegros, personas honorables y llenas de sabiduría.

A los docentes de la Maestría, quienes sin ningún reparo me supieron brindar lo mejor de sus conocimientos y experiencias.

Al Director de Proyecto, Ing. Guasumba por el esfuerzo, el profesionalismo y la entrega a su profesión, ejemplo de humildad y visionario de un país grande!

RICARDO MAYORGA PAREDES

Ambato, julio 15 de 2016

ÍNDICE DE CONTENIDO

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
GLOSARIO DE TÉRMINOS	xiii
RESUMEN	xv
CAPITULO 1.....	1
GENERALIDADES	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Definición del problema	2
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 General.....	2
1.3.2 Específicos	3
1.4 Alcance del proyecto.....	3
1.5 Justificación e importancia de la investigación.....	3
CAPÍTULO 2.....	5
MARCO TEÓRICO	5
2.1 Recurso solar.....	5
2.1.1 Ángulos de dirección de la radiación	5
2.1.2 Radiación extraterrestre y en superficie horizontal	7
2.1.3 Método de Page	10
2.1.4 Corrección de la radiación solar para superficies inclinadas	10
2.2 Colectores solares	12
2.2.1 Colector solar plano	13

2.2.2 Tubos al vacío	14
2.2.3 Captadores con tubos de polipropileno.....	16
2.2.4 Tubos flotantes para calentamiento de piscinas	17
2.2.5 Calentadores de PET.....	18
2.3 Transferencia de calor en tubos concéntricos.....	19
2.3.1 Coeficientes de convección y Radiación.....	19
2.3.2 Coeficiente global de transferencia de calor	23
2.3.3 Balance energético de la cubierta y el absorbedor	25
2.3.4 Análisis del absorbedor en sentido longitudinal	27
2.4 Propiedades ópticas de materiales	32
2.4.1 Reflectividad	33
2.4.2 Absortancia.....	34
2.4.3 Transmitancia	34
2.4.4 Emisividad	34
CAPÍTULO 3.....	36
IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA EXPERIMENTAL PARA ENSAYOS	
TÉRMICOS DEL PET.....	36
3.1 Análisis del conjunto tubería y envolvente de PET	36
3.1.1 Componentes del absorbedor.....	36
3.1.2 Geometría de tubos concéntricos	37
3.1.3 Tubos concéntricos en paralelo	39
3.1.4 Esquema del banco de ensayo.....	41
3.2 Implementación del sistema.....	43
3.2.1 Materiales	43
3.2.2 Tuberías del absorbedor	43
3.2.3 Recipiente de acumulación de agua	45
3.2.4 Soportes	45

3.3 Ensamblaje de componentes.....	46
CAPITULO 4.....	48
PRUEBAS OPERACIONALES	48
4.1 Parámetros de pruebas	48
4.1.1 Radiación solar en Ambato.....	48
4.1.2 Variables de medición del colector de PET	57
4.2 Procedimiento de pruebas	58
4.3 Equipo utilizado.....	60
4.4 Levantamiento de datos.....	61
4.5 Determinación de parámetros operacionales.....	62
CAPITULO 5.....	63
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	63
5.1 Datos Obtenidos	63
5.2 Estadísticas.....	66
5.3 Comprobación de parámetros de operación	75
5.3.1 Eficiencia energética	75
5.3.2 Balance de energía.....	79
5.4 Verificación de resultados	80
5.4.1 Procedimiento matemático para estimar la radiación solar.....	80
5.4.2 Estimación de la temperatura de salida del agua del colector	83
CAPITULO 6.....	86
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	86
6.1 Conclusiones	86
6.2 Recomendaciones	87
BIBLIOGRAFÍA	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Valores aproximados seleccionados de la emitancia, ε (valores hemisféricos totales a temperaturas normales).....	35
Tabla 2	Radiación sobre superficie horizontal e inclinada, por el método de Page.....	50
Tabla 3	Datos de radiación solar sobre superficie horizontal, $\phi=-1.24^\circ$; $L=-78.617^\circ$	52
Tabla 4	Datos de radiación solar sobre superficie inclinada, $\phi=-1.24^\circ$; $L=-78.617^\circ$	53
Tabla 5	Promedio de datos de pruebas realizadas	56
Tabla 6	Valores máximos y mínimos de datos de medidos.....	57
Tabla 7	Parámetros funcionales del calentador de agua, con captador de PET y polietileno	62
Tabla 8	Datos de pruebas térmicas del calentador con PET verde, Prueba 1	64
Tabla 9	Datos de pruebas térmicas del calentador solar con PET transparente, prueba 1	65
Tabla 10	Eficiencia Energética del Banco de Ensayos, PET VERDE	76
Tabla 11	Eficiencia Energética del Banco de ensayos, PET TRANSPARENTE	78
Tabla 12	Estimación de la temperatura de salida T_{fo} para el colector con PET verde	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ángulos de orientación de la radiación solar.....	6
Figura 2 Irradiación directa y difusa sobre un plano inclinado. θ Ángulo de dirección de la radiación solar. ϕ ángulo de inclinación del colector.	7
Figura 3 Corte transversal del colector solar plano	14
Figura 4 Tubo de vacío	15
Figura 5 Esquema de componentes del tubo de vacío	15
Figura 6 Calentador de piscinas.....	16
Figura 7 Tubos flotantes para calentamiento de piscinas	17
Figura 8 Calentador de tubos concéntricos con PET/polietileno	18
Figura 9 Balance energético para la cubierta de PET y absorbedor de polietileno.....	19
Figura 10 Flujos de energía en sentido longitudinal y transversal en el absorbedor.....	27
Figura 11 Balance energético de un cuerpo que recibe la energía solar, E.....	33
Figura 12 Geometría del absorbedor de tubos concéntricos	38
Figura 13 Radios interno y externo del absorbedor polietileno/PET	38
Figura 14 Cilindros concéntricos de polietileno y PET	39
Figura 15 Corte longitudinal del absorbedor de polietileno y PET.....	40
Figura 16 Banco de Ensayos de PET, Isometría y vista de planta.....	42
Figura 17 Banco de Ensayos, Vista Lateral	43
Figura 18 Accesorios y tubería del Banco de Ensayos	44
Figura 19 Acoplamiento de tubería interna y externa.....	44
Figura 20 Acumulador de agua caliente con capacidad de 25 litros, manifold de alimentación de agua caliente con dos entradas.	45
Figura 21 Soportes del absorbedor.....	46
Figura 22 Calentador solar con PET verde y transparente	47
Figura 23 Componentes electrónicos: a) Circuito PCB, b) Sistema electrónico de adquisición de datos compuesto por el	

microcontrolador, pantalla LCD, memoria EEPROM serial, reloj, sensores y actuadores.....	47
Figura 24 Sitio de ejecución de las pruebas del calentador de PET	49
Figura 25 Comportamiento de la radiación solar para Ambato	51
Figura 26 Irradiación media diaria mensual para la ciudad de Ambato;.....	54
Figura 27 Irradiancia solar neta para el mes de junio	55
Figura 28 Diagrama de operaciones para levantamiento de datos, utilizando el absorbedor de tubos concéntricos con PET verde y transparente.....	59
Figura 29 Ubicación de sensores de temperatura de T1 a T5 correspondientes al absorbedor con PET color verde, y T6 a T10 para el absorbedor de PET transparente.....	60
Figura 30 Prototipo experimental para pruebas térmicas del calentador de PET	61
Figura 31 Temperaturas de entrada (T1) y salida (T5) del fluido, PET verde ..	66
Figura 32 Perfil de Temperaturas, PET verde.....	67
Figura 33 Temperaturas de entrada (T6) y salida (T10) del fluido, PET transparente.....	68
Figura 34 Perfil de Temperaturas, PET transparente.....	68
Figura 35 Caudal e irradiancia solar, calentador con PET verde. En el ensayo se pudo observar que al aumentar la irradiancia solar, también aumenta el caudal, es decir, existe una relación directa. ...	69
Figura 36 Temperatura de cubierta e irradiancia solar, calentador con PET verde	70
Figura 37 Temperatura superficial del tubo de polietileno.....	70
Figura 38 Temperatura del aire de la región anular	71
Figura 39 Temperatura de salida del agua del colector de PET verde	71
Figura 40 Caudal de la tubería de polietileno, PET transparente.....	72
Figura 41 Temperatura de cubierta de PET transparente.....	73
Figura 42 Temperatura del tubo de polietileno.....	73
Figura 43 Temperatura del aire PET transparente.....	74
Figura 44 Temperatura de salida del agua, en línea PET transparente.....	75

Figura 45 Eficiencia Energética del Calentador PET Verde	77
Figura 46 Eficiencia energética del calentador PET transparente	79
Figura 47 Balance de energía de los colectores de PET, calentados por energía solar	¡Error! Marcador no definido.
Figura 48 Estimación de la temperatura de salida del colector con PET verde	85

GLOSARIO DE TÉRMINOS

α Ángulo azimutal formado por el meridiano sur y la proyección de la Tierra sol medida en el plano horizontal hacia el oeste

φ Ángulo de inclinación del colector

Z Ángulo de cenit formado por la línea sol centro de la Tierra

θ Ángulo de dirección de la radiación

δ Ángulo de declinación

s Inclinación del colector

\emptyset Latitud

γ Ángulo azimutal del sol

h Ángulo horario

r_i Distancia Sol-Tierra para un día determinado

r_0 Distancia media Sol-Tierra

h_m Ángulo horario del punto central del intervalo horario considerado.

h_s Ángulo horario de la salida del sol, en radianes y en valor absoluto.

H_e Radiación extraterrestre

H_o Radiación sobre superficie horizontal

\bar{n} Horas de máxima insolación es decir horas de sol pico (HSP)

N Duración del día, para el caso de Ecuador aproximadamente 12 horas.

K Índice de nubosidad

h_i Coeficiente de convección interno

D_o Diámetro del cilindro externo

D_i Diámetro del cilindro interno

Ra_b Diferencia de temperaturas a través del espacio hueco

k_{eff} Conductividad térmica de un fluido en reposo

- T_m Temperatura media entre el ambiente y la superficie
- ε_1 Emisividad del material PET
- σ Constante de Boltzmann
- k_p Conductividad térmica del polietileno
- h_i Coeficiente de convección del agua
- k_p Conductividad térmica del tubo de polietileno
- F_R Factor de remoción de calor
- E Irradiancia sobre superficie inclinada, (W/m^2)
- $\tau\alpha$ Producto de la transmitancia de cubierta por la absorptancia del polietileno
- k Factor de sombra y suciedad
- U Coeficiente global de transferencia de calor
- α_{pet} Absortancia del PET
- ε_p Emisividad del polietileno en el infrarrojo térmico
- ε_b Emisividad del cielo
- T_p Temperatura del tubo de polietileno
- T_b Temperatura de la bóveda
- h_o Coeficiente de convección del aire estancado
- $\bar{\alpha}_p$ Corresponde a la difusividad térmica del polietileno
- T_∞ Calor que pierde el cilindro de polietileno tereftalato

RESUMEN

Esta investigación consiste en el desarrollo experimental de un dispositivo o banco de ensayos de calentamiento de agua con energía solar compuesto por dos absorbedores en paralelo de tubos de polietileno color negro mate, el uno con envoltente de politen tereftalato o PET color verde y el otro con polietilen tereftalato o PET transparente. La inclinación del captador de tubos concéntricos es de 20°. El sitio de ensayo se encuentra en la ciudad de Ambato, provincia de Tungurahua, a una latitud de -1.24° y longitud -78.61°, con una insolación solar media sobre superficie inclinada de 3.4 horas. Las magnitudes físicas requeridas como la temperatura, humedad relativa, caudal y radiación solar en cada ensayo se tomaron a través de un sistema de medición automatizado. Los parámetros energéticos obtenidos en los ensayos son: para el calentador de PET verde, una eficiencia energética del 58 % y para el calentador de PET transparente se alcanza el 59%. El incremento de temperatura al utilizar la envoltura de color verde es de 16.79°C y al usar el PET transparente 16.42°C en un tiempo de calentamiento de 5 horas 30 minutos. Si se compara el rendimiento energético con el captador solar plano comercial que alcanza el 60%, este nuevo tipo de calentador se encuentra dentro de ese rango, pero con un menor coste de inversión en materiales.

PALABRAS CLAVE:

- **POLIETILENO**
- **PET**
- **INSOLACIÓN**
- **ABSORBEDOR**
- **TUBOS CONCÉNTRICOS**

ABSTRACT

This research consists of the experimental development of a device for heating water with solar energy composite for two absorbers in parallel, one envelope of polyethylene terephthalate green and the other with transparent PET. The tilt sensor of concentric tubes is 20°. The staging site is in Ambato's city, Tungurahua's province, at latitude - 1.24°, length - 78.61°, with a sloping surface of 3.4 average solar insolation hours. The physical magnitudes needed as the temperature, relative humidity, water flow and solar radiation in every test took across a system of measurement automated. Energy parameters obtained in trials are for green PET heater, its energy efficiency of 58% and the heater with transparent PET reaches 59% temperature increase when using color sheath is 16.79°C and in the transparent 16.42°C in a heating time from 5 hours 30 minutes. If you compare the energy efficiency with the flat solar collector which reaches 60%, this new type of heater is within that range, but with a lower cost of investment in materials.

KEYWORDS:

- **POLYETHYLENE**
- **PET**
- **INSOLATION**
- **ABSORBER**
- **PIPE CONCETRIC**

MODELADO MATEMÁTICO Y ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES ÓPTICAS DE UN ABSORBEDOR DE RADIACIÓN SOLAR DE TUBOS CONCÉNTRICOS

De manera tradicional se han desarrollado e implementado sistemas de calentamiento de agua para uso doméstico mediante el uso de la ducha eléctrica, gas propano, leña, siendo estos combustibles deficitarios y contaminantes. Por otra parte, a partir de la década de los 70, después de la crisis energética del año 1972, en varios países, se dio inicio a planes y programas de investigación para el desarrollo de nuevas tecnologías energéticas que utilicen fuentes de energías renovables como la solar. Es por esta razón que empiezan aparecer en el mercado los calentadores de agua con energía solar o colector solar plano (CSP), los cuales han logrado un potencial de impacto en la sociedad, especialmente de los países industrializados. En Latinoamérica y consecuentemente en el Ecuador de manera reciente a partir del año 2000 existe una preocupación por fomentar este tipo de aplicaciones. Sin embargo es importante indicar que los costos de fabricación de los colectores y su montaje en la mayoría de casos no se encuentran al alcance de la población de escasos recursos económicos. Se han realizado esfuerzos en innovación e implementación de sistemas alternativos para calentamiento de agua utilizando materiales locales, reciclados para armar componentes de bajo costo (Tasipanta, 2013), (Calentador de piscinas de Tunas y Cabras, 2014). Los nuevos calentadores se han elaborado con componentes de PET, los cuales no han sido caracterizados adecuadamente. Por lo tanto en la presente investigación se realizan los estudios energéticos y ópticos para determinar la factibilidad de utilizar los cilindros de PET en el desarrollo de calentadores de agua con energía solar.

CAPITULO 1

GENERALIDADES

1.1 Antecedentes

Los sistemas de calentamiento de agua a base de energía solar se han desarrollado desde hace más de 60 años, por lo que su avance ha sido prometedor debido a la amplia investigación que se ha realizado a su alrededor. Sin embargo, en los países Latinoamericanos, existe un problema de baja implementación y masificación de esta tecnología, para la poca aplicación de estos sistemas y la falta de políticas gubernamentales que permitan la comercialización a costos razonables. Por lo tanto, para la obtención de agua caliente sanitaria (ACS), se utiliza el calor de la combustión GLP, gas asociado, diésel. Muy a pesar de que el uso extensivo de los derivados de combustibles fósiles, causan impactos irreversibles en el ambiente, uno de los efectos para el cambio climático, tienen relación directa con las emisiones de gases de efecto invernadero, CO₂, CO, CH₄, C_nH_n, vapor de agua. Por otra parte, el avance en la investigación de tecnologías energéticas alternativas (solar, biomasa, hidráulica, geotérmica, eólica, marina) han permitido su uso y se irán masificando conforme los precios disminuyan, y se mejore su eficiencia energética.

En los últimos años, la innovación y experimentación de nuevos sistemas energéticos, para calentamiento de agua mediante energía solar de baja temperatura, inferior a 100°C, ha permitido encontrar soluciones más económicas para el efecto. Existe el estudio sobre la implementación y el análisis energético de un sistema alternativo para calentamiento de agua, a través de un captador parabólico con tubos en espiral y cubierta envolvente de polietileno tereftalato, comúnmente conocido como PET (Tasipanta et al. 2015). Otra investigación realiza la caracterización

energética de un sistema de calentamiento de agua para una piscina de 125.000 litros, utilizando 6 colectores parabólicos con tubería en espiral y manta de PET (Checa et al. 2015).

Con respecto al uso del de los cilindros de PET para captadores solares se han realizado prototipos y estudios como el calentador solar ecológico automatizado con base en botellas PET (A. F. Luján, A. F. Loaiza, 2013) o la reutilización de materiales plásticos descartados para sistemas de calentamiento de agua sanitaria (V. Miranda, 2011).

1.2 Definición del problema

En el desarrollo de nuevos sistemas de calentamiento de agua con energía solar, se utilizan materiales locales, reciclados (PET) o de origen natural que en la mayoría de casos no se encuentran caracterizados energéticamente. Para el caso del componente más importante como es la cubierta semitransparente de PET, en el estado del arte no se dispone de los datos de transmitancia, absortancia y reflectividad, ni tampoco se cuenta con datos térmicos. Esto conlleva a que los dimensionamientos de instalaciones realizados no dispongan de los parámetros energéticos debidamente validados por lo que en la presente investigación se va a realizar el estudio de los parámetros ópticos y térmicos del intercambiador de calor de tubos concéntricos.

1.3 Objetivos

1.3.1 General

Realizar el modelado matemático y energético de un absorbedor compuesto por tubo de polietileno con cubierta de PET y analizar sus propiedades ópticas.

1.3.2 Específicos

- Analizar el modelo de radiación solar local mediante sus componentes global, difusa y albedo.
- Implementar el calentador solar de tubos concéntricos utilizando materiales locales y realizar la caracterización energética.
- Determinar la eficiencia de conversión energética del calentador solar de tubos concéntricos implementado.

1.4 Alcance del proyecto

El presente trabajo de investigación pretende analizar y determinar un modelo matemático de un calentador solar de tubos concéntricos formado por una estructura de tubo de polietileno de color negro mate y envolvente PET usado como cubierta; se hace el uso de envolvente PET transparente y semitransparente, para lo cual se derivan 2 ramales. El almacenamiento del agua se hizo en un tanque de 20 litros de capacidad. Para la circulación del agua se plantea el uso de un panel fotovoltaico junto con una bomba sumergible. La toma de variables físicas como la temperatura, la humedad, el caudal y la radiación solar fueron tomados a través de un sistema electrónico de adquisición de datos.

1.5 Justificación e importancia de la investigación

Para contribuir con el fortalecimiento de la matriz energética nacional, sustentada en el aprovechamiento eficiente de las energías renovables, se necesitan elaborar bases técnicas sobre aplicaciones energéticas con materiales de producción nacional. Otra actividad importante consiste en la aplicación de nuevas tecnologías energéticas para beneficio de comunidades campesinas así como también de las viviendas que se encuentran en el sector rural, cuyo acceso a estas tecnologías, por su costo, se ven muy alejadas para ellos. Es por estas razones que se pretende

analizar el sistema formado por tubos de polietileno y cubierta de PET, con el fin de obtener datos confiables y así permitirnos un diseño más ajustado de calentadores solares de bajo costo que posibiliten llegar a una gran cantidad de comunidades y grupos humanos.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Recurso solar

El sol se comporta de manera aproximada a un cuerpo negro emisor, que tiene una temperatura superficial efectiva de 5800°K (Wilson, 1982), esto significa que la distribución de la radiación recibida por la Tierra es amplia, pudiendo variar desde $0.1 \mu\text{m}$ hasta $3 \mu\text{m}$. La incidencia total sobre la atmosfera terrestre es de 1367 W/m^2 , llamada constante solar, el 95% es de longitud de onda inferior a $2 \mu\text{m}$. Una gran parte de esta radiación es devuelta por dispersión al espacio, igualmente una gran proporción es absorbida selectivamente por los gases en la atmosfera (CO_2 , CO , CH_4 , O_3 , C_nH_n , vapor de agua). Luego de un simple tránsito vertical a través de la atmosfera solo llega el valor de 1000 W/m^2 , a la superficie terrestre, a esta se le conoce como media mundial de la irradiancia (Duffie, 1991).

2.1.1 Ángulos de dirección de la radiación

La radiación solar es una onda electromagnética que en forma de fotones de luz inciden sobre una superficie. Esta depende del ángulo de incidencia de la radiación directa sobre una superficie cualquiera y situada en un punto de la superficie terrestre (Jutglar, 2004).

La posición de una superficie inclinada se identifica mediante dos ángulos, azimut e inclinación

Azimut (α). Define la orientación de la superficie y es el ángulo comprendido entre la proyección de la normal sobre el plano horizontal y la dirección sur. Para una superficie orientada hacia el Sur, su azimut será cero, el valor del ángulo se considera negativo hacia el Este y positivo hacia el Oeste.

Inclinación ($s=\beta$). Es el ángulo formado por la superficie considerada y el plano horizontal.

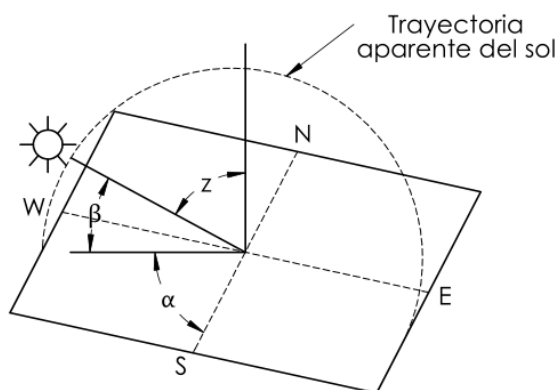


Figura 1 Ángulos de orientación de la radiación solar

En la figura 1, β es el ángulo formado por la línea del sol al centro de la Tierra y la tangente a la superficie terrestre, a este ángulo se le conoce también como altura solar, α es el ángulo azimutal formado por el meridiano sur y la proyección de la Tierra sol medida en el plano horizontal hacia el oeste, Z ángulo de cenit formado por la línea sol centro de la Tierra y la normal a la superficie terrestre. En la Figura 2 en cambio se observa el ángulo de dirección de la radiación solar θ , formado por la normal al plano inclinado (colector solar) y el haz de radiación solar directa. Además, la radiación que llega de la bóveda celeste es difusa, es decir no tiene un ángulo definido.

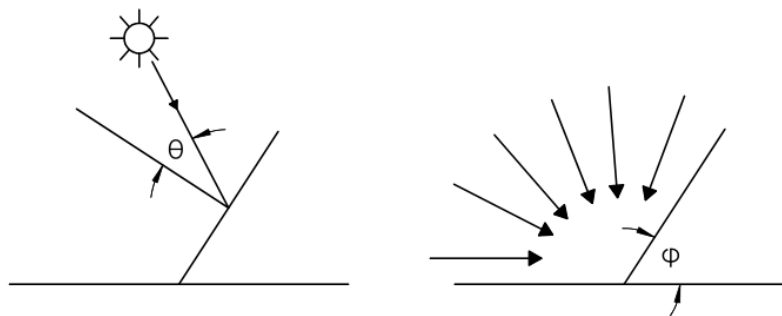


Figura 2 Irradiación directa y difusa sobre un plano inclinado. θ Ángulo de dirección de la radiación solar. ϕ ángulo de inclinación del colector.

De acuerdo con la figura 2, θ es el ángulo de incidencia de la radiación sobre superficie inclinada, ϕ corresponde al ángulo de inclinación de la superficie con respecto al plano horizontal (Wilson, 1982).

$$\cos\theta = \sin\delta \sin\phi \cos s - \sin\delta \cos\phi \sin s \cos\gamma + \cos\delta \cos\phi \cos s \cos h +$$

$$\cos\delta \sin\phi \sin s \cos\gamma \cos h + \cos\delta \sin s \sin\gamma \sin h$$

(1)

Dónde:

θ Ángulo de dirección de la radiación, δ ángulo de declinación, s inclinación del colector, ϕ latitud, γ ángulo azimutal del sol, h ángulo horario.

2.1.2 Radiación extraterrestre y en superficie horizontal

La energía radiante por unidad de tiempo que incide sobre una superficie unidad en un momento dado se conoce como Irradiancia.

La Irradiancia recibida por una superficie situada a la distancia media Sol-Tierra y fuera de la atmósfera se conoce como constante solar (I_{sc}). Su valor se ha determinado a partir de datos experimentales, obtenidos de

satélites artificiales (Jutglar, 2004), y se acepta que el promedio de irradiancia es:

$$I_{sc} = 1353 \text{ W/m}^2 = 4,871 \text{ MJ}/(\text{m}^2\text{h}) = 1,94 \text{ cal}/(\text{cm}^2\text{min}) \text{ (Duffie, 1991)}$$

La Tierra describe una trayectoria elíptica alrededor del Sol; en consecuencia, la radiación solar extraterrestre variará siguiendo la ley de los cuadrados de la distancia, puesto que se trata de un foco emisor que puede considerarse puntual

$$I = I_{sc} \left(\frac{r_i}{r_0} \right)^2$$

$$I = I_{sc} r^2$$

Donde r_i es la distancia Sol-Tierra para un día determinado,

r_0 es la distancia media Sol-Tierra y

$$r^2 =$$

$$1 + 0,033 \cos\left(\frac{360}{365}z\right) \quad \text{factor de corrección}$$

Considerando el espectro de radiación solar, prácticamente de toda la energía recibida, un 97,8% está comprendida entre las longitudes de onda de 0,2 y 3,0 μm ., siendo la longitud de onda máxima de 0,5 μm (Wilson, 1982)

Su distribución espectral es aproximadamente la siguiente: radiación ultravioleta, 9%; región de la luz visible, 40% e infrarrojo, 51%.

Cuando la radiación solar atraviesa la atmósfera, una fracción considerable es absorbida por las moléculas y partículas de la misma, de tal manera, que la radiación que llega a nivel de mar es francamente menor que la extraterrestre. Cada molécula tiene un espectro de absorción característico y la cantidad de radiación encuentra a su paso. Si las bandas

de absorción se sitúan dentro del campo de la radiación térmica, este comportamiento origina el llamado efecto invernadero. Precisamente en este sentido intervienen en gran medida el vapor de agua y el anhídrido carbónico, tanto por la posición de sus bandas de absorción como por su abundancia en la atmósfera.

La Irradiancia extraterrestre, calculada como se indica más arriba, solo es válida para una superficie normal a la radiación; en cualquier otra posición deberá tenerse en cuenta el ángulo de incidencia. Para una superficie horizontal situada fuera de la atmósfera, la Irradiancia horizontal extraterrestre es:

$$I_e = I_{sc} r^2 \cos \Psi \quad [2]$$

La radiación que incide sobre una superficie unitaria a lo largo de un intervalo de tiempo determinado, que se conoce como irradiación, viene dada por la integral:

$$H = \int_t^{t+\Delta t} I dt$$

La irradiación horaria es la radiación recibida durante una hora por unidad de superficie, que para una superficie horizontal extraterrestre, una vez efectuadas las operaciones pertinentes, viene dada por (Jutglar, 2004):

$$H_{h,e} = r^2 I_{sc} (\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos h_m)$$

Donde h_m es el ángulo horario del punto central del intervalo horario considerado.

De forma análoga, extendiendo el campo de integración entre la salida y la puesta del Sol, se calcula la irradiación diaria extraterrestre sobre una superficie horizontal.

$$H_e = \frac{24 r^2}{\pi} I_{sc} (h_s \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \sin h_s) \quad (2)$$

Donde h_s es el ángulo horario de la salida del sol, en radianes y en valor absoluto.

Es interesante indicar que estos valores pueden calcularse para un punto cualquiera, conociendo su posición geográfica, el día y la hora.

2.1.3 Método de Page

Para calcular la radiación sobre superficie horizontal se utiliza la expresión de Page (Jutglar, 2004) definida por:

$$H_o = H_e \left[a + b \frac{\bar{n}}{N} \right] \quad (3)$$

En la ecuación anterior H_e es la radiación extraterrestre, H_o radiación sobre superficie horizontal, el factor climático $a = 0.25$, $b = 0.45$, para la Sierra, \bar{n} corresponde a las horas de máxima insolación es decir horas de sol pico (HSP), N duración del día, para el caso de Ecuador aproximadamente 12 horas.

2.1.4 Corrección de la radiación solar para superficies inclinadas

En la mayoría de los casos, para calcular instalaciones solares basta conocer la irradiación diaria para el día tipo del mes considerado, la directa y difusa sobre una superficie inclinada. Muy raramente interesa conocer la irradiación horaria.

Por otro lado, tenemos que los observatorios meteorológicos solo suelen suministrar datos experimentales de la irradiación diaria global y directa o global y difusa, raramente desglosada en horas, pero medida sobre una superficie horizontal.

Si no se disponen de datos experimentales fiables y se desea conocer la irradiación sobre una superficie inclinada y orientada al sur, se procede así:

Cálculo del ángulo horario de puesta para una superficie horizontal

$$\cos h_s = -tg\phi \, tg\delta$$

Cálculo de la irradiación solar extraterrestre diaria sobre una superficie horizontal

$$H_e = \frac{24 r^2}{\pi} I_{sc} (h_s \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \sin h_s)$$

Cálculo del factor de insolación

$$\sigma = \frac{n}{N}$$

Cálculo de la irradiación global, a nivel del suelo, para una superficie horizontal

$$H_o = H_e (a + b \sigma)$$

Cálculo del ángulo horario de puesta para la superficie inclinada orientada al sur

$$h_{s,s,0} = \min\{\text{arc cos}[-tg(\phi - s) \, tg\delta], h_s\}$$

Cálculo de la relación entre la irradiación, en media diaria mensual, difusa y directa frente al índice de nubosidad (Jutglar, 2004):

$$\frac{H_d}{H_o} = 1,39 - 4,027K + 5,531K^2 - 3,108K^3 \quad (4)$$

Donde $K = a + b\sigma$ es el índice de nubosidad, H_d radiación difusa del cielo y H_o radiación sobre superficie horizontal

Cálculo de factor R_b para pasar la radiación directa de la horizontal a la inclinada (Jutglar, 2004):

$$R_b = \frac{\cos(\varphi-s) \cos \delta \sin h_{s,s,o} + h_{s,s,o} \sin(\varphi-s) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \sin h_s + h_s \sin \varphi \sin \delta} \quad (5)$$

Cálculo de la radiación total

$$H_{t,s,\gamma=0} = H_b R_b + \frac{1+\cos s}{2} H_d + \rho \frac{1-\cos s}{2} H_o \quad (6)$$

Siendo $H_b = H_o - H_d$.

2.2 Colectores solares

La tecnología de captadores planos es muy diversa, existen los de placa plana conocido como Colector Solar Plano (CSP), de tubos al vacío con variedad de diseños, de polipropileno con cubierta de policarbonato para agua caliente sanitaria (ACS), y sin cubierta para calentamiento de piscinas, el de tubos flotantes de material semitransparente para calentar piscinas y los calentadores de PET, desarrollados de manera artesanal en varios países.

2.2.1 Colector solar plano

El colector solar plano es el dispositivo que convierte la energía solar en energía térmica, debido al efecto invernadero que se forma entre la placa absorbadora y la cubierta de vidrio o policarbonato (Fernandez, 2010); estos calentadores son los de mayor presencia en el mercado mundial, entre sus componentes se indican los siguientes:

- Cubierta semitransparente de vidrio o policarbonato
- Placa absorbadora que puede ser de cobre, aluminio, acero al carbono con recubrimientos antirreflejo
- La tubería está fabricada en cobre y puede utilizarse tubos de diámetros de $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{5}{8}$ de pulgada, las tuberías pueden soldarse a la placa absorbadora mediante ultrasonido, o en su defecto, para aumentar el área de transferencia se utiliza canales, previamente conformados en la chapa metálica
- Aislante térmico que puede ser lana de vidrio o espuma de poliuretano, colocados en los laterales y la base del colector
- En la parte exterior del captador se coloca chapa de acero galvanizado de 0,7mm de espesor. En la Figura 3, la radiación solar E que incide en la cubierta, es reflejada por esta en una proporción ρ_c y se transmite una cantidad τ_c , por lo que al absorbedor solo llega $\tau_c \alpha_a E$. La placa se calienta y comienza a emitir radiación en el infrarrojo térmico.

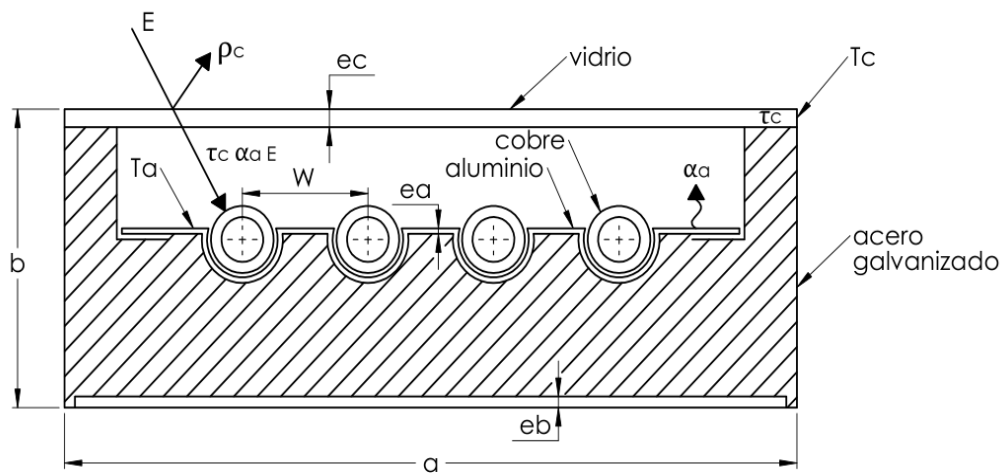


Figura 3 Corte transversal del colector solar plano

2.2.2 Tubos al vacío

Los tubos al vacío se caracterizan por disponer de una ampolla de vidrio, que aísla el interior del captador del ambiente en los tubos de vacío se distinguen cuatro tipologías: Heat pipe, Flujo directo, Sydney, Schott de Alemania. En las Figuras 4 y 5 se encuentra un esquema del tubo de vacío con el cual se puede incrementar la eficiencia energética debido a la presencia de una región anular en forma de tubos concéntricos, donde se realiza el vacío evitando las pérdidas por convección y radiación hacia el ambiente.

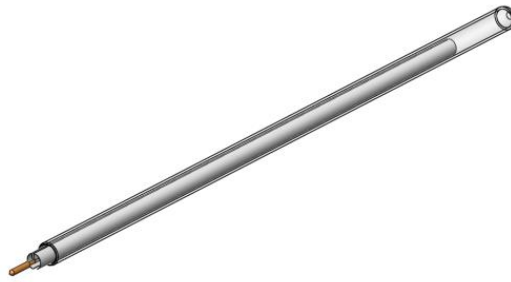


Figura 4 Tubo de vacío

En la Figura 5 se encuentra en la parte central un vástago de cobre que tiene internamente un capilar donde se coloca el fluido de proceso, al inclinarse el tubo y estar expuesto a la radiación solar, el fluido se calienta y sube por convección natural hacia el eje sólido que se encuentra en la parte superior. Es decir, la transferencia de calor se produce por convección – conducción. Alrededor del vástago de cobre se sitúa una aleta circunferencial que transmite el calor desde la cubierta interior de vidrio que tiene recubrimiento selectivo hacia el transmisor de aluminio y por medio de este al tubo de cobre.

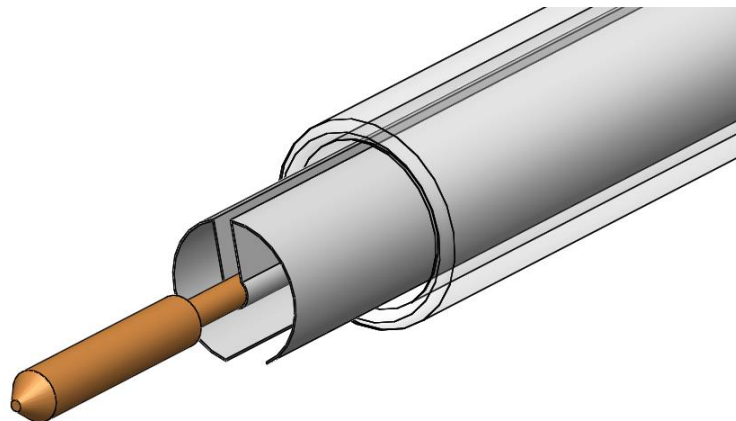


Figura 5 Esquema de componentes del tubo de vacío

2.2.3 Captadores con tubos de polipropileno

En la figura 6, que se observa a continuación, está representado un modelo esquemático correspondiente al calentador de piscinas. Este se fabrica con tubos colocados en paralelo con material polipropileno de alta densidad de color negro mate que tiene absorptancias de 0,9. Los tubos de $\frac{1}{4}$ plg. se ensamblan al alimentador y recolector en el inicio y salida de los tubos mediante calor y alta presión. La distribución de las tuberías en forma paralela y espaciados una distancia de 6mm, origina que la acción del viento que circula por el contorno del calentador enfríe las superficies y por ende el fluido de trabajo que puede ser agua que se transporta desde la piscina hacia los calentadores mediante bombeo, con el propósito de vencer la resistencias hidráulicas dadas en sentido longitudinal por fricción y en accesorios.

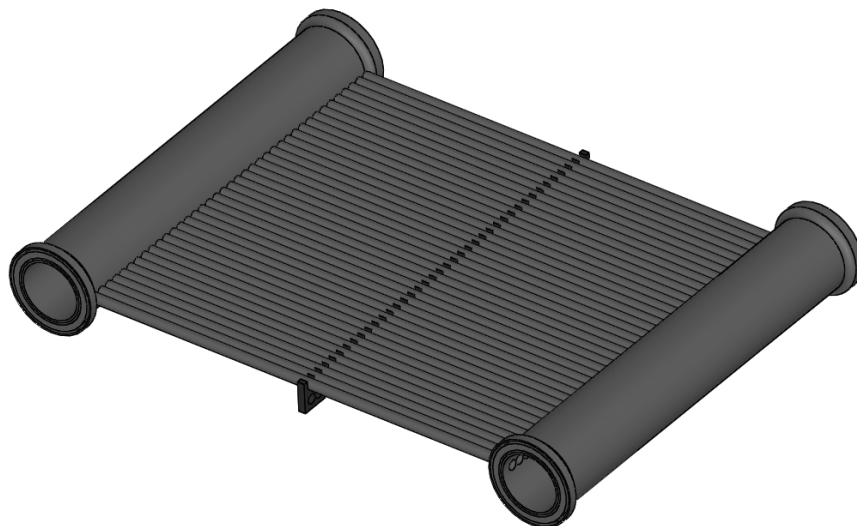


Figura 6 Calentador de piscinas

2.2.4 Tubos flotantes para calentamiento de piscinas

De manera tradicional para el calentamiento de piscinas se ha utilizado el calor proveniente de la combustión de derivados de combustibles fósiles (diesel, gas asociado, GLP, propano, butano), utilizando calderos y procesos de combustión. Con el avance de la tecnología energética para el aprovechamiento de energía solar se ha experimentado e implementado diversos tipos de calentadores, entre los primeros que aparecieron en los Estados Unidos, se encuentra el captador de plástico transparente en forma de tubos y aletas que se colocan sobre la superficie libre de líquido, el vaso de la piscina. En la figura 7 se observa un esquema básico de este calentador de tubos flotantes.

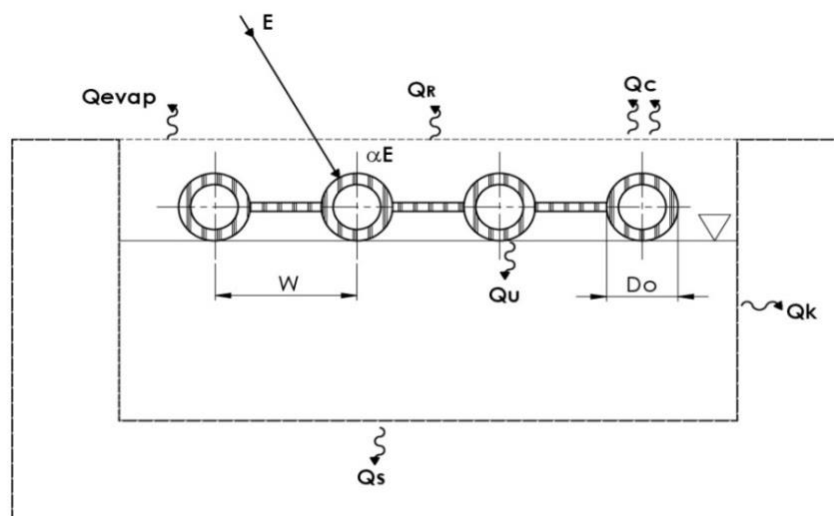


Figura 7 Tubos flotantes para calentamiento de piscinas

2.2.5 Calentadores de PET

En varios países se han desarrollado de manera experimental y artesanal diversos tipos de calentadores que utilizan material reciclado como es el caso de las botellas de polietileno tereftalato (PET). Se coloca en el interior de los cilindros de PET, un tubo de polietileno por donde circula el agua sanitaria, esta distribución PET/polietileno, permite generar el efecto invernadero en la región anular formada entre la superficie del tubo y la cubierta. El aire estancado se calienta y transmite más energía por convección/ conducción hacia el fluido de proceso. El PET semitransparente, evita la salida de radiación térmica al ambiente, y debido a que la longitud de onda de la radiación que se produce en el infrarrojo, en el tubo no puede atravesar el PET porque irradia en longitud de onda $\lambda \geq 3\mu m$.

En la figura 8 se observa la estructura base de un calentador de PET.



Figura 8 Calentador de tubos concéntricos con PET/polietileno

2.3 Transferencia de calor en tubos concéntricos

2.3.1 Coeficientes de convección y Radiación

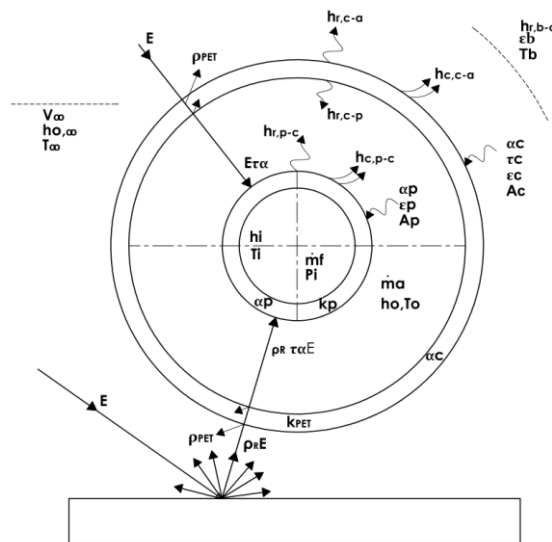


Figura 9 Balance energético para la cubierta de PET y absorbedor de polietileno

En la figura 9 se encuentran los coeficientes de convección y radiación tanto interna como externa correspondiente al calentador de tubos concéntricos formado por tubo de polietileno y cubierta de polietilén tereftalato. Entre el tubo y la envolvente se encuentra la región anular de aire estancado. En la parte exterior el sistema está sometido a los efectos ambientales tanto en variación de temperatura, velocidad del viento y humedad relativa. Por el interior del tubo de polietileno circula el agua por bombeo.

Coeficientes de convección:

En el modelo propuesto, relacionado con el calentador de PET, existen varios coeficientes de convección, para el caso del agua, que circula

por la tubería interior, h_i es el coeficiente de convección interno, en $W/m^2\text{°C}$. Dependiendo de la velocidad de flujo, puede existir convección forzada, flujo laminar y turbulento. Además, para saber en qué régimen se encuentra, se hace referencia a los valores del número de Reynolds.

Para Reynolds comprendidos entre $10000 \leq Re_D \leq 120000$, se utiliza la ecuación de Dittus & Boelter (Pitts, 1980). Para calentamiento $n = 0.4$ y para enfriamiento $n = 0.3$.

$$\frac{h D_i}{k} = 0.023 Re_{Di}^{0.8} Pr^n \quad (7)$$

Esta ecuación es válida para $10000 \leq Re_D \leq 120000$, $0.7 \leq Pr \leq 120$ y $L/D > 60$. El uso de esta ecuación se debe limitar a los casos en los cuales la diferencia entre la temperatura superficial del tubo y la temperatura media volumétrica del fluido no sea mayor de 10°F para líquidos y 100°F para gases.

Para números de Prandtl mayores ($0.7 \leq Pr \leq 16700$) y diferencias de temperatura más altas, se recomienda la ecuación de Sieder-Tate (Pitts, 1980), la cual además es adecuada cuando hay grandes cambios en el valor de la viscosidad.

$$\overline{Nu}_D = \frac{\bar{h} D}{k} = (0.0023) Re_D^{0.8} Pr^{1/3} \left(\frac{u_b}{u_s} \right)^{0.14} \quad (8)$$

Esta ecuación es válida para $Re_D > 10000$ y $L/D > 60$ y puede utilizarse para calentamiento o para enfriamiento. Con excepción de u_s , la cual se evalúa a la temperatura superficial, todas las propiedades se evalúan a la temperatura media volumétrica.

Coeficiente de convección de la región anular:

Entre el tubo de polietileno de color negro mate y la cubierta cilíndrica transparente está el aire estancado. Para esta región se utiliza el término k_{eff} .

Para transferencia de calor por convección natural a través del espacio hueco entre dos cilindros horizontales concéntricos como los que se muestran en la figura 9, Raithby y Hollands (Kreith, 2001) sugiere la ecuación de correlación:

$$\frac{k_{eff}}{k} = 0.386 \left[\frac{\ln(D_o/D_i)}{b^{3/4} (1/D_i^{3/5} + 1/D_o^{3/5})^{5/4}} \right] \left(\frac{Pr}{0.861 + Pr} \right)^{1/4} Ra_b^{1/4} \quad (9)$$

Dónde:

D_o es el diámetro del cilindro externo, D_i es el diámetro del cilindro interno, $2b = D_o - D_i$ y el número de Rayleigh Ra_b se basa en la diferencia de temperaturas a través del espacio hueco. La conductividad térmica efectiva k_{eff} es la conductividad térmica que un fluido en reposo (con conductividad k) en el espacio hueco debe tener para transferir la misma cantidad de calor que el fluido en movimiento.

La ecuación de correlación, es válida en el siguiente intervalo de parámetros:

$$0.70 \leq Pr \leq 6000$$

$$10 \leq \left[\frac{\ln(D_o/D_i)}{b^{3/4} (1/D_i^{3/5} + 1/D_o^{3/5})^{5/4}} \right]^4 Ra_b \leq 10^7$$

Coefficiente de convección externo:

El aire que rodea a la cubierta puede enfriar los tubos, dependiendo de la velocidad del viento. Para ambientes externos, en convección forzada se utiliza la expresión:

$$h_{c,c-a} = 2,8 + 3V_w$$

Coefficientes de radiación:

Debido a la baja temperatura superficial del tubo, la transferencia de calor desde la superficie interna hacia el agua es despreciable, por lo que no se considera un coeficiente de radiación interno. En cambio, para la región anular sí se considera el coeficiente de transferencia de calor por radiación.

De la ley de Stefan-Boltzmann (Mills, 1995), la expresión para la radiación considerando el coeficiente hr , está dado por:

$$\dot{Q}_{12} = \varepsilon_1 A_1 \sigma (4T_m^3) (T_1 - T_2)$$

Para $T_1 \approx T_2$, donde T_m es la media de T_1 y T_2 . Este resultado puede expresarse de manera más concisa como

$$\dot{Q}_{12} \approx A_1 h_r (T_1 - T_2)$$

Donde $h_r = 4\varepsilon_1 \sigma T_m^3$ es el coeficiente de transferencia de calor por radiación [W/m^2]. A $25^\circ C$ ($= 298K$).

Para cilindros concéntricos el calor generado en la región anular es (Incropera, 1996):

$$q_{12} = \frac{\sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \left(\frac{r_1}{r_2}\right)}$$

Además, el coeficiente de radiación se define

$$hr = \frac{\sigma (T_2^2 + T_1^2)(T_2 + T_1)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{(1 - \varepsilon_2)}{\varepsilon_2} \frac{A_2}{A_1}}$$

Dónde:

F12, factor de forma para cilindros concéntricos.

Coefficiente de radiación externo:

Este coeficiente puede tomar como parámetro de cálculo la temperatura ambiental. La expresión matemática está dada por $h_r = 4\varepsilon_1\sigma T_m^3$, donde T_m temperatura media entre el ambiente y la superficial, en K, ε_1 emisividad del material pet, σ constante de Boltzmann, que tiene un valor de $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$.

Resistencias térmicas por conducción:

El tubo de polietileno tiene una resistencia térmica que está dada por $R_p = \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi k_p L}$, k_p conductividad térmica del polietileno, en $\text{W/m}^\circ\text{C}$; L longitud de la tubería, en m, r_o , r_i radios externo e interno del tubo de polietileno. Igualmente, en la cubierta cilíndrica de pet, se tiene una resistencia por conducción $R_{pet} = \frac{\ln\left(\frac{R_o}{R_i}\right)}{2\pi k_{pet} L}$, k_{pet} conductividad térmica del polietileno tereftalato (PET).

2.3.2 Coeficiente global de transferencia de calor

En el absorbedor de tubos concéntricos, la radiación solar E, en W/m^2 incide en la superficie exterior de la tubería de polietileno con un valor $\tau_c E$.

Esto indica que parte de la energía radiante fue reflejada por la cubierta de PET. Además, solo llega un valor de $\tau_c \alpha_p E$ al tubo. En el absorbedor se convierte la luz solar en energía térmica, debido a la absorción del recubrimiento color negro mate. El calor recibido se transfiere por conducción hacia el fluido de trabajo (agua) y se pierde por convección y radiación hacia la cubierta. Posteriormente el cilindro de PET empieza a calentarse y transfiere calor por radiación hacia el tubo y por una combinación de radiación y convección hacia el ambiente.

Coefficiente de transferencia de calor interno:

Está formado por la resistencia de conducción y convección en el fluido de tal forma que en el sólido $R_p = \frac{\ln\left(\frac{R_o}{R_i}\right)}{2\pi k_p L}$ y en el agua $R_i = \frac{1}{2\pi h_i L r_i}$, simplificando:

$$U_i = \frac{1}{\frac{r_i \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{k_p} + \frac{1}{h_i}} \quad (10)$$

h_i Coeficiente de convección del agua, en $W/m^2\text{°C}$, k_p conductividad térmica del tubo de polietileno, en $W/m\text{°C}$.

Coefficiente de transferencia de calor externo U_o :

Se deben considerar varias resistencias térmicas, la de convección y radiación en la región anular, a continuación la de conducción en el PET y finalmente convección y radiación desde la cubierta hacia el ambiente. En la región anular la resistencia está dada por $R_o = \frac{1}{2\pi r_e L h_o}$, $h_o = h_{r,p-c} + h_{c,p-c}$, y el radio equivalente $r_e = R_i - r_o$. Luego aparece la resistencia a la

conducción dada por $R_{pet} = \frac{\ln\left(\frac{R_o}{R_i}\right)}{2\pi k_{pet} L}$. La resistencia exterior $R_e = \frac{1}{2\pi R_o L h_{o,\infty}}$,
 $h_{o,\infty} = h_{r,c-a} + h_{c,c-a}$.

Por lo tanto, $U_o = \frac{1}{A_o \sum R_t}$ con $A_o = 2\pi R_o L$

$$U_o = \frac{1}{\frac{R_o}{r_e h_o} + \frac{R_o \left(\ln\left(\frac{R_o}{R_i}\right)\right)}{k_{pet}} + \frac{1}{h_{o,\infty}}} \quad (11)$$

2.3.3 Balance energético de la cubierta y el absorbedor

Balance energético del absorbedor:

El tubo recibe energía radiante y pierde calor por radiación y convección hacia la cubierta. Además, transfiere calor por conducción hacia el fluido de trabajo. Para el estado estacionario

$$\begin{aligned} \left\{ \begin{array}{l} \text{Calor que entra} \\ \text{al sistema} \end{array} \right\} &= \left\{ \begin{array}{l} \text{calor que sale} \\ \text{del sistema} \end{array} \right\} \\ \left\{ \begin{array}{l} \text{Radiación} \\ \text{directa} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Radiación} \\ \text{difusa} \\ \text{PET} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Radiación} \\ \text{reflejada} \end{array} \right\} \\ &= \left\{ \begin{array}{l} \text{Radiación} \\ \text{hacia el PET} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Convección} \\ \text{hacia el PET} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Calor útil} \end{array} \right\} \end{aligned}$$

$$E \tau_c \alpha_p + \rho_R E \tau_c \alpha_p + \varepsilon_c \alpha_p \sigma T_c^4 = \varepsilon_p \sigma T_p^4 + h_{c,p-c} (T_p - T_c) + Q_u$$

Con la fórmula del calor sensible el calor útil se determina por $Q_u = m c_p (T_2 - T_1)$; la ganancia instantánea de energía está dada por la llamada ecuación de “Hotel – Whillier – Bliss” (Wilson, 1982). La “ganancia de energía instantánea por unidad de tiempo” y unidad de área es:

$$Q_u = A F_R [E (\tau\alpha) k - U (T_2 - T_1)] \quad (12)$$

Dónde:

F_R es el factor de remoción de calor que indica el porcentaje de energía térmica que se consigue transferir al agua, E irradiancia solar, $\tau\alpha$ es el producto de la transmitancia de cubierta por la absorptancia del polietileno, k factor de sombra y suciedad, para absorbedores nuevos $k = 1$, U coeficiente global de transferencia de calor.

Balance energético de cubierta:

Aplicando la primera ley de la Termodinámica

$$\begin{aligned} & \left\{ \begin{array}{l} \text{Radiación} \\ \text{difusa} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Radiación} \\ \text{del tubo} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Convección} \\ \text{del tubo} \end{array} \right\} \\ & = \left\{ \begin{array}{l} \text{Radiación} \\ \text{al ambiente} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Radiación} \\ \text{al tubo} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Convección} \\ \text{al ambiente} \end{array} \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \alpha_{pet} \{ \varepsilon_p \sigma T_p^4 + \varepsilon_b \sigma T_b^4 \} + h_o (T_p - T_c) \\ & = \varepsilon_{pet} \sigma T_c^4 + \varepsilon_{pet} \sigma T_c^4 + h_{o,\infty} (T_c - T_\infty) \end{aligned}$$

α_{pet} absorptancia del polietileno, ε_p emisividad del polietileno en el infrarrojo térmico ε_b emisividad del cielo, T_p temperatura del tubo de polietileno, T_b temperatura de la bóveda, esta puede ser reemplazada por la temperatura ambiente T_∞ , h_o coeficiente de convección del aire estancado $h_o = h_{r,p-c} + h_{c,p-c}$, incluye la sumatoria de las resistencias a la transferencia de calor por convección y radiación en el contorno tubo-cubierta.

2.3.4 Análisis del absorbedor en sentido longitudinal

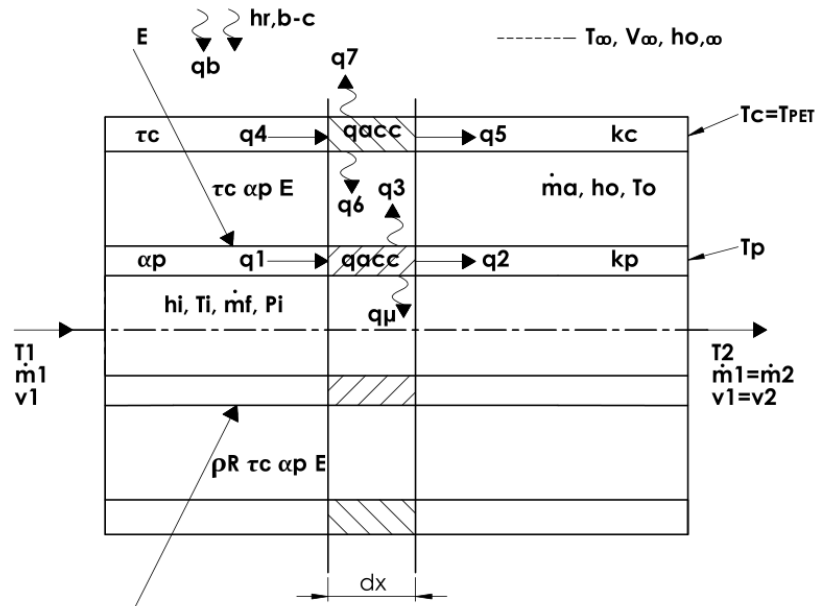


Figura 10 Flujos de energía en sentido longitudinal y transversal en el absorbedor

Dónde:

q_1 , q_4 , calor que ingresa por conducción al elemento infinitesimal de polietileno y PET; q_2 , q_5 , calor que sale por conducción; q_u , calor útil; q_6 , q_7 calor de radiación que sale de la tubería de PET hacia el tubo y al ambiente; q_3 , calor perdido por radiación y convección del polietileno al PET; E , energía solar incidente; q_b , calor ganado desde la bóveda celeste, T^∞ , temperatura ambiente; V^∞ , velocidad de viento; $h_{o,\infty}$, coeficiente de convección externo; $h_{r,b-c}$, coeficiente de radiación bóveda cubierta.

Este caso de transferencia de calor en tubos concéntricos, formado por envolvente de PET y tubo de polietileno, puede ser tratado como un par de barras de sección transversal constante y temperatura a lo largo del eje x variable. En la figura 10 se muestra el esquema que contiene el elemento infinitesimal de longitud dx que corta a la cubierta y al tubo.

Modelo matemático para el tubo absorbedor:

El calor que ingresa por conducción en el elemento diferencial es $q_1 = -k A \frac{\partial T}{\partial x}$, el flujo de energía térmica que sale del anillo tiene un incremento que equivale a $q_2 = -k A \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[-k A \frac{\partial T}{\partial x} \right] dx$. La energía radiante que ingresa $E_R = \tau_c \alpha_p E \pi d_o dx$, corresponde a la fracción solar que absorbe el tubo de polietileno, en la figura también se puede observar el calor que sale del sistema, siendo $q_3 = h_o \pi d_o dx (T_p - T_c)$, con $h_o = h_{r,p-c} + h_{c,p-c}$. Existe energía acumulada designada por $q_{acc} = \rho_p C A dx \frac{\partial T}{\partial t}$ aplicando la primera Ley de la Termodinámica se tiene

$$\{Calor\ que\ entra\} - \{Calor\ que\ sale\} = \{Calor\ que\ se\ acumula\}$$

$$\begin{aligned} & \left\{ \begin{array}{l} Radiación \\ solar \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} Radiación \\ del\ PET \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} Calor\ por \\ conducción \end{array} \right\}_x - \left\{ \begin{array}{l} Calor\ por \\ conducción \end{array} \right\}_{x+dx} - \left\{ \begin{array}{l} Calor\ por \\ convección \end{array} \right\} \\ & = \left\{ \begin{array}{l} Calor \\ acumulado \end{array} \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_c \alpha_p E \pi d_o dx + h_{r,c-p} \pi d_o dx (T_c - T_p) - k A \frac{\partial T}{\partial x} + k A \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[k A \frac{\partial T}{\partial x} \right] dx \\ - h_o \pi d_o dx (T_p - T_c) = \rho_p C A dx \frac{\partial T}{\partial t} \end{aligned}$$

Simplificando

$$\begin{aligned} \tau_c \alpha_p E \pi d_o dx + h_{r,c-p} \pi d_o dx (T_c - T_p) + \frac{\partial}{\partial x} \left[k A \frac{\partial T}{\partial x} \right] dx \\ - h_o \pi d_o dx (T_p - T_c) = \rho_p C A dx \frac{\partial T}{\partial t} \end{aligned}$$

Agrupando para encontrar el calor útil q_u

$$q_u = \tau_c \alpha_p E \pi d_o dx + h_{r,c-p} \pi d_o dx (T_c - T_p) - h_o \pi d_o dx (T_p - T_c)$$

Este calor útil es la suma de la radiación solar incidente en la tubería y la energía radiante que recibe desde la cubierta menos la pérdida por convección y radiación hacia la cubierta.

Al simplificar el diferencial de distancia dx , considerando la conductividad térmica constante se obtiene:

$$k A \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \tau_c \alpha_p E \pi d_o + h_{r,c-p} \pi d_o (T_c - T_p) - h_o \pi d_o (T_p - T_c) = \rho_p C A \frac{\partial T}{\partial t}$$

Dividiendo para el producto $k A$ la ecuación diferencial parcial de segundo orden con coeficientes constantes resulta:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\tau_c \alpha_p E \pi d_o}{k A} + \frac{h_{r,c-p} \pi d_o (T_c - T_p)}{k A} - \frac{h_o \pi d_o (T_p - T_c)}{k A} = \frac{1}{\bar{\alpha}_p} \frac{\partial T}{\partial t}$$

Cambiando de signo y reemplazando $T_p - T_c = \theta_p$, se obtiene

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \theta_p}{\partial x^2} + \frac{\tau_c \alpha_p E \pi d_o}{k_p A_p} - \frac{h_{r,c-p} \pi d_o \theta_p}{k_p A_p} - \frac{h_o \pi d_o \theta_p}{k_p A_p} &= \frac{1}{\bar{\alpha}_p} \frac{\partial \theta_p}{\partial t} \\ \frac{\partial^2 \theta_p}{\partial x^2} + \frac{\tau_c \alpha_p E \pi d_o}{k_p A_p} - \left[\frac{h_{r,c-p} \pi d_o}{k_p A_p} + \frac{h_o \pi d_o}{k_p A_p} \right] \theta_p &= \frac{1}{\bar{\alpha}_p} \frac{\partial \theta_p}{\partial t} \end{aligned}$$

(13)

$\bar{\alpha}_p$ corresponde a la difusividad térmica del polietileno, $\bar{\alpha}_p = \frac{k_p}{\rho_p C}$

Modelo matemático de la cubierta:

Igualmente utilizando los flujos térmicos de la figura 10 se realiza la modelación matemática de este componente

$$\{Calor\ que\ entra\} - \{Calor\ que\ sale\} = \{Calor\ que\ se\ acumula\}$$

$$\begin{aligned}
& \left\{ \text{Calor por conducción} \right\}_x + \left\{ \text{Calor convección/radiación del tubo} \right\} + \left\{ \text{Radiación difusa cielo} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Calor por conducción/} \\ \text{radiación al ambiente} \end{array} \right\}_{x+dx} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Calor por} \\ \text{radiación al tubo} \end{array} \right\} \\
& - \left\{ \text{Calor por conducción} \right\}_{x+dx} = \left\{ \text{Calor acumulado} \right\} \\
& -k A \frac{\partial T}{\partial x} + h_o \pi d_o dx (T_p - T_c) + h_{r,b-c} \pi D_o dx (T_\infty - T_c) + k A \frac{\partial T}{\partial x} \\
& + \frac{\partial}{\partial x} \left[k A \frac{\partial T}{\partial x} \right] dx - h_{o,\infty} \pi D_o dx (T_c - T_\infty) = \rho_c A dx \frac{\partial T}{\partial t}
\end{aligned}$$

Simplificando

$$\begin{aligned}
& h_o \pi d_o dx (T_p - T_c) + h_{r,b-c} \pi D_o dx (T_\infty - T_c) + \frac{\partial}{\partial x} \left[k A \frac{\partial T}{\partial x} \right] dx \\
& - h_{o,\infty} \pi D_o dx (T_c - T_\infty) = \rho_c A dx \frac{\partial T}{\partial t}
\end{aligned}$$

Considerando el producto $k A$ constante y eliminando dx

$$\begin{aligned}
& h_o \pi d_o (T_p - T_c) + h_{r,b-c} \pi D_o (T_\infty - T_c) + k A \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - h_{o,\infty} \pi D_o (T_c - T_\infty) \\
& = \rho_c A \frac{\partial T}{\partial t}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& k A \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + h_o \pi d_o (T_p - T_c) + h_{r,b-c} \pi D_o (T_\infty - T_c) - h_{o,\infty} \pi D_o (T_c - T_\infty) \\
& = \rho_c A \frac{\partial T}{\partial t}
\end{aligned}$$

Dividiendo para la conductividad térmica del PET y su área se tiene:

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{h_o \pi d_o (T_p - T_c)}{k A} + \frac{h_{r,b-c} \pi D_o (T_\infty - T_c)}{k A} - \frac{h_{o,\infty} \pi D_o (T_c - T_\infty)}{k A} \\
& = \frac{1}{\alpha_{pet}} \frac{\partial T}{\partial t}
\end{aligned}$$

Suponiendo que la cantidad de calor que recibe por radiación difusa desde el cielo a una temperatura T_∞ es igual al calor que pierde el cilindro de polietileno tereftalato, se suprime el tercero y cuarto miembro de la ecuación anterior, por lo que:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{h_o \pi d_o (T_c - T_p)}{k_{pet} A_{pet}} = \frac{1}{\bar{\alpha}_{pet}} \frac{\partial T}{\partial t}$$

Realizando un cambio de variable, $\theta_c = T_c - T_p$ e identificando parámetros,

$$\frac{\partial^2 \theta_c}{\partial x^2} - \frac{h_o \pi d_o \theta_c}{k_{pet} A_{pet}} = \frac{1}{\bar{\alpha}_{pet}} \frac{\partial \theta_c}{\partial t} \quad (14)$$

Los modelos matemáticos para la tubería de polietileno y el PET quedan definidos de la siguiente manera:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \theta_p}{\partial x^2} + \frac{\tau_c \alpha_p E \pi d_o}{k_p A_p} + \left[\frac{h_{r,c-p} \pi d_o}{k_p A_p} - \frac{h_o \pi d_o}{k_p A_p} \right] \theta_p = \frac{1}{\bar{\alpha}_p} \frac{\partial \theta_p}{\partial t} \\ \frac{\partial^2 \theta_c}{\partial x^2} - \frac{h_o \pi d_o \theta_c}{k_{pet} A_{pet}} = \frac{1}{\bar{\alpha}_{pet}} \frac{\partial \theta_c}{\partial t} \end{cases} \quad (15)$$

Análisis para el estado estacionario:

Con el propósito de determinar el perfil de temperaturas del calentador de tubos concéntricos formado por tubería de polietileno y envolvente de PET, de la expresión (14), se iguala a cero la segunda ecuación, tomando en cuenta que $\frac{\partial \theta_c}{\partial t} = 0$, resulta $\frac{d^2 \theta_c}{dx^2} - \frac{h_o \pi d_o \theta_c}{k_{pet} A_{pet}} = 0$

$$\text{Si } m^2 = \frac{h_o \pi d_o}{k_{pet} A_{pet}}; \frac{d^2 \theta}{dx^2} - m^2 \theta = 0$$

Para buscar una solución a la ecuación diferencial se asigna $\theta = e^{rx}$, derivando $\frac{d\theta}{dx} = r e^{rx}$, la segunda derivada resulta $\frac{d^2\theta}{dx^2} = r^2 e^{rx}$ reemplazando en la ecuación (4) $r^2 - m^2 = 0$, resolviendo $r = \pm m$ con $m = \sqrt{\frac{h_o \pi d_o}{k_{pet} A_{pet}}}$ la solución propuesta es

$$\theta = A e^{mx} + B e^{-mx} \quad (16)$$

A, B son las constantes de integración. Resolviendo para la condición de contorno $\theta_0 = T_o - T_p$, con T_p suponiendo constante, en $x = 0$ $\theta = \theta_0$ en $x = L$, $\theta = \theta_L$; y también $\frac{d\theta}{dx} = 0$, en $x = L$. Reemplazando las condiciones de contorno, en $x = 0$ $\theta_0 = A e^0 + B e^0$, por lo tanto $\theta_0 = A + B$; utilizando la segunda condición de contorno, $\frac{d\theta}{dx} = m A e^{mL} - m B e^{-mL} = 0$, simplificando $B = A e^{2mL}$. Por lo que $\theta_0 = A + A e^{2mL}$ sacando factor común $A = \frac{\theta_0}{1 + e^{2mL}}$, de tal manera que el valor de $B = \frac{\theta_0}{1 + e^{2mL}} e^{2mL}$, arreglando $B = \frac{\theta_0}{1 + e^{-2mL}}$, reemplazando los valores de las constantes de integración:

$$\theta = \frac{\theta_0}{1 + e^{2mL}} e^{mx} + \frac{\theta_0}{1 + e^{-2mL}} e^{-mx} \quad (17)$$

2.4 Propiedades ópticas de materiales

Cuando la radiación solar incide sobre un objeto material la energía incidente E , es reflejada en la superficie de contacto entre la luz y el material, si el material es semitransparente (vidrio, policarbonato, PET), esta puede ser transferida en una cantidad τE . Además, el objeto tiene la propiedad de absorber radiación en una proporción αE , por otra parte, al calentarse el cuerpo emite radiación dependiendo de su longitud de onda, temperatura superficial y emisividad, esta puede ser $\varepsilon \sigma E A T^4$. Existen otros factores donde la energía térmica se transfiere, pudiendo existir pérdidas de calor por

convección E_c , y por conducción E_k , en la figura 11 se muestra un esquema representativo del balance de energía de un cuerpo que recibe radiación solar.

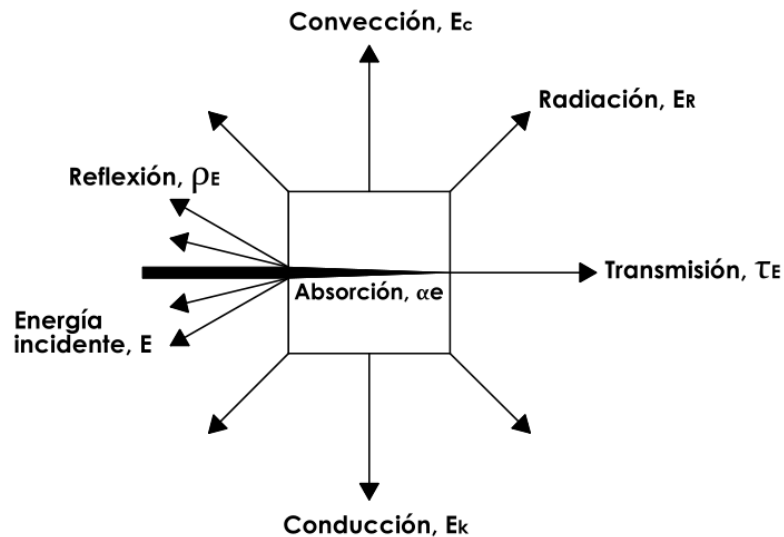


Figura 11 Balance energético de un cuerpo que recibe la energía solar, E

Con lo anteriormente descrito se puede decir que las propiedades ópticas de los materiales correspondientes a reflectividad, absortancia, transmitancia, emisividad son parámetros importantes en el diseño e implementación de sistemas energéticos para aprovechamiento del recurso solar.

2.4.1 Reflectividad

Es una propiedad del material para reflejar la luz incidente, en una cantidad ρE para citar un ejemplo la reflectividad de un espejo es superior a la reflectividad de la pintura negro mate. Si se utiliza sistemas de concentración, la reflectividad (Kreith, 2001) de los materiales utilizados deben tener un rango aceptable de 0.75 a 0.85.

2.4.2 Absortancia

Esta propiedad de los materiales permite captar una mayor cantidad de energía térmica. Al hacer una comparación entre una placa negra expuesta al sol y una placa de color blanco mate, la placa negra se va a calentar más rápidamente y alcanzar una mayor temperatura que la placa blanca. Se recomienda que, para aplicaciones de energía solar, la absortancia de los materiales esté en un rango de 0,9 a 0,95. Sin embargo, es necesario tomar en cuenta que la placa negra caliente emite en el infrarrojo casi la misma cantidad de calor que la que absorbe, por lo que en los últimos años se utilizan recubrimientos selectivos de cromo negro.

2.4.3 Transmitancia

Los cuerpos semitransparentes pueden tener transmitancias de 0,9 a 0,95. Para el caso del vidrio, un material de buena calidad es aquel que tiene una transmitancia mayor a 0.85. Esta propiedad es aquella, en la cual el material permite el paso de luz visible. El vidrio es transparente en longitud de onda corta y opaco para luz que se irradia en onda larga.

2.4.4 Emisividad

Cuando un cuerpo expuesto a la luz solar empieza a calentarse, este irradia en el infrarrojo térmico. Valores de emisividad $\varepsilon_G = 1$, en el infrarrojo para el vidrio, $\varepsilon_G = 0$ para luz visible, en la práctica $\varepsilon_A = 1$ para el absorbedor de color negro mate y $\varepsilon_A = 0.1$, para absorbentes selectivos en el infrarrojo. A continuación en la tabla 1 se tienen valores de emitancia.

Tabla 1

Valores aproximados seleccionados de la emitancia, ϵ (valores hemisféricos totales a temperaturas normales)

Tipo de superficie	Emitancia, ϵ
Aleación de aluminio, sin oxidar	0.035
Aluminio anodizado negro	0.80
Chapa de cromo	0.16
Acero inoxidable tipo 312, ligeramente oxidado	0.30
Inconel X, oxidado	0.72
Pintura negra esmaltada	0.78
Pintura blanca acrílica	0.90
Asfalto	0.88
Concreto	0.90
Tierra	0.94
Vidrio pyrex	0.80

Fuente: (Mills, 1995)

CAPÍTULO 3

IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA EXPERIMENTAL PARA ENSAYOS TÉRMICOS DEL PET

3.1 Análisis del conjunto tubería y envolvente de PET

El modelo experimental para determinar las características energéticas del absorbedor compuesto por tubería interna de polietileno y envolvente exterior de PET de color verde y semitransparente, corresponden a recipientes obtenidos mediante reciclado con el fin de darles utilidad posterior, analizando su comportamiento térmico bajo la incidencia de la luz solar y condiciones ambientales. Para desarrollar este dispositivo de conversión de energía solar en térmica de baja temperatura, inferior a 100 °C, ha sido necesario conocer las especificaciones técnicas y modelos energéticos de colectores tradicionales, como los explicados en el apartado 2.2 del Capítulo 2, en el cual se describen el colector solar plano (CSP) para obtención de agua caliente sanitaria (ACS), el moderno calentador de tubos al vacío, que requiere de un ángulo de inclinación superior a 15 °, para que el fluido térmico que se encuentra en la región interior del vástago de cobre circule por convección natural. Además, se indican los esquemas de calentadores de piscinas que se construyen con polipropileno de alta densidad, formando una matriz de tubos en paralelo. Existen otros tipos de calentadores de piscina fabricados en forma tubular con aletas planas, estas son conocidas como mantas térmicas.

3.1.1 Componentes del absorbedor

El banco de ensayos de cilindros de PET verde y semitransparente, comprende un par de absorbedores, colocados en forma inclinada, sobre

una mesa horizontal. El absorbedor en el primer caso está compuesto por la manguera de polietileno color negro de 1plg., recubierta por una envolvente cilíndrica de polietileno tereftalato color verde, colocados en línea de manera consecutiva, el número de PETs es de 7 unidades por hilera. El otro tubo con cubierta semitransparente, también tiene 7 cilindros de PET reciclados.

Las cubiertas de PET generan el efecto invernadero en la región anular comprendida entre la tubería de polietileno y la cubierta de plástico, con esto se consigue aumentar la temperatura superficial del tubo absorbedor y consecuentemente la del agua que circula por el interior de la tubería de polietileno.

3.1.2 Geometría de tubos concéntricos

El absorbedor de tubos concéntricos está formado por la tubería de polietileno de radio interior r_i , y radio exterior r_o , de áreas $A_{i,p}$, $A_{o,p}$, que corresponden a las áreas interior y exterior del tubo absorbedor de polietileno.

Para la envolvente de PET, en cambio se designa de la siguiente manera: los radios interno y externo son, R_i y R_o , con áreas interior y exterior que se definen por $A_{i,c}$, $A_{o,c}$. En la parte inferior del intercambiador de calor de tubos concéntricos (ICTC), o llamado también absorbedor, se halla una mesa de madera con recubrimiento de color blanco, que es un material reflectivo para que la luz que incide sobre su superficie, se direcciona de manera difusa al tubo colector.

En la figura 12, se encuentra el esquema representativo del calentador de PET semitransparente y verde sobre la mesa con material reflectivo.

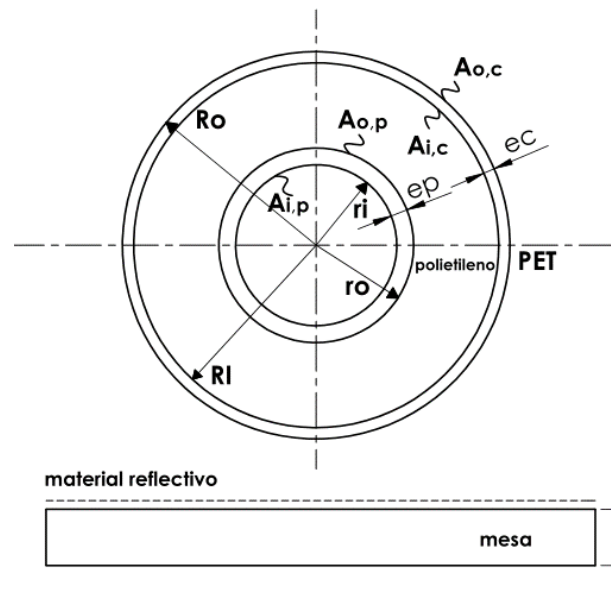


Figura 12 Geometría del absorbedor de tubos concéntricos

A continuación, en la figura 13, está el ICTC, o absorbedor de tubos concéntricos, donde se indica la longitud y los radios internos y externos de las tuberías.

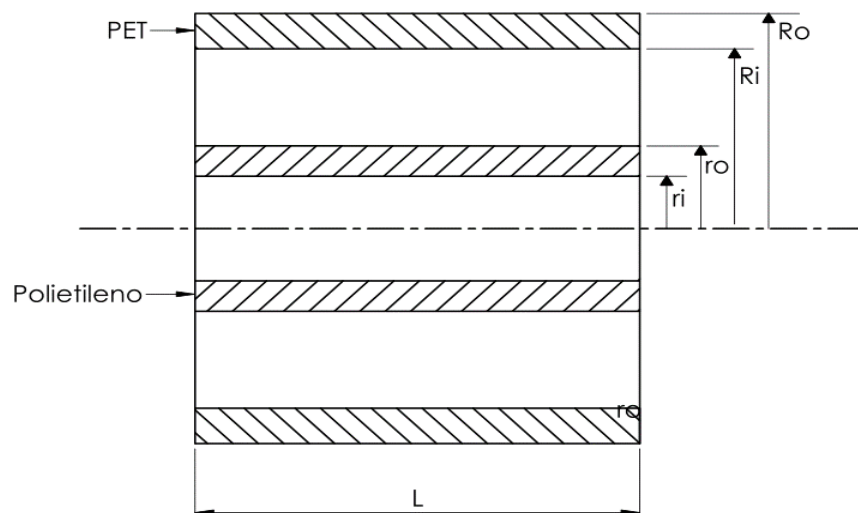


Figura 13 Radios interno y externo del absorbedor polietileno/PET

3.1.3 Tubos concéntricos en paralelo

El banco de ensayo experimental, está compuesto por dos tuberías concéntricas en paralelo, como indica la figura 14. Se encuentran separadas una distancia W , la mesa soporte de madera, se tiene ancho a y espesor constante e .

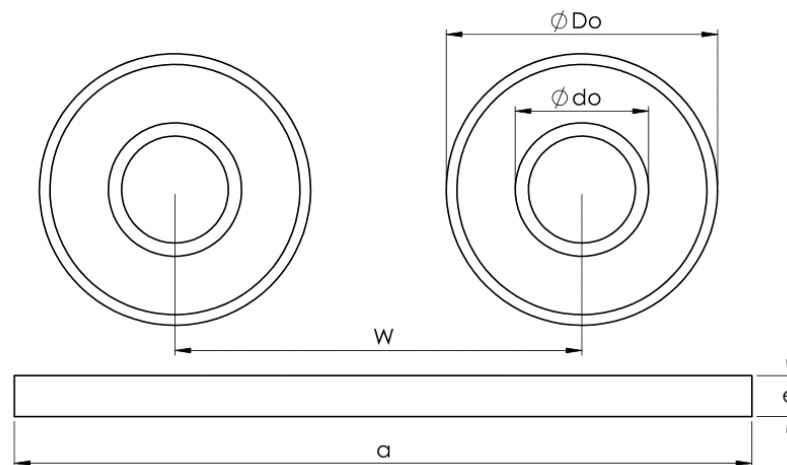


Figura 14 Cilindros concéntricos de polietileno y PET

Para que exista una circulación adecuada del agua en el interior de la tubería de polietileno, el colector solar con cilindros de PET verde y transparente deben tener un ángulo de inclinación β , que en la práctica (García, 1999), para la mayor cantidad de meses del año se recomienda que este ángulo sea igual al valor absoluto de la latitud de la localidad sumado 10° , es decir $\beta = |\Phi| + 10^\circ$. Sin embargo, con propósitos de mantenimiento del dispositivo es recomendable que $\beta \geq 15^\circ$.

Para el desarrollo de esta investigación, el lugar donde se realiza el experimento, es el centro de la ciudad de Ambato, que tiene una latitud de $\phi = -1.24$, el signo negativo indica que el lugar se encuentra bajo la línea equinoccial, y en cuanto a la longitud $L = -78.617$, con respecto al meridiano de Greenwich, por lo que el ángulo de inclinación sugerido para banco de ensayos térmicos de PET, es de 20° , con fines de mantenimiento del dispositivo.

Cuando se seleccionan ángulos de inclinación inferior a 10° , la contaminación ambiental, polvo, humedad, presencia de incrustaciones en la envoltura semitransparente, impiden el paso de radiación solar, reduciéndose de esta manera el calor transferido al fluido de proceso, con la consecuente pérdida de la eficiencia energética.

A continuación en la figura 15 se tiene un corte del acoplamiento longitudinal del absorbedor formado por tubos concéntricos. h_1 y h_2 son la diferencia de alturas con las que se consigue la inclinación adecuada de los captadores de tubos. De acuerdo a este esquema, el fluido debe ingresar a una temperatura T_{fi} por la parte inferior, conforme circula por convección forzada por el tubo colector, capta energía térmica, se calienta y sale a una temperatura T_{fo} .

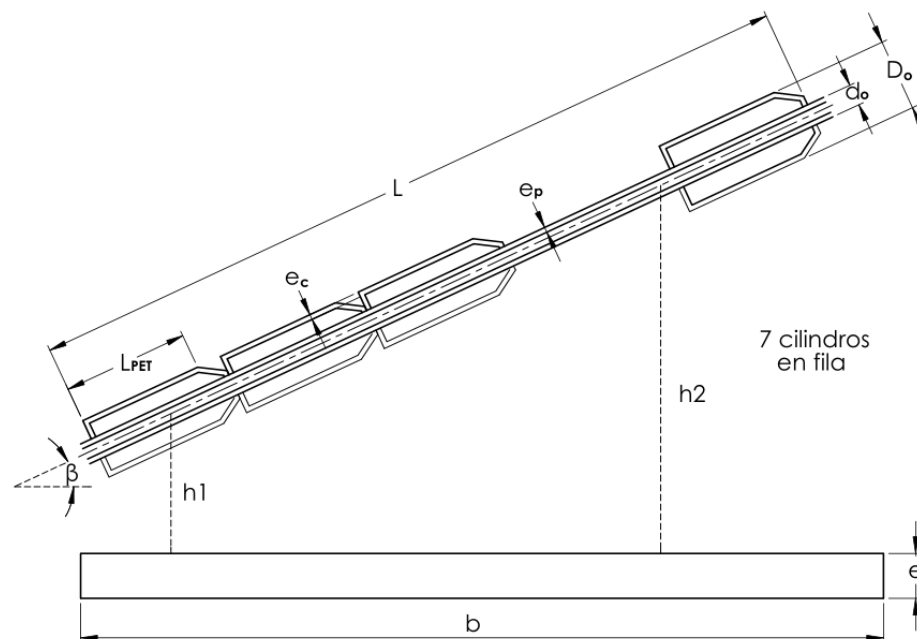


Figura 15 Corte longitudinal del absorbedor de polietileno y PET

3.1.4 Esquema del banco de ensayo

Antes de realizar la fabricación de los componentes del banco de ensayos térmicos de PET, para aplicaciones de la energía solar, fue necesario identificar los materiales y geometrías de las partes y piezas para optimizar el proceso productivo de transformación de la materia prima, y sus beneficios en el funcionamiento del equipo. En la figura 16 se tiene un esquema completo de los elementos mecánicos, térmicos y energéticos necesarios para su implementación. El sistema está formado por:

- Mesa o bastidor
- Soportes de la mesa
- Tubos concéntricos, absorbedor de PET verde y absorbedor de PET semitransparente.
- Tuberías de alimentación principal de agua
- Tuberías secundarias
- Acoples
- Panel fotovoltaico para bombeo de agua
- Bomba sumergible que funciona con ESFV
- Acumulador
- Soporte metálico del acumulador

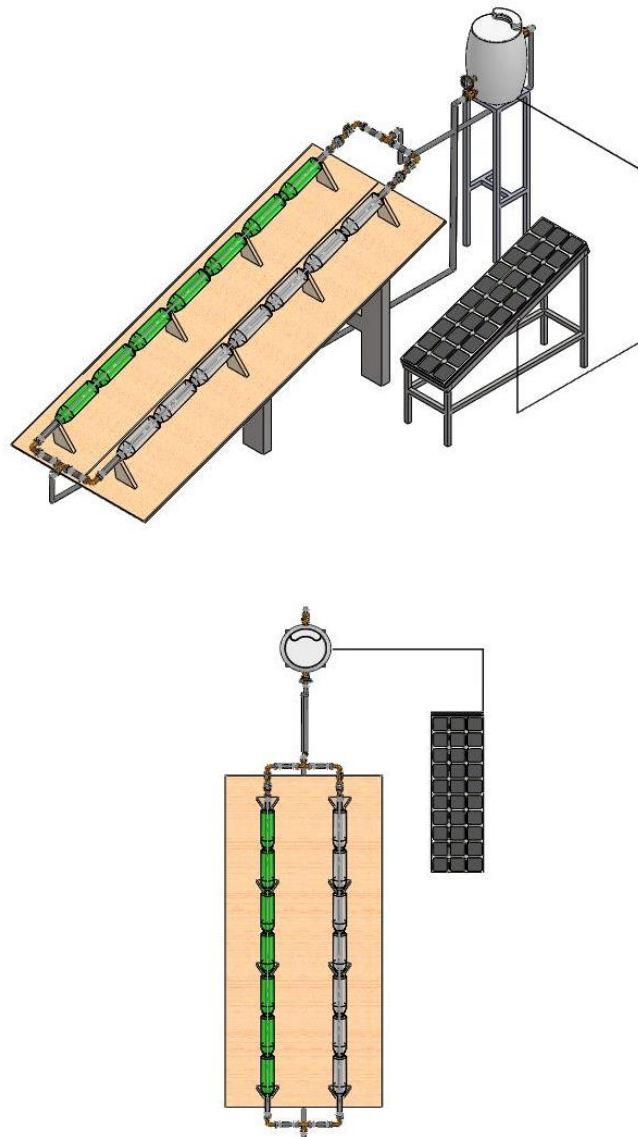


Figura 16 Banco de Ensayos de PET, Isometría y vista de planta

En la figura 17 se muestra el banco de ensayos, en sentido longitudinal, el absorbedor está inclinado un ángulo β , y se acopla mediante tuberías de recolección del fluido caliente, con el acumulador, que tiene una capacidad de 25 litros, en la parte inferior del tanque, se encuentra la toma de agua fría que baja al captador de PET. Luego de calentarse a lo largo de la tubería, el agua caliente ingresa por la parte superior del tanque de acumulación. También, se encuentra el panel fotovoltaico que proporciona la energía necesaria para el funcionamiento de la bomba sumergible de 12 V@2,5 A.

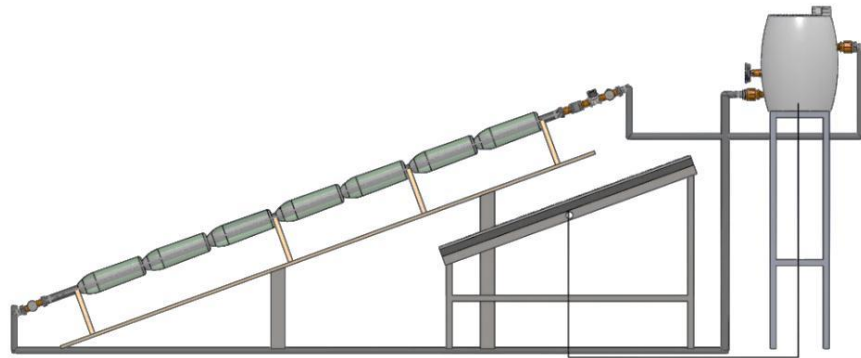


Figura 17 Banco de Ensayos, Vista Lateral

3.2 Implementación del sistema

3.2.1 Materiales

Para la fabricación del banco de ensayos, para calentamiento de agua con energía solar se utilizan los siguientes materiales: 14 cilindros de PET, 7 verdes y 7 semitransparentes; 4,70m de manguera de polietileno de alta densidad de color negro mate; 10 sensores de temperatura DS18B20 para la medición de las temperaturas de entrada y salida del fluido: T_1 a T_5 , para el absorbedor con cubierta de PET verde, y T_6 a T_{10} para el absorbedor con cubierta semitransparente; la mesa y soportes son de madera, el recipiente del acumulador de plástico, con capacidad de 25 litros de agua, el soporte del tanque fabricado en acero al carbono ASTM A36, panel fotovoltaico compuesto por 32 células en serie, que dan una potencia real de 36 W, 12 voltios, 3 amperios.

3.2.2 Tuberías del absorbedor

Se utiliza tubo de polietileno de color negro y accesorios de PVC de 1 plg. El tubo se acopla a las universales mediante abrazaderas de metal, con esto se consigue evitar las fugas de líquido. En la figura 18 se muestra parte

de la tubería y accesorios. Aquí se observa la electroválvula y el sensor de flujo ensamblada en tubería de 25,4mm.

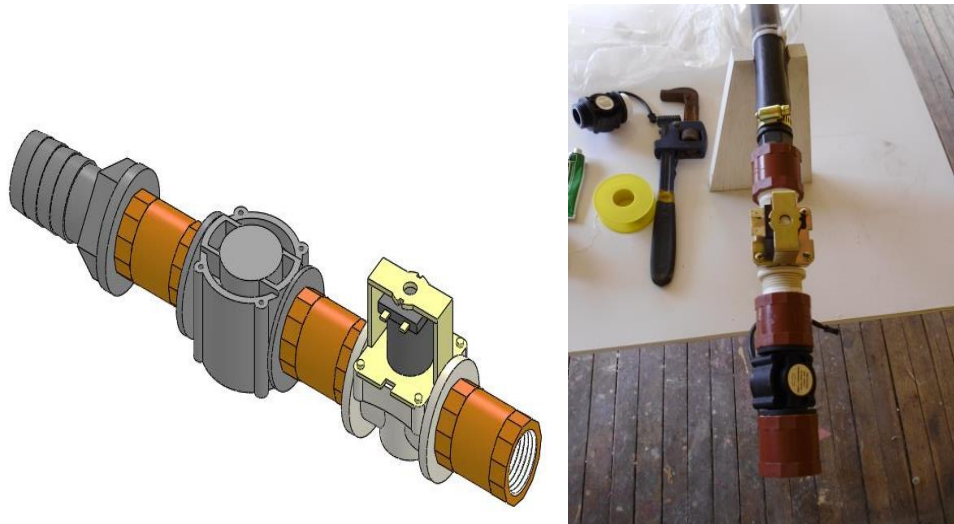


Figura 18 Accesorios y tubería del Banco de Ensayos

En la figura 19 está el acoplamiento entre las tuberías del absorbedor con los accesorios de ingreso y salida del agua del colector.

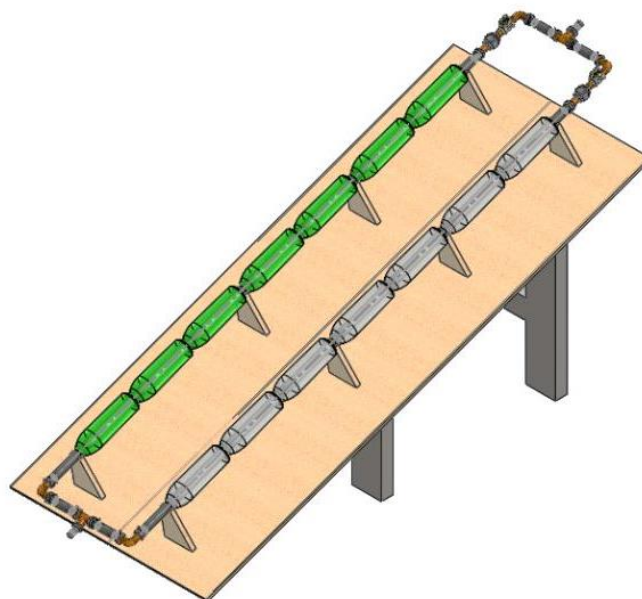


Figura 19 Acoplamiento de tubería interna y externa

3.2.3 Recipiente de acumulación de agua

En el recipiente de acumulación de agua se almacena el agua caliente que proviene del sistema de calentamiento, tanto de la tubería de alimentación con envoltura de PET verde y la de PET transparente. Aquí es importante indicar que para la salida de agua fría, la toma debe estar ubicada en la parte inferior del tanque, y el retorno de agua caliente debe ingresar a la parte superior del tanque a unos 10cm., desde la tapa, en el tanque se produce la estratificación de temperaturas, es decir, el agua más caliente se ubica en la parte superior del tanque y la más fría en la base inferior.



Figura 20 Acumulador de agua caliente con capacidad de 25 litros, manímetro de alimentación de agua caliente con dos entradas.

3.2.4 Soportes

Las tuberías se soportan con placas de madera, que aseguran a los tubos concéntricos de PET verde y el transparente, y además, evitan fuga de calor por conducción entre materiales en contacto.



Figura 21 Soportes del absorbedor

Se construye la mesa con dimensiones de 245x106cm. en madera, con recubrimiento superficial de pintura blanca mate.

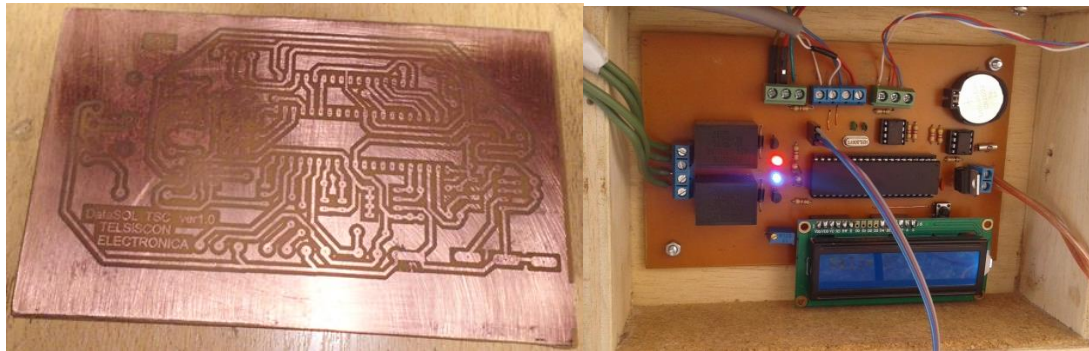
3.3 Ensamblaje de componentes

A la mesa principal o bastidor, se acoplan el absorbedor con envolvente de color verde y semitransparente, como se indica en la figura 22, donde la separación entre tubos concéntricos es de 36cm, con ángulo de inclinación del colector de 20° sobre la superficie horizontal.



Figura 22 Calentador solar con PET verde y transparente

En cuanto a la parte eléctrica en la figura 23 se muestra los componentes relacionados con el desarrollo del sistema de adquisición de datos.



a)

b)

Figura 23 Componentes electrónicos: a) Circuito PCB, b) Sistema electrónico de adquisición de datos compuesto por el microcontrolador, pantalla LCD, memoria EEPROM serial, reloj, sensores y actuadores.

CAPITULO 4

PRUEBAS OPERACIONALES

4.1 Parámetros de pruebas

4.1.1 Radiación solar en Ambato

En las aplicaciones de la energía solar térmica de baja temperatura, uno de los aspectos importantes consiste en el análisis adecuado del recurso solar local, por lo que se puede utilizar diversas técnicas: Datos de satélite, imágenes satelitales para su conversión en valores numéricos mediante el método de Angstrom-Prescot, datos de anuarios meteorológicos, mapas de radiación solar local, regional o nacional, programas informáticos (Isol, Isocad, Censolar), procedimientos matemáticos, medición utilizando los instrumentos conocidos como piranómetros para radiación difusa, con cinta metálica, piranómetro con movimiento en dos ejes, que utiliza el efecto SEEBECK para medir radiación directa. El principio de funcionamiento de este equipo, consiste en calentar con energía térmica un material bi metálico, el cual, debido al efecto de la temperatura genera micro voltajes entre sus bornes; para medir las horas de sol pico (HSP), o las horas de máxima insolación solar se utiliza el heliógrafo con concentrador esférico de cuarzo. También se consiguen aproximaciones mediante formulación matemática como el método de Page. Por otra parte, el sitio para realizar las pruebas es la ciudad de Ambato, cuya ubicación se indica en la figura 24.

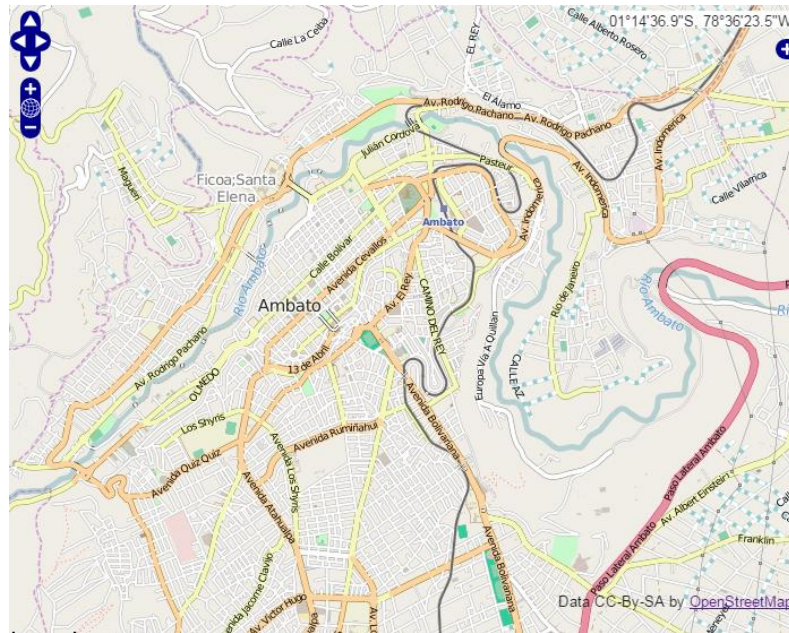


Figura 24 Sitio de ejecución de las pruebas del calentador de PET

Fuente: CIEMAT-UNET-IRSOLAR

Método de Angstrom-Page:

Para hallar la radiación solar en media diaria mensual, con el método de Page, es necesario ingresar el valor de la latitud del lugar, con el signo correspondiente. Es decir, para el hemisferio norte $+ \phi$, y para el hemisferio sur $- \phi$.

El albedo es una propiedad óptica que depende del tipo de suelo donde se instala los sistemas energéticos de prueba, por lo que si se utilizan las terrazas con piso de hormigón se toma un valor de reflectividad $\rho=0,4$.

La fórmula de Page, se completa con los factores climáticos donde $a=0,25$ y $b=0,45$ para la serranía ecuatoriana. A continuación, en la tabla 2 se encuentran los datos correspondientes a la radiación solar sobre superficie horizontal H_0 y la correspondiente radiación sobre superficie inclinada H , con $\beta=20^\circ$, con orientación norte sur.

Tabla 2

Radiación sobre superficie horizontal e inclinada, por el método de Page

Meses del año	Ho (Wh/m ² día)	H (Wh/m ² día)
Enero	4372,11	4702,12
Febrero	4497,54	4634,48
Marzo	4522,52	4402,43
Abril	4365,73	3976,08
Mayo	4110,87	3537,10
Junio	3952,40	3304,98
Julio	4010,65	3399,08
Agosto	4234,36	3770,62
Septiembre	4436,39	4215,86
Octubre	4475,27	4535,00
Noviembre	4381,33	4665,66
Diciembre	4311,13	4695,20

En la ciudad de Ambato, lugar donde se realizan las mediciones de los parámetros energéticos del captador de PET, calentado con energía solar, el peor mes de radiación corresponde a junio con $H_o = 3952,40$ Wh/m²día, $H = 3304,98$ Wh/m²día. Para este mes, la radiación sobre superficie inclinada es menor que sobre superficie horizontal. La irradiación puede ser simplificada a horas de sol pico si se utiliza como factor de conversión la media mundial de la irradiancia de $I = 1000$ W/m², con lo cual, las HSP para Ambato serían de 3,3 para el peor mes.

En la Figura 25, la curva de radiación sobre superficie inclinada en color rojo, empieza en enero con un valor de 4702,12 Wh/m²día, y en febrero empieza a decrecer en forma polinómica, para alcanzar su nivel mínimo en el mes de junio. En los meses posteriores empieza a aumentar su valor hasta el mes de diciembre que tiene un pico máximo de 4695,20 Wh/m²día

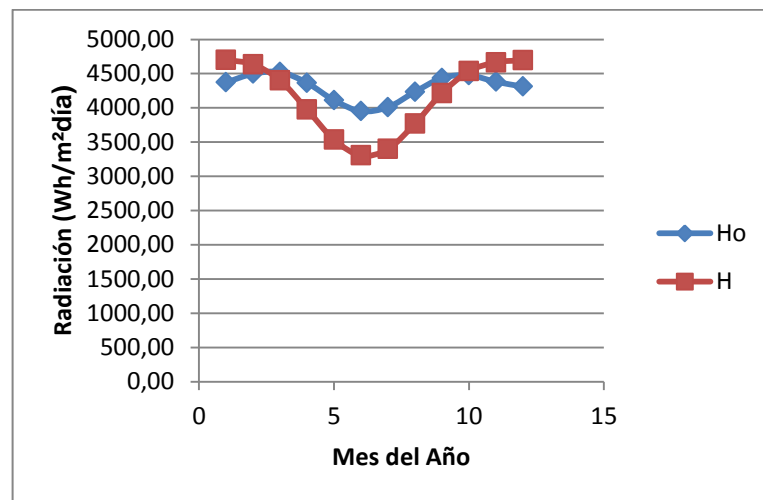


Figura 25 Comportamiento de la radiación solar para Ambato

Método Isocad:

Para utilizar este programa informático desarrollado por Isofotón, se necesita ingresar el nombre del país y la ciudad. En la tabla 3 el valor de latitud para la ciudad de Ambato es $\phi = -1.2$, y con esto se procede a calcular la irradiación solar en media diaria mensual sobre superficie horizontal. En este caso, el mes peor corresponde a junio con una insolación media de 3.97 horas.

Tabla 3

Datos de radiación solar sobre superficie horizontal, $\phi=-1.24^\circ$; $L=-78.617^\circ$

Localidad		Datos de radiación	
PAÍS		RADIACIÓN DIARIA MEDIA MENSUAL SOBRE SUPERFICIE HORIZONTAL	
ECUADOR		ENERO	4,64
CIUDAD		FEBRERO	4,56
AMBATO		MARZO	4,56
LATITUD		ABRIL	4,42
-1,2		MAYO	4,39
		JUNIO	3,97
		JULIO	4,28
		AGOSTO	4,5
		SEPTIEMBRE	4,5
		OCTUBRE	4,97
		NOVIEMBRE	5
		DICIEMBRE	4,81

Fuente: Isofotón, Málaga-España

Utilizando el mismo programa, se puede conocer los valores de radiación sobre superficie inclinada. Para el colector construido con PETs de color verde y transparente, con tubos concéntricos que se encuentran inclinados 20° con respecto a la horizontal, el mes peor de irradiación, se sitúa en Enero con un valor de máxima insolación de 3,96 horas. La orientación del captador es 180° , norte sur, el albedo del piso de hormigón de 0,4

Tabla 4

Datos de radiación solar sobre superficie inclinada, $\phi=-1.24^\circ$; $L=-78.617^\circ$

Datos de la localidad		Modelo de Radiación											
ECUADOR AMBATO LATITUD: -1,2		<input type="radio"/> Isotropico <input type="radio"/> Klutcher <input checked="" type="radio"/> Hay <input type="radio"/> Pérez <input checked="" type="radio"/> Page <input type="radio"/> Collares-Pereira <input type="radio"/> Frutos <input type="radio"/> Macagn											
Unidades de salida		Orientación y Reflexión											
<input checked="" type="radio"/> kWh/m ² <input type="radio"/> Langleys <input type="radio"/> MJ/m ²		Orientación: 180 0° Sur/180° Norte Albedo 0,4											
Inclinación	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Media anual
0°	4,64	4,56	4,56	4,42	4,39	3,97	4,28	4,5	4,5	4,97	5	4,81	4,55
5°	4,48	4,45	4,51	4,43	4,46	4,06	4,37	4,54	4,48	4,87	4,83	4,62	4,51
10°	4,32	4,35	4,47	4,45	4,55	4,15	4,46	4,6	4,47	4,78	4,67	4,43	4,47
15°	4,15	4,23	4,41	4,46	4,61	4,22	4,54	4,63	4,43	4,67	4,49	4,23	4,42
20°	3,96	4,09	4,33	4,44	4,64	4,28	4,59	4,64	4,38	4,53	4,29	4,02	4,35
25°	3,77	3,94	4,23	4,4	4,66	4,31	4,62	4,63	4,31	4,38	4,08	3,8	4,26
30°	3,56	3,77	4,11	4,35	4,65	4,32	4,63	4,59	4,22	4,21	3,85	3,56	4,15
35°	3,34	3,59	3,98	4,27	4,63	4,31	4,62	4,54	4,11	4,02	3,61	3,31	4,03
40°	3,1	3,4	3,83	4,18	4,58	4,29	4,58	4,46	3,98	3,81	3,36	3,05	3,89
45°	2,86	3,2	3,66	4,06	4,5	4,24	4,53	4,36	3,84	3,6	3,1	2,79	3,73
50°	2,62	2,98	3,49	3,93	4,41	4,17	4,45	4,25	3,68	3,37	2,83	2,54	3,56
55°	2,39	2,76	3,29	3,79	4,3	4,08	4,35	4,11	3,51	3,13	2,57	2,28	3,38
60°	2,16	2,54	3,09	3,62	4,16	3,98	4,22	3,96	3,33	2,88	2,31	2,05	3,19
65°	1,95	2,32	2,88	3,45	4,01	3,85	4,08	3,79	3,13	2,63	2,07	1,86	3
70°	1,82	2,11	2,66	3,26	3,84	3,71	3,92	3,6	2,93	2,37	1,88	1,79	2,82
75°	1,82	1,93	2,44	3,06	3,65	3,55	3,75	3,4	2,71	2,13	1,83	1,8	2,67
80°	1,82	1,87	2,22	2,85	3,45	3,38	3,56	3,19	2,49	1,92	1,84	1,81	2,53
85°	1,83	1,86	1,99	2,64	3,24	3,2	3,35	2,97	2,27	1,89	1,85	1,82	2,41
90°	1,83	1,86	1,86	2,41	3,01	3	3,13	2,74	2,04	1,89	1,86	1,82	2,29

Fuente: Isototón, Málaga-España

Con los datos de la tabla 4 las horas de sol pico, acorde con Isocad son:

- Junio, mes peor con 3.97 HSP, sobre superficie horizontal
- Enero, peor mes con 3.96 HSP, sobre superficie inclinada 20°

En la figura 26, se encuentra la curva característica de la irradiación solar en media diaria mensual para superficie horizontal

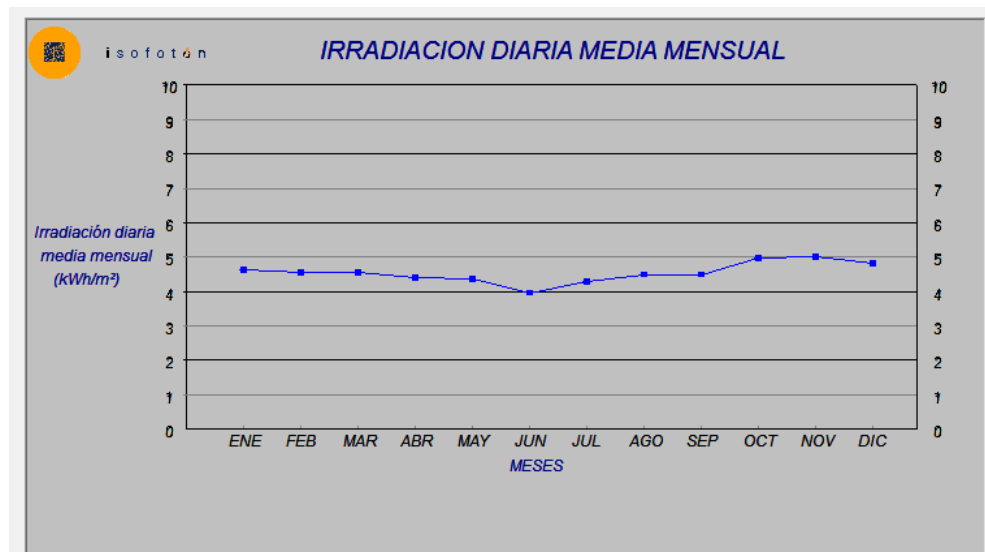


Figura 26 Irradiación media diaria mensual para la ciudad de Ambato;

Fuente: Isofotón, Málaga-España

El peor mes de irradiancia solar sobre superficie horizontal, es junio con un valor de 3,97 Kwh/m² día; en los meses de julio a noviembre, el valor de la irradiación, crece en forma lineal, en noviembre alcanza su pico máximo de 5 Kwh/m² día, en cuanto a las horas de sol pico su valor mínimo es 3,97h.

Nasa Earth Observatory:

La Nasa presenta imágenes de irradiancia promedio diaria, a nivel global. En la figura 27, el rango de variación es de 0 a 280 W/m², no se toman datos con este procedimiento porque no considera los microclimas.

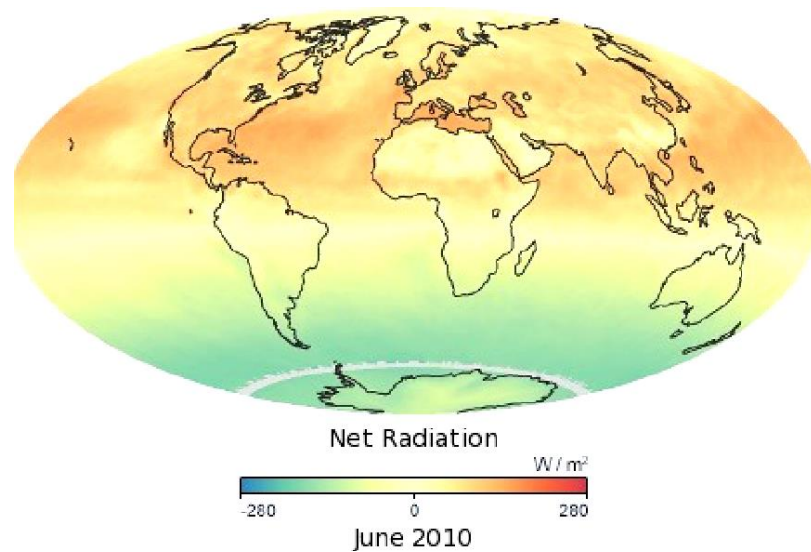


Figura 27 Irradiancia solar neta para el mes de junio
Fuente: NASA EARTH OBSERVATORY

Mapa del INAMHI:

El valor de isorradiación solar anual, que se encuentra en el mapa del INAMHI, para la ciudad de Ambato es de 4000 Wh/m²día, por lo que estableciendo $E = I HSP$, con $I = 1000 \text{ W/m}^2$, las HSP=4 horas. Este valor se corrige para superficie inclinada con la siguiente expresión matemática:

$$G_{dm}(20) = AG_{dm}(0) + B[G_{dm}(0)]^2$$

El coeficiente A es constante para todo el año, con reflectividad del suelo $\rho = 0,4$ y ángulo de inclinación $\beta = +20^\circ$, $A=0,972$. Para hallar B, se toma como referencia el mes de junio, por lo que $B=-0,03$, $G_{dm}(0^\circ) = 4 \text{ kWh/m}^2\text{día}$, reemplazando valores, se tiene $G_{dm}(20) = 3,4 \text{ kWh/m}^2\text{día}$, o en la medida de insolación en media diaria mensual, HSP=3,4 horas.

Con los procedimientos de determinación de la radiación solar, indicados anteriormente se caracteriza el recurso solar para la ciudad de Ambato, de la siguiente manera:

Método de Page: mes peor, junio con HSP=3,3h

Isocad: mes peor enero, HSP=3,96h

Mapa del INAMHI: mes peor junio, HSP=3,4

Para la estimación de la radiación solar sobre superficie inclinada, se seleccionan los métodos de Page y del Mapa del Inamhi, porque coinciden en determinar a junio como el peor mes de insolación solar para la ciudad de Ambato.

Medición de irradiancia solar:

Tabla 5

Promedio de datos de pruebas realizadas

N°	RADIACION (W/m ²)	PET VERDE						PET TRANSPARENTE						HR %	Tamb °C
		Q1 (l/min)	Q2 (l/min)	T1 °C	T2 °C	T3 °C	T4 °C	T5 °C	T6 °C	T7 °C	T8 °C	T9 °C	T10 °C		
PRUEBA 1	216.38	2.45	2.26	28.87	34.56	33.71	29.33	28.50	28.66	33.88	35.07	28.56	28.11	47.94	22.16
PRUEBA 2	126.06	2.90	2.61	26.23	32.01	29.96	27.22	26.73	26.16	32.23	31.57	27.50	26.41	53.54	20.98
PRUEBA 3	109.05	2.85	2.49	26.61	32.06	30.44	27.17	26.32	26.48	32.55	31.98	27.75	26.01	55.08	20.67
PRUEBA 4	525.84	5.60	5.17	30.82	41.47	36.50	33.69	31.29	30.76	42.54	39.51	34.28	30.98	47.51	24.36
PRUEBA 5	708.04	6.23	5.70	32.40	44.41	38.69	35.24	32.60	32.29	44.99	42.00	35.24	32.33	44.95	24.58
PRUEBA 6	221.40	2.64	2.49	23.95	27.82	26.75	24.76	24.50	23.86	27.89	27.77	24.94	24.14	51.65	20.24
PRUEBA 7	473.20	5.42	5.04	28.92	38.67	33.63	31.54	29.45	28.88	40.48	36.61	33.03	29.10	45.98	24.02
PRUEBA 8	397.32	3.74	3.50	26.13	32.08	29.74	27.46	26.62	26.04	32.11	31.12	27.56	26.26	50.88	21.24
PRUEBA 9	116.98	2.78	2.64	19.86	24.33	23.04	21.25	20.48	19.76	24.11	24.05	21.36	20.07	81.51	17.01
PRUEBA 10	146.95	3.81	3.49	24.68	31.64	28.75	27.09	25.45	24.52	31.15	30.07	26.88	24.97	66.15	20.01
PRUEBA 11	412.47	4.42	4.13	28.48	36.53	32.98	30.92	28.86	28.42	36.34	34.90	30.51	28.52	54.53	22.39
PRUEBA 12	91.36	2.89	2.67	22.79	29.50	26.69	24.39	23.44	22.70	29.42	27.96	24.57	22.98	66.87	18.64
PRUEBA 13	443.28	4.85	4.37	28.88	36.89	33.67	31.04	29.39	28.79	36.46	35.75	30.35	29.06	48.85	22.47
PRUEBA 14	311.62	4.14	3.69	25.43	30.86	29.13	26.28	26.04	25.34	31.04	30.59	26.54	25.64	54.59	19.98
PROMEDIO	307.14	3.91	3.59	26.72	33.77	30.98	28.38	27.12	26.62	33.94	32.78	28.50	26.75	55.00	21.34

Considerando los datos de irradiancia solar medidos con el piranómetro, para la ciudad de Ambato, se tiene un valor promedio diario de $I=307.14 \text{ W/m}^2$ que es bajo si se compara con la media mundial de la irradiancia, de $I=1000 \text{ W/m}^2$. Esto se debe a que la climatología local presenta nubosidad constante, y las mediciones se han realizado durante

todo el día, y no solo las que correspondan a las horas de máxima insolación.

Tabla 6
Valores máximos y mínimos de datos de medidos

N°	RADIAC. (W/m ²)	PET VERDE						PET TRANSPARENTE						HR %	Tamb °C
		Q1 (l/min)	Q2 (l/min)	T1 °C	T2 °C	T3 °C	T4 °C	T5 °C	T6 °C	T7 °C	T8 °C	T9 °C	T10 °C		
PRUEBA 1	216.38	2.45	2.26	28.87	34.56	33.71	29.33	28.50	28.66	33.88	35.07	28.56	28.11	47.94	22.16
PRUEBA 2	126.06	2.90	2.61	26.23	32.01	29.96	27.22	26.73	26.16	32.23	31.57	27.50	26.41	53.54	20.98
PRUEBA 3	109.05	2.85	2.49	26.61	32.06	30.44	27.17	26.32	26.48	32.55	31.98	27.75	26.01	55.08	20.67
PRUEBA 4	525.84	5.60	5.17	30.82	41.47	36.50	33.69	31.29	30.76	42.54	39.51	34.28	30.98	47.51	24.36
PRUEBA 5	708.04	6.23	5.70	32.40	44.41	38.69	35.24	32.60	32.29	44.99	42.00	35.24	32.33	44.95	24.58
PRUEBA 6	221.40	2.64	2.49	23.95	27.82	26.75	24.76	24.50	23.86	27.89	27.77	24.94	24.14	51.65	20.24
PRUEBA 7	473.20	5.42	5.04	28.92	38.67	33.63	31.54	29.45	28.88	40.48	36.61	33.03	29.10	45.98	24.02
PRUEBA 8	397.32	3.74	3.50	26.13	32.08	29.74	27.46	26.62	26.04	32.11	31.12	27.56	26.26	50.88	21.24
PRUEBA 9	116.98	2.78	2.64	19.86	24.33	23.04	21.25	20.48	19.76	24.11	24.05	21.36	20.07	81.51	17.01
PRUEBA 10	146.95	3.81	3.49	24.68	31.64	28.75	27.09	25.45	24.52	31.15	30.07	26.88	24.97	66.15	20.01
PRUEBA 11	412.47	4.42	4.13	28.48	36.53	32.98	30.92	28.86	28.42	36.34	34.90	30.51	28.52	54.53	22.39
PRUEBA 12	91.36	2.89	2.67	22.79	29.50	26.69	24.39	23.44	22.70	29.42	27.96	24.57	22.98	66.87	18.64
PRUEBA 13	443.28	4.85	4.37	28.88	36.89	33.67	31.04	29.39	28.79	36.46	35.75	30.35	29.06	48.85	22.47
PRUEBA 14	311.62	4.14	3.69	25.43	30.86	29.13	26.28	26.04	25.34	31.04	30.59	26.54	25.64	54.59	19.98
MINIMO	91.36	2.45	2.26	19.86	24.33	23.04	21.25	20.48	19.76	24.11	24.05	21.36	20.07	44.95	17.01
MAXIMO	708.04	6.23	5.70	32.40	44.41	38.69	35.24	32.60	32.29	44.99	42.00	35.24	32.33	81.51	24.58

En la tabla 6, el valor mínimo de irradiancia solar es de 91,36 W/m², y el máximo alcanza 708,04 W/m².

4.1.2 Variables de medición del colector de PET

Luego del análisis de los parámetros energéticos más representativos, que deben tomarse en el banco de ensayos térmicos de PET, se indican los siguientes:

Colector con cubierta de PET color verde:

T_1 Temperatura de entrada del agua fría por la parte inferior del ICTC

T_2 Temperatura de la cubierta de PET

T_3 Temperatura de la superficie del tubo de polietileno de 1"

T_4 Temperatura del aire estancado entre la cubierta de PET color verde y el tubo de polietileno

T_5 Temperatura de salida del agua caliente al tanque de acumulación

Colector con cubierta de PET semitransparente:

T_6 Temperatura de entrada del agua fría por la parte inferior del ICTC

T_7 Temperatura de la cubierta de PET

T_8 Temperatura de la superficie del tubo de polietileno de 1"

T_9 Temperatura del aire estancado entre la cubierta de PET semitransparente y el tubo de polietileno

T_{10} Temperatura de salida del agua caliente al tanque de acumulación

4.2 Procedimiento de pruebas

En el levantamiento de parámetros energéticos del sistema de calentamiento de agua utilizando absorbedores de PET, se sigue el organigrama de procesos de la figura 28 que se detalla a continuación.

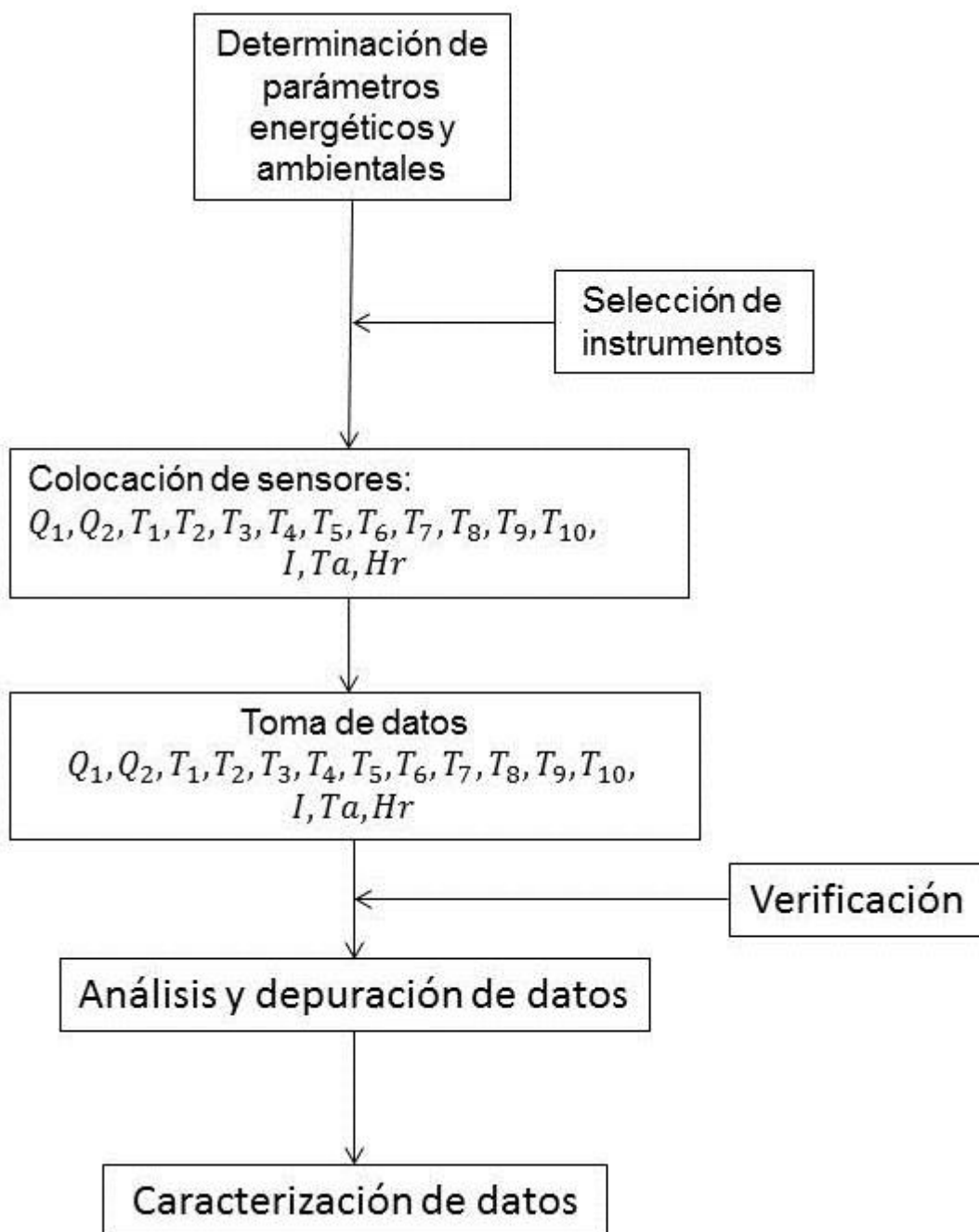


Figura 28 Diagrama de operaciones para levantamiento de datos, utilizando el absorbedor de tubos concéntricos con PET verde y transparente

4.3 Equipo utilizado

Para la investigación de variables energéticas del calentador de agua con absorbedores de PET, se establecen las características técnicas que se indican en la figura 29.

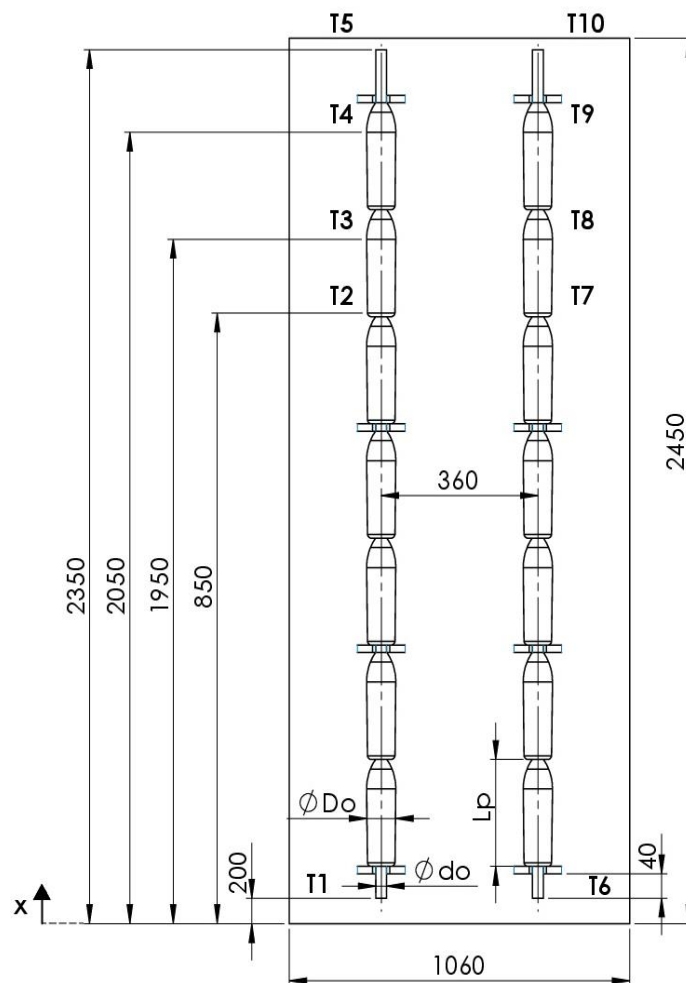


Figura 29 Ubicación de sensores de temperatura de T1 a T5 correspondientes al absorbedor con PET color verde, y T6 a T10 para el absorbedor de PET transparente.

El capítulo 3, contiene los procedimientos utilizados durante el desarrollo e implementación del sistema experimental para ensayos térmicos

de los captadores solares utilizando absorbedores concéntricos de PET verde y transparente, a continuación, en la figura 30 se muestran los componentes del calentador y sus subsistemas.



Figura 30 Prototipo experimental para pruebas térmicas del calentador de PET

Los componentes de este calentador solar son: acumulador de agua caliente sanitaria, capacidad de 25 litros, colector solar con envoltente de PET verde y transparente, sistema de adquisición de datos, panel fotovoltaico para accionar la bomba sumergible que se encuentra en el interior del acumulador.

4.4 Levantamiento de datos

En el Anexo B, se registran las tablas con los datos de: caudal, temperaturas de entrada y salida del agua de los dos calentadores de PET verde y transparente, temperatura superficial de la manguera de polietileno,

temperatura de cubierta cilíndrica de PET, temperatura del aire que se encuentra en la región anular, donde se produce el efecto invernadero entre envolvente y tubería interior.

4.5 Determinación de parámetros operacionales

Tabla 7

Parámetros funcionales del calentador de agua, con captador de PET y polietileno

ORDEN	DESCRIPCIÓN	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS
1	Número de PETs	7 verdes, 7 semitransparentes
2	Capacidad térmica unitaria	9 Wt a 12 Wt por cilindro de PET
3	Inclinación del calentador	20° con respecto a la horizontal
4	Irradiancia promedio	307.14 W/m ²
5	T_1 y T_6 entrada del fluido, verde y del pet transparente	$T_1 = 26.72\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_6 = 26.62\text{ }^{\circ}\text{C}$
6	T_2 , T_7 temperaturas de cubierta PET verde y transparente	$T_2 = 33.77\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_7 = 33.94\text{ }^{\circ}\text{C}$
7	T_3 , T_8 temperaturas superficial del tubo de polietileno de color negro	$T_3 = 30.98\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_8 = 32.78\text{ }^{\circ}\text{C}$
8	T_4 , T_9 temperatura del aire estancado bajo el PET verde y transparente	$T_4 = 28.38\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_9 = 28.50\text{ }^{\circ}\text{C}$
9	T_5 , T_{10} temperatura de salida del agua caliente	$T_5 = 27.12\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{10} = 26.75\text{ }^{\circ}\text{C}$

CAPITULO 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Datos Obtenidos

Para determinar los parámetros energéticos del calentador solar con captadores de tubos concéntricos, con envolturas de PET de color verde y Transparente, se realizaron 20 pruebas, de las cuales, después de un proceso de depuración de datos se establecieron como datos válidos los correspondientes a 14 pruebas. Las principales variables medidas son el caudal medido con sensores de efecto HALL, la irradiancia solar con piranómetro para radiación global, las temperaturas del agua, aire estancado, superficies de las cubiertas cilíndricas de PET, y los tubos de polietileno, con sensores DS18B20. El tiempo de referencia para la medición de datos, se calibró en 20 seg. Durante este tiempo, los datos se fueron almacenando en una memoria EEPROM, de tipo serial. Luego de cada ensayo se pasaron los datos al PC, a través de un cable USB, vaciando los datos anteriores y dando un nuevo formato para su posterior análisis. La depuración de datos se realizó para un tiempo de 10 min., con el cual se estructuraron las 14 tablas de ensayos. En el Anexo B, se muestran los promedios de los datos obtenidos.

Para realizar los análisis de datos, estadísticas y cálculos se utilizan como referencia los datos de ensayo de la prueba 1, que se indican en las Tablas 8 y 9.

Tabla 8
Datos de pruebas térmicas del calentador con PET verde, Prueba 1

ORDEN	Tiempo		I (W/m2)	Q1 (l/min)	Q2 (l/min)	PET VERDE					HR %	Tamb °C
	(hora)	(min)				T1	T2	T3	T4	T5		
						°C	°C	°C	°C	°C		
1	10	26	108,34	0,00	1,78	20,50	30,16	27,52	25,68	21,54	62,93	19,70
2	10	36	104,89	0,80	2,03	20,95	28,25	24,53	24,12	21,33	61,60	19,80
3	10	46	135,08	4,49	3,96	21,86	33,44	26,88	27,41	22,27	60,27	20,37
4	10	56	129,09	2,50	2,81	22,60	31,30	26,51	26,19	22,96	58,60	20,40
5	11	6	136,04	4,03	3,66	23,26	32,66	27,81	27,12	23,63	58,23	20,40
6	11	16	155,97	5,43	4,54	24,70	43,55	32,50	33,02	25,18	55,77	21,67
7	11	26	155,31	4,50	3,76	25,90	41,04	32,05	31,74	26,27	51,27	22,13
8	11	36	146,36	5,25	4,56	26,77	41,53	32,94	32,28	27,20	49,07	22,57
9	11	46	133,14	4,30	3,68	27,76	41,06	32,84	32,69	28,13	47,00	23,63
10	11	56	145,23	5,25	4,42	28,23	38,39	32,95	30,74	28,55	47,67	22,17
11	12	6	152,23	4,07	3,49	28,75	37,44	33,03	30,43	29,00	46,70	22,53
12	12	16	161,86	5,14	4,25	29,53	43,40	35,47	33,98	29,90	46,17	23,83
13	12	26	148,11	2,84	2,73	29,91	36,52	33,48	30,58	30,12	45,97	23,30
14	12	36	219,31	2,16	2,14	29,80	32,74	32,65	28,51	29,96	46,20	22,40
15	12	46	120,49	4,44	3,83	29,82	34,96	33,35	29,68	30,02	46,57	22,43
16	12	56	159,23	4,85	4,14	29,98	36,00	33,87	30,33	30,18	46,33	22,67
17	13	6	180,21	5,25	4,52	30,59	41,13	35,63	33,48	30,86	45,87	23,73
18	13	16	189,93	3,35	3,01	30,83	36,72	34,57	30,92	31,01	45,50	23,00
19	13	26	164,45	2,72	2,59	30,65	33,47	33,69	29,27	30,79	46,27	22,30
20	13	36	152,05	2,87	2,63	30,60	34,40	33,85	30,11	30,80	45,93	22,87
21	13	46	159,49	2,71	2,56	30,54	33,99	33,75	29,60	30,70	45,67	22,73
22	13	56	151,10	3,09	2,78	30,53	34,79	33,86	30,09	30,73	45,97	22,83
23	14	6	157,33	4,79	4,07	30,76	37,95	35,17	31,79	31,01	45,73	23,13
24	14	16	284,47	3,24	2,98	31,16	38,70	35,63	31,84	31,34	45,03	23,47
25	14	26	192,90	4,22	3,78	31,60	42,82	37,94	33,85	31,94	44,70	24,10
26	14	36	508,83	3,67	3,44	32,89	48,78	40,12	36,97	33,19	43,27	25,90
27	14	46	364,71	2,83	2,58	33,24	42,58	38,49	33,82	33,50	43,22	25,44
28	14	56	356,40	4,55	4,17	33,93	45,60	41,12	35,31	34,18	43,23	24,77
29	15	6	523,88	5,13	4,70	35,05	51,14	43,78	38,74	35,31	43,00	25,73
30	15	16	608,33	4,64	4,29	35,54	46,38	42,86	35,80	35,70	43,60	24,40
31	15	26	568,77	5,29	4,77	36,25	49,95	44,49	38,78	36,48	42,90	25,63
32	15	36	620,72	3,93	3,57	36,95	49,13	44,36	39,23	37,19	42,47	26,63
33	15	46	554,93	1,01	0,94	36,75	42,64	41,91	35,54	37,29	41,97	26,00
34	15	56	340,03	0,00	0,00	34,10	32,65	38,45	29,40	36,16	43,17	23,87
35	16	6	152,11	0,66	0,66	33,69	32,18	37,88	29,21	34,89	43,97	22,73
36	16	16	193,01	0,00	0,00	33,79	32,55	37,53	29,33	35,03	44,37	22,67
37	16	26	213,48	0,12	0,13	31,98	29,48	35,47	27,37	32,87	44,90	22,10
38	16	36	169,44	0,77	0,75	32,80	34,68	37,72	30,94	33,15	44,77	22,23
39	16	46	316,22	0,10	0,42	32,85	36,78	38,97	32,52	33,18	45,00	22,00
40	16	56	375,78	0,02	0,03	32,89	40,41	41,02	35,67	33,62	44,67	22,30
41	17	6	507,43	0,00	0,00	32,65	39,57	40,80	35,67	34,52	44,77	22,27
42	17	16	472,01	0,00	0,00	30,84	27,60	34,19	26,02	31,34	45,27	21,07
43	17	26	168,52	0,00	0,00	27,69	22,14	31,20	22,12	22,21	46,50	20,00
44	17	36	28,13	0,00	0,00	25,17	20,60	29,32	20,99	19,46	47,20	19,40
45	17	46	14,91	0,00	0,00	23,50	19,67	27,73	20,21	18,53	48,00	19,00
46	17	56	13,69	0,00	0,00	22,28	18,83	26,26	19,49	17,91	48,37	19,00
47	18	6	8,74	0,00	0,00	21,39	18,05	24,95	18,79	17,44	49,47	18,57
Promedio			234,53	2,66	2,45	29,66	36,12	34,70	30,37	29,54	47,34	22,55
Valor máximo			620,72	5,43	4,77	36,95	51,14	44,49	39,23	37,29	62,93	26,63
Valor mínimo			8,74	0,00	0,00	20,50	18,05	24,53	18,79	17,44	41,97	18,57

Tabla 9

Datos de pruebas térmicas del calentador solar con PET transparente, prueba 1

ORDEN	Tiempo		I (W/m2)	Q1 (l/min)	Q2 (l/min)	T6 °C	PET TRANSPARENTE				HR %	Tamb °C
	(hora)	(min)					T7 °C	T8 °C	T9 °C	T10 °C		
1	10	26	108,34	0,00	1,78	20,48	30,61	29,76	26,05	21,06	62,93	19,70
2	10	36	104,89	0,80	2,03	20,92	28,59	26,08	24,21	20,97	61,60	19,80
3	10	46	135,08	4,49	3,96	21,86	34,97	29,70	27,97	21,96	60,27	20,37
4	10	56	129,09	2,50	2,81	22,55	31,60	28,33	26,48	22,63	58,60	20,40
5	11	6	136,04	4,03	3,66	23,22	33,08	29,78	27,37	23,32	58,23	20,40
6	11	16	155,97	5,43	4,54	24,71	45,27	36,52	34,05	24,89	55,77	21,67
7	11	26	155,31	4,50	3,76	25,86	41,99	35,40	32,45	25,98	51,27	22,13
8	11	36	146,36	5,25	4,56	26,74	42,20	35,88	32,91	26,91	49,07	22,57
9	11	46	133,14	4,30	3,68	27,70	41,35	35,77	33,66	27,87	47,00	23,63
10	11	56	145,23	5,25	4,42	28,15	38,58	35,42	31,93	28,28	47,67	22,17
11	12	6	152,23	4,07	3,49	28,66	37,67	35,40	31,34	28,73	46,70	22,53
12	12	16	161,86	5,14	4,25	29,47	43,71	38,44	34,73	29,63	46,17	23,83
13	12	26	148,11	2,84	2,73	29,79	36,82	35,45	31,06	29,83	45,97	23,30
14	12	36	219,31	2,16	2,14	29,68	32,97	33,95	28,89	29,68	46,20	22,40
15	12	46	120,49	4,44	3,83	29,71	35,21	35,07	29,89	29,74	46,57	22,43
16	12	56	159,23	4,85	4,14	29,87	36,15	35,76	30,51	29,90	46,33	22,67
17	13	6	180,21	5,25	4,52	30,50	41,06	38,31	33,70	30,59	45,87	23,73
18	13	16	189,93	3,35	3,01	30,70	36,39	36,39	30,86	30,72	45,50	23,00
19	13	26	164,45	2,72	2,59	30,52	33,15	34,81	29,17	30,52	46,27	22,30
20	13	36	152,05	2,87	2,63	30,48	34,13	35,05	29,97	30,52	45,93	22,87
21	13	46	159,49	2,71	2,56	30,41	33,76	34,93	29,43	30,43	45,67	22,73
22	13	56	151,10	3,09	2,78	30,40	34,60	35,20	29,99	30,44	45,97	22,83
23	14	6	157,33	4,79	4,07	30,66	37,55	37,06	31,43	30,73	45,73	23,13
24	14	16	284,47	3,24	2,98	31,04	38,07	37,78	31,44	31,08	45,03	23,47
25	14	26	192,90	4,22	3,78	31,50	41,31	40,38	32,53	31,61	44,70	24,10
26	14	36	508,83	3,67	3,44	32,79	46,88	44,01	35,92	32,92	43,27	25,90
27	14	46	364,71	2,83	2,58	33,12	41,30	41,14	32,94	33,20	43,22	25,44
28	14	56	356,40	4,55	4,17	33,81	43,92	44,20	33,44	33,89	43,23	24,77
29	15	6	523,88	5,13	4,70	34,93	48,99	47,61	36,09	35,04	43,00	25,73
30	15	16	608,33	4,64	4,29	35,38	44,32	45,91	33,51	35,41	43,60	24,40
31	15	26	568,77	5,29	4,77	36,11	47,11	47,55	35,24	36,18	42,90	25,63
32	15	36	620,72	3,93	3,57	36,80	46,19	46,90	35,76	36,90	42,47	26,63
33	15	46	554,93	1,01	0,94	36,51	40,06	43,58	33,30	36,84	41,97	26,00
34	15	56	340,03	0,00	0,00	33,76	31,12	38,55	28,31	35,09	43,17	23,87
35	16	6	152,11	0,66	0,66	33,32	30,56	37,71	27,61	33,95	43,97	22,73
36	16	16	193,01	0,00	0,00	33,46	30,82	37,76	27,74	33,93	44,37	22,67
37	16	26	213,48	0,12	0,13	31,69	28,10	35,19	26,09	31,90	44,90	22,10
38	16	36	169,44	0,77	0,75	32,57	32,90	38,10	28,12	32,58	44,77	22,23
39	16	46	316,22	0,10	0,42	32,67	34,75	39,57	28,94	32,62	45,00	22,00
40	16	56	375,78	0,02	0,03	32,76	38,09	41,75	30,69	32,73	44,67	22,30
41	17	6	507,43	0,00	0,00	32,39	37,13	41,13	30,63	32,65	44,77	22,27
42	17	16	472,01	0,00	0,00	30,18	26,25	33,61	24,87	31,36	45,27	21,07
43	17	26	168,52	0,00	0,00	27,31	21,25	29,84	21,50	23,89	46,50	20,00
44	17	36	28,13	0,00	0,00	24,61	19,83	27,99	20,40	19,42	47,20	19,40
45	17	46	14,91	0,00	0,00	22,92	18,97	26,46	19,63	18,04	48,00	19,00
46	17	56	13,69	0,00	0,00	21,75	18,21	25,01	18,91	17,35	48,37	19,00
47	18	6	8,74	0,00	0,00	20,88	17,47	23,78	18,22	16,86	49,47	18,57
48	18	16	9,16	0,00	0,00	20,10	16,51	22,52	17,37	16,24	50,90	18,00
49	18	26	2,54	0,00	0,00	19,41	15,89	21,49	16,80	15,76	52,70	17,83
50	18	36	0,62	0,00	0,00	18,78	15,53	20,63	16,41	15,51	57,10	17,57
51	18	46	0,15	0,00	0,00	18,21	15,13	19,95	16,01	15,30	59,00	17,00
Promedio			216,38	2,45	2,26	28,66	33,88	35,07	28,56	28,11	47,94	22,16
Valor máximo			620,72	5,43	4,77	36,80	48,99	47,61	36,09	36,90	62,93	26,63
Valor mínimo			0,15	0,00	0,00	18,21	15,13	19,95	16,01	15,30	41,97	17,00

5.2 Estadísticas

En la figura 31 se realizan los gráficos de temperatura de entrada y salida del agua del captador de PET color verde y la temperatura del ambiente.

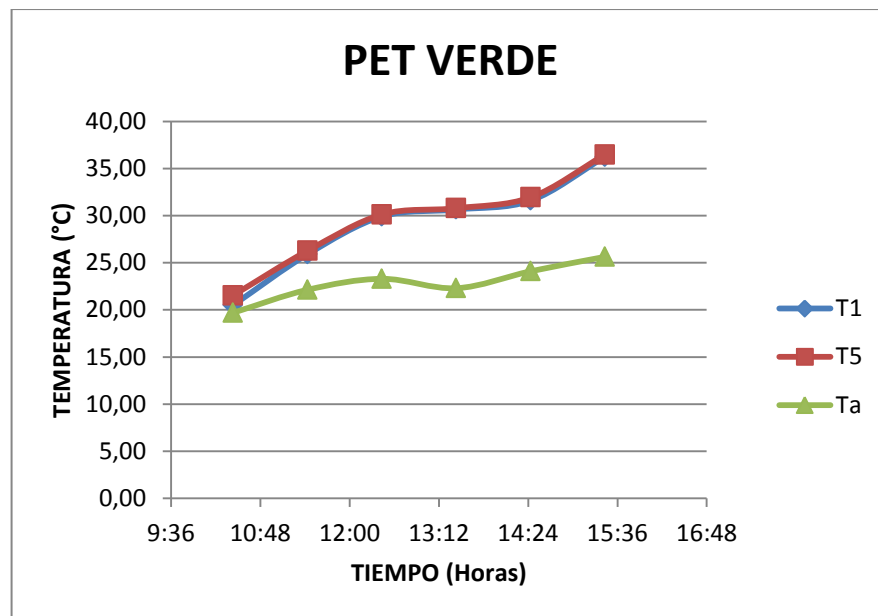


Figura 31 Temperaturas de entrada (T1) y salida (T5) del fluido, PET verde

Durante el proceso de calentamiento del agua, en el calentador con envoltorio de PET verde, la temperatura inicial de entrada del agua del colector al colector es de 20,50 °C, a las 10:26 AM, luego alcanza una temperatura de salida del colector de 37,29°C, a las 15:46 PM, durante un tiempo de 5 horas con 30 minutos. En este calentador se consigue un incremento de temperatura del fluido de 16,79 °C. En esta prueba, La irradiancia promedio diaria es de 216,38 W/m².

Para el mismo tipo de calentador, en la figura 32, se realizan los gráficos de temperatura del agua en la entrada (T1) y la salida (T5), la de cubierta de PET (T2), tubo de polietileno (T3), Temperatura del aire de la región anular (T4).

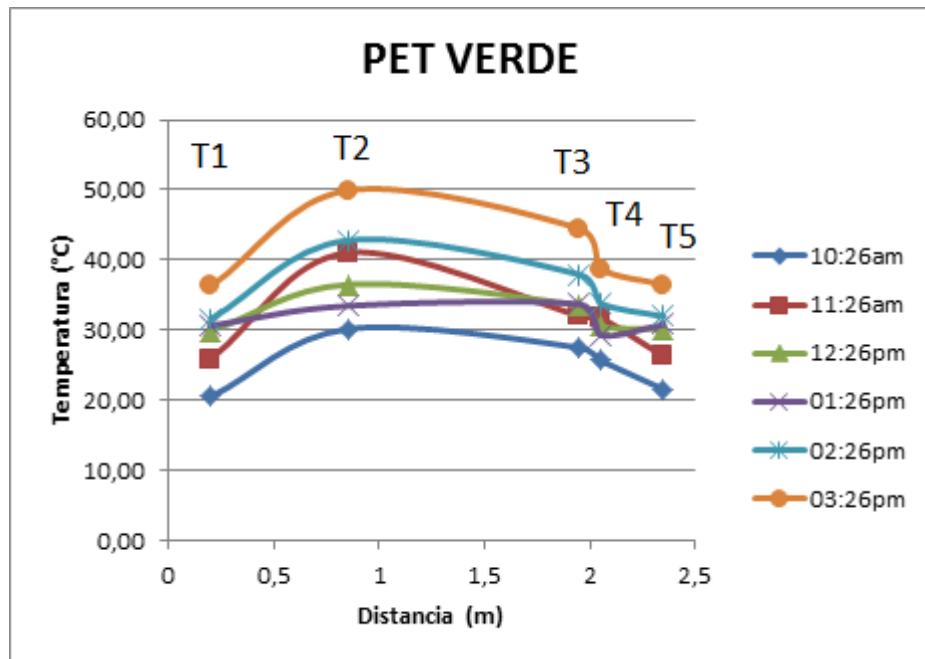


Figura 32 Perfil de Temperaturas, PET verde

La temperatura de cubierta T2, pasa de 30,16 °C, a las 10:26 AM, hasta el valor de 49,95 °C, a las 3:26 PM, en cuanto a la temperatura del tubo, T3 aumenta desde 27,52 °C, a 44,99 °C. La del aire interno de la región anular de 25,68 °C a 38,78 °C, con un incremento de temperatura del aire de 13,1 °C.

El perfil de temperaturas del calentador de PET transparente, se encuentra en la figura 33. Durante el proceso de calentamiento del agua, en el calentador con envolvente de PET transparente, la temperatura inicial de entrada del agua del colector al colector es de 20,48 °C, a las 10:26 AM, luego alcanza una temperatura de salida del colector de 36,90°C, a las 15:36 PM, durante un tiempo de 5 horas con 20 minutos. En este calentador se consigue un incremento de temperatura del fluido de 16,42 °C. En esta prueba, La irradiancia promedio diaria es de 216,38 W/m².

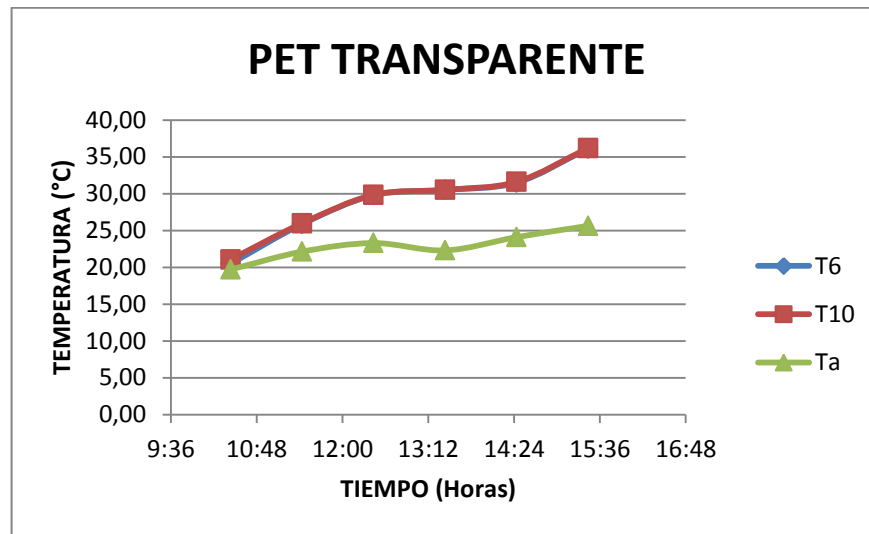


Figura 33 Temperaturas de entrada (T6) y salida (T10) del fluido, PET transparente

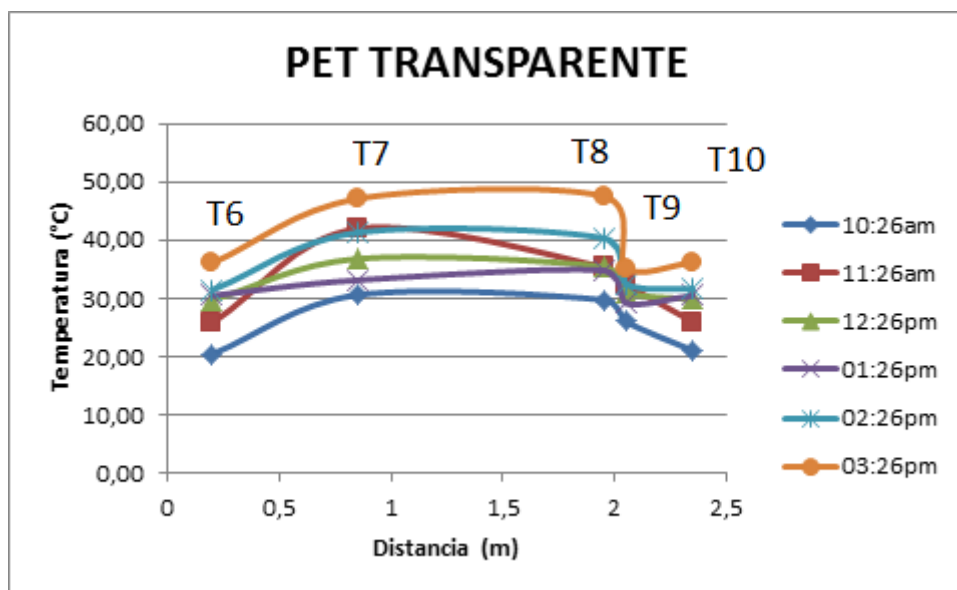


Figura 34 Perfil de Temperaturas, PET transparente

La temperatura de cubierta T7, pasa de 33,15 °C, a las 10:26 AM, hasta el valor de 47,11 °C, a las 3:26 PM, en cuanto a la temperatura del tubo, T8 aumenta desde 29,76 °C, a 47,55°C. La del aire interno de la región anular de 26,05 °C a 35,24 °C, con un incremento de temperatura del aire de 9,19 °C.

Variación del caudal con la irradiancia solar:

I (W/m ²)	Q1 (l/min)
108.34	0.00
155.31	4.50
148.11	2.84
164.45	2.72
192.90	4.22

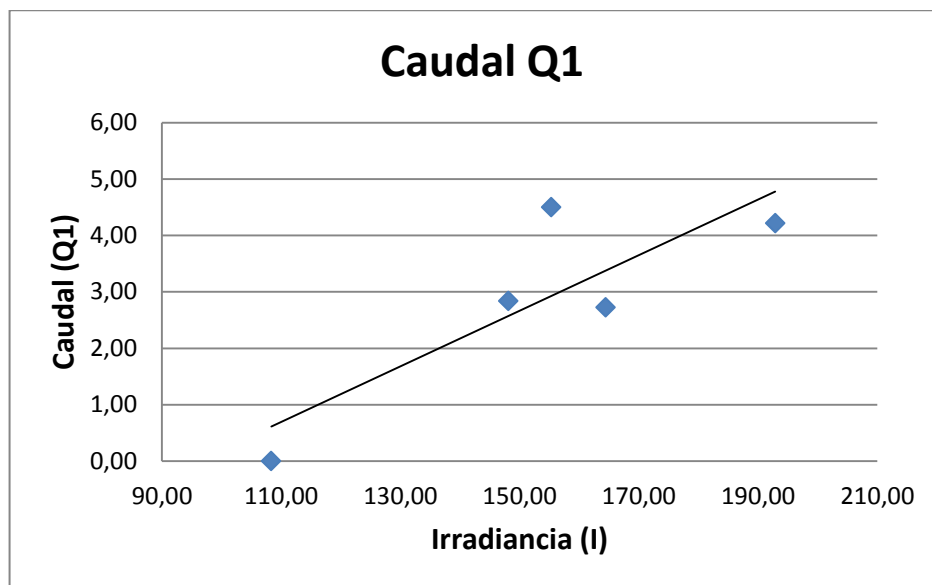


Figura 35 Caudal e irradiancia solar, calentador con PET verde. En el ensayo se pudo observar que al aumentar la irradiancia solar, también aumenta el caudal, es decir, existe una relación directa.

Variación de la temperatura de cubierta de PET verde, tubo de polietileno, aire con la irradiancia solar:

CUBIERTA T2 °C	TUBO T3 °C	AIRE T4 °C	I (W/m ²)
30.16	27.52	25.68	108.34
41.04	32.05	31.74	155.31
33.47	33.69	29.27	148.11
42.82	37.94	33.85	164.45
49.95	44.49	38.78	192.9

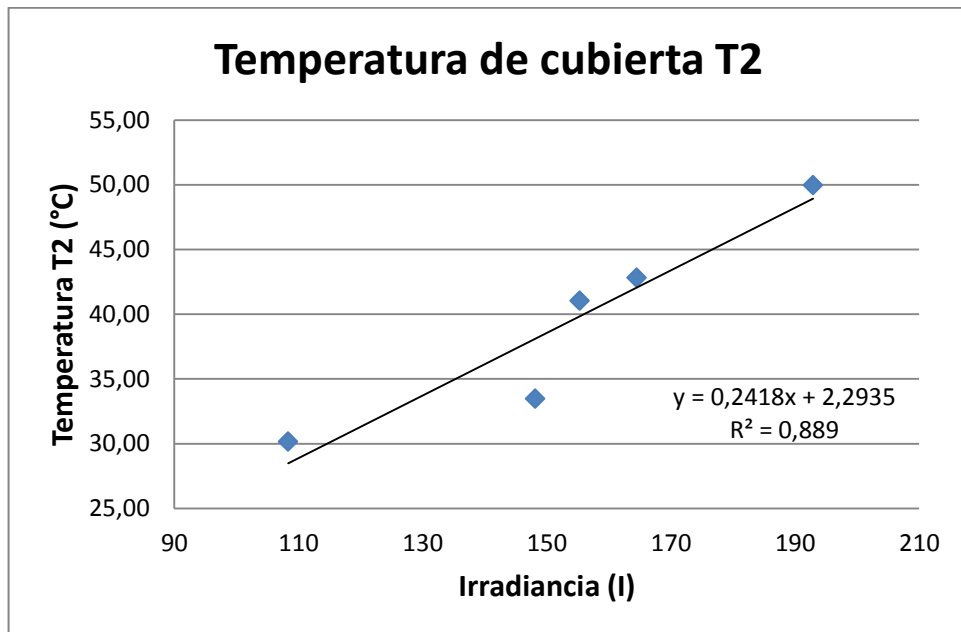


Figura 36 Temperatura de cubierta e irradiación solar, calentador con PET verde

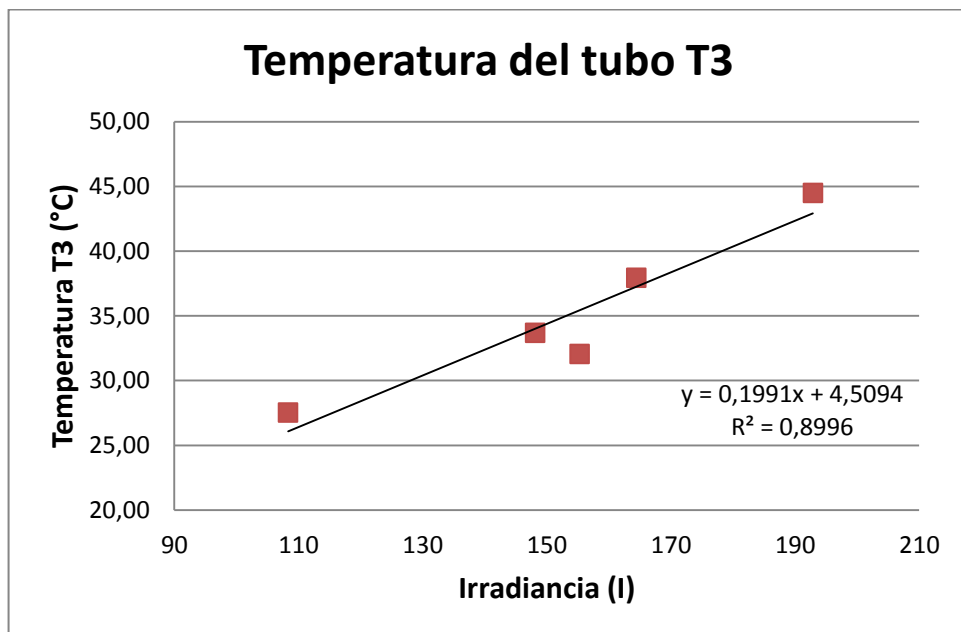


Figura 37 Temperatura superficial del tubo de polietileno

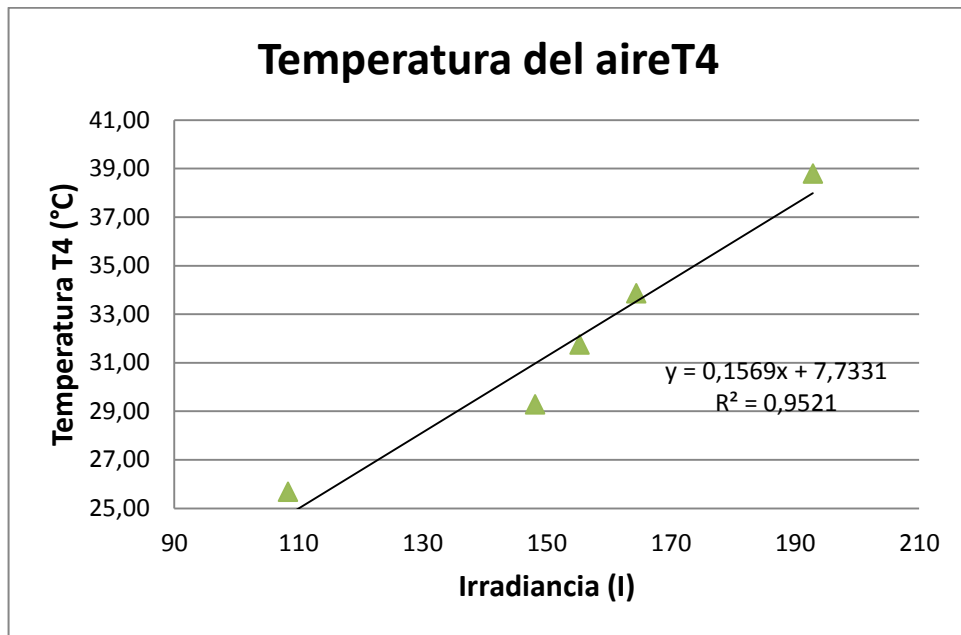


Figura 38 Temperatura del aire de la región anular

Temperatura de salida del calentador de PET verde, T5:

T5 °C	I (W/m²)
21.54	108.34
26.27	155.31
30.12	148.11
31.94	164.45
36.48	192.9

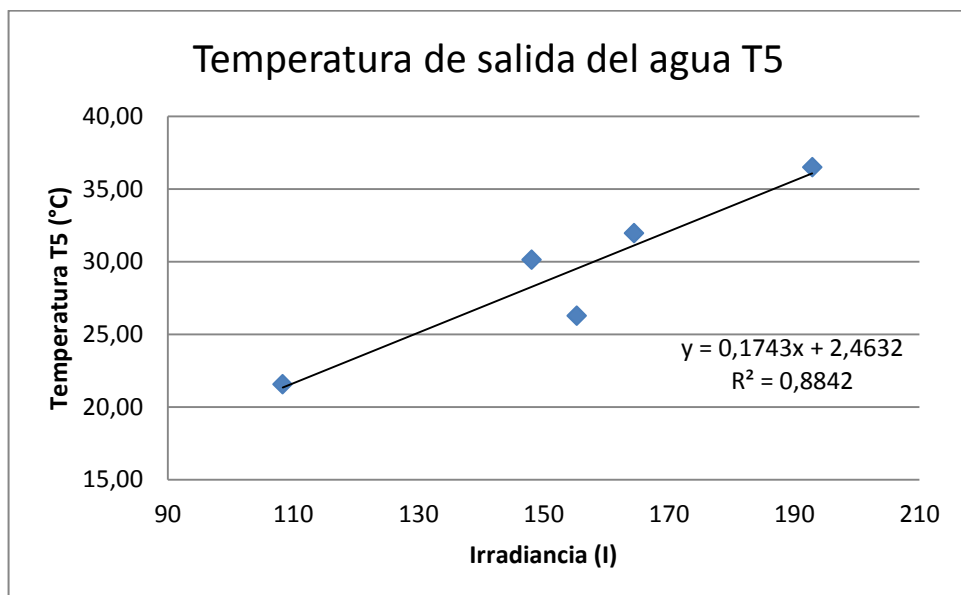


Figura 39 Temperatura de salida del agua del colector de PET verde

Variación del caudal en función de la irradiancia solar, PET transparente:

Q2 (l/min)	I (W/m2)
1.78	108.34
3.76	155.31
2.73	148.11
2.59	164.45
3.78	192.90
4.77	568.77

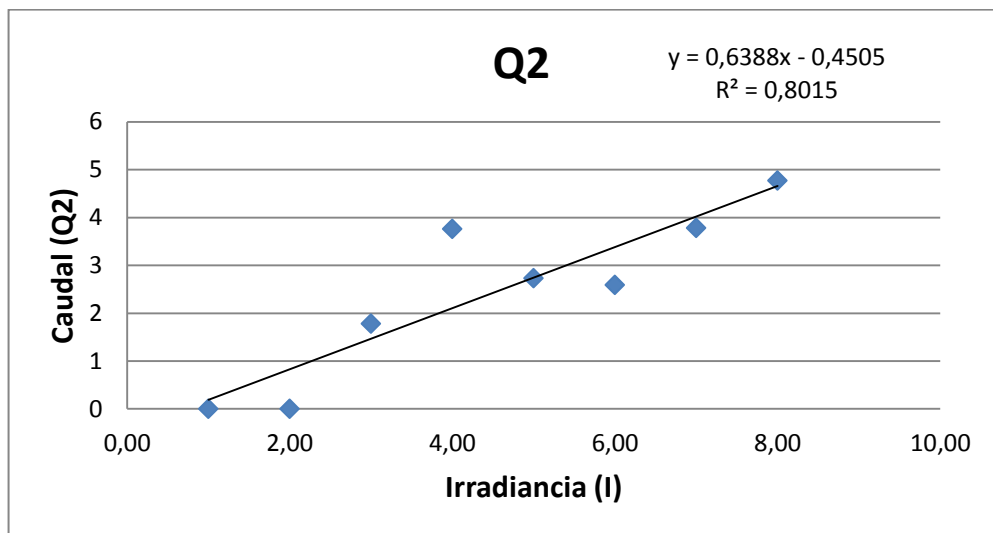


Figura 40 Caudal de la tubería de polietileno, PET transparente

Variación de la temperatura de cubierta de PET transparente, tubo de polietileno, aire con la irradiancia solar:

CUBIERTA T7 °C	TUBO T8 °C	AIRE T9 °C	I (W/m2)
30.61	29.76	26.05	108.34
41.99	35.40	32.45	155.31
33.15	34.81	29.17	148.11
41.31	40.38	32.53	164.45
47.11	47.55	35.24	192.9

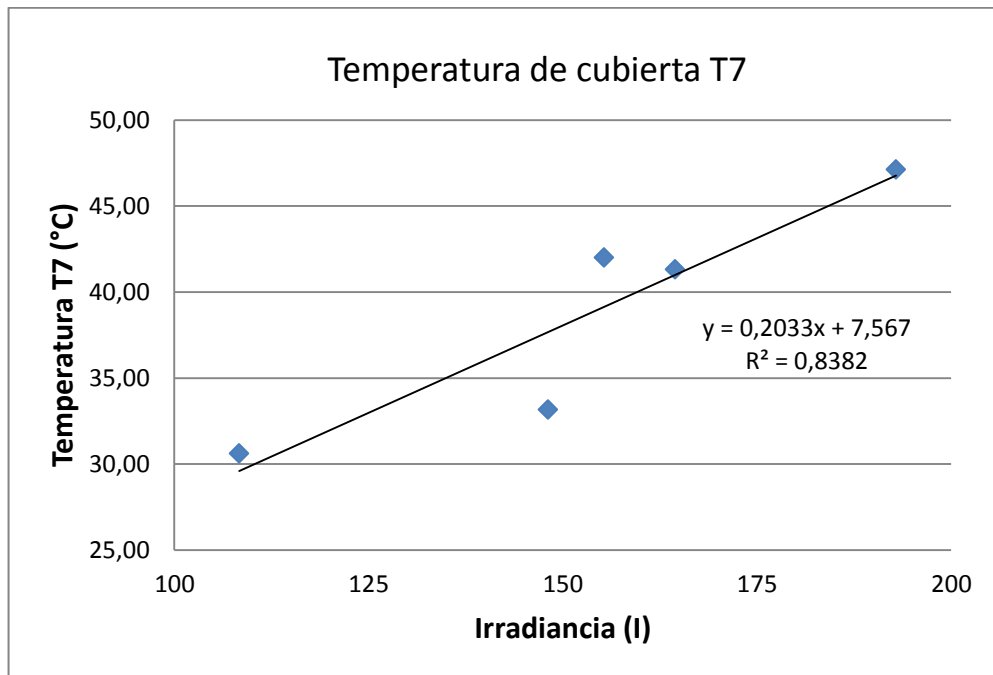


Figura 41 Temperatura de cubierta de PET transparente

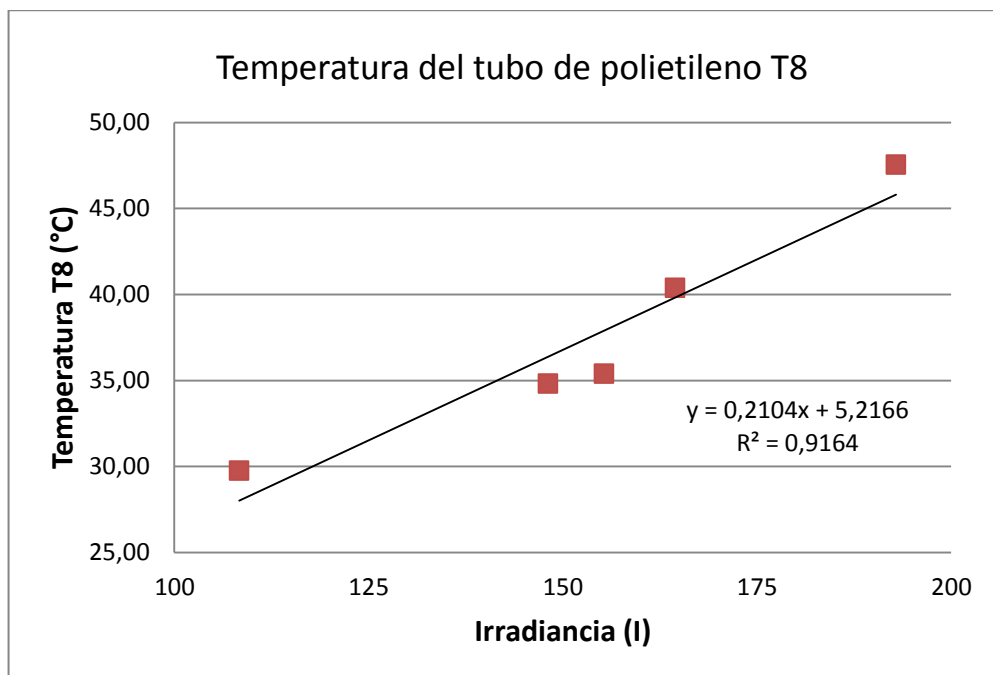


Figura 42 Temperatura del tubo de polietileno

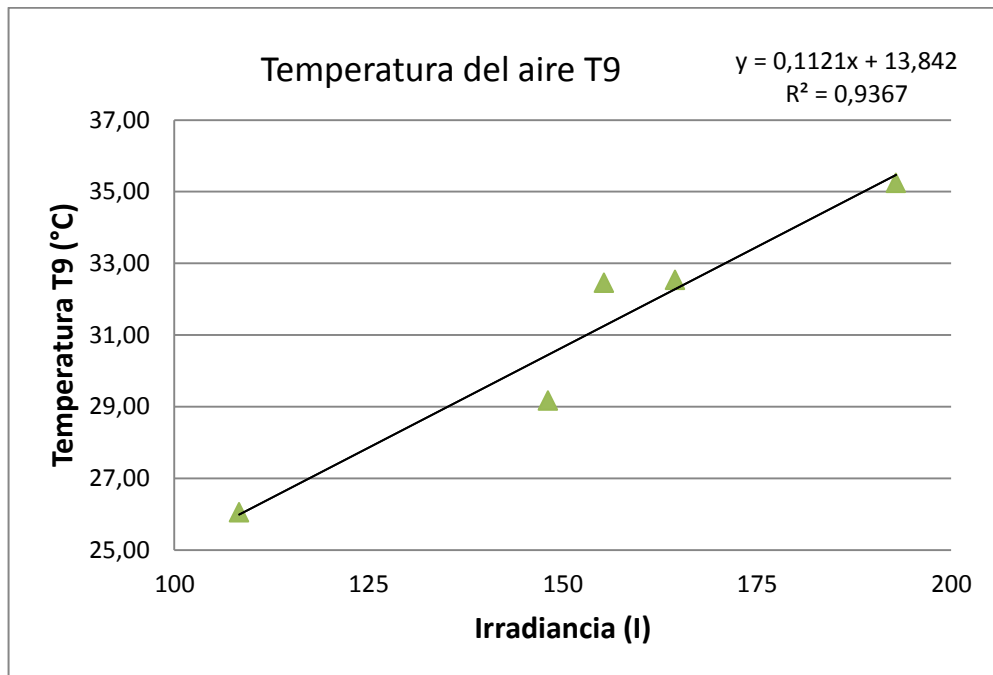


Figura 43 Temperatura del aire PET transparente

Temperatura de salida del calentador de PET verde, T10:

T10 °C	I (W/m2)
21.06	108.34
25.98	155.31
29.83	148.11
30.52	164.45
36.18	192.9

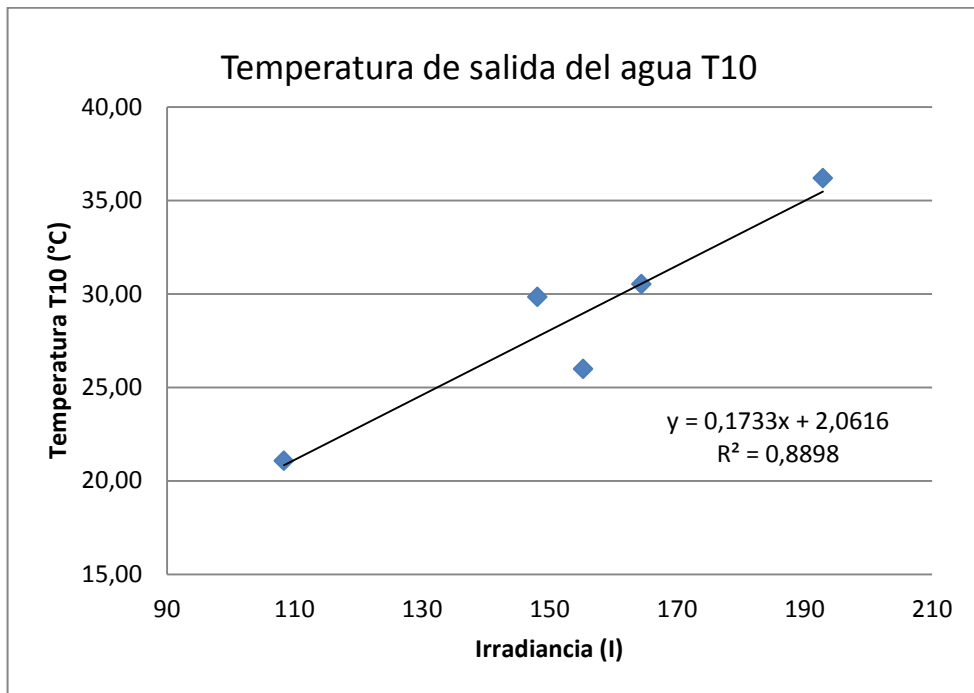


Figura 44 Temperatura de salida del agua, en línea PET transparente

5.3 Comprobación de parámetros de operación

5.3.1 Eficiencia energética

Uno de los parámetros más importantes de esta investigación, consiste en la determinación de la eficiencia energética, que es la relación entre calor útil para la energía incidente multiplicada por el área de captación solar. En el anexo C, se encuentran las tablas de cálculo y las gráficas de la eficiencia energética correspondiente a las 14 pruebas experimentales. A manera demostrativa del procedimiento realizado, se elabora la tabla 10, ensayo 1.

Tabla 10
Eficiencia Energética del Banco de Ensayos, PET VERDE

TOMA	Tiempo		I (W/m ²)	Q1 (l/min)	T1 °C	T5 °C	Fr(τ.α)	U(T5-T1)/I	η Fr(τ.α)-U(T5-T1)/I
	(hora)	(min)							
1	10	26	108,34	0,00	20,50	21,54	0,60	0,09	0,51
2	10	36	104,89	0,80	20,95	21,33	0,60	0,03	0,57
3	10	46	135,08	4,49	21,86	22,27	0,60	0,03	0,57
4	10	56	129,09	2,50	22,60	22,96	0,60	0,03	0,57
5	11	6	136,04	4,03	23,26	23,63	0,60	0,02	0,58
6	11	16	155,97	5,43	24,70	25,18	0,60	0,03	0,57
7	11	26	155,31	4,50	25,90	26,27	0,60	0,02	0,58
8	11	36	146,36	5,25	26,77	27,20	0,60	0,03	0,57
9	11	46	133,14	4,30	27,76	28,13	0,60	0,03	0,57
10	11	56	145,23	5,25	28,23	28,55	0,60	0,02	0,58
11	12	6	152,23	4,07	28,75	29,00	0,60	0,01	0,59
12	12	16	161,86	5,14	29,53	29,90	0,60	0,02	0,58
13	12	26	148,11	2,84	29,91	30,12	0,60	0,01	0,59
14	12	36	219,31	2,16	29,80	29,96	0,60	0,01	0,59
15	12	46	120,49	4,44	29,82	30,02	0,60	0,01	0,59
16	12	56	159,23	4,85	29,98	30,18	0,60	0,01	0,59
17	13	6	180,21	5,25	30,59	30,86	0,60	0,01	0,59
18	13	16	189,93	3,35	30,83	31,01	0,60	0,01	0,59
19	13	26	164,45	2,72	30,65	30,79	0,60	0,01	0,59
20	13	36	152,05	2,87	30,60	30,80	0,60	0,01	0,59
21	13	46	159,49	2,71	30,54	30,70	0,60	0,01	0,59
22	13	56	151,10	3,09	30,53	30,73	0,60	0,01	0,59
23	14	6	157,33	4,79	30,76	31,01	0,60	0,01	0,59
24	14	16	284,47	3,24	31,16	31,34	0,60	0,01	0,59
PROMEDIO									0,58

La eficiencia energética del calentador de PET color verde es del 58%

Utilizando los datos de la tabla anterior, se obtiene la recta de eficiencia energética, acorde con la figura 45.

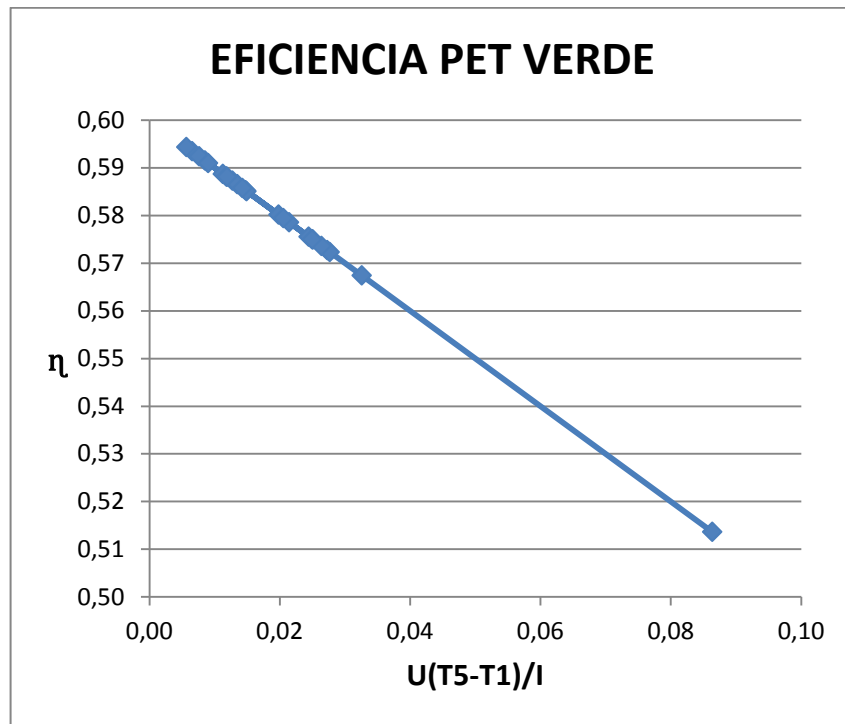


Figura 45 Eficiencia Energética del Calentador PET Verde

La recta tiene una pendiente negativa. En el eje de la **x**, se coloca el término $\frac{U(T5-T1)}{I}$, y en el eje **y** la eficiencia η (Jutglar, 2004)

Tabla 11
Eficiencia Energética del Banco de ensayos, PET TRANSPARENTE

TOMA	Tiempo		I (W/m ²)	Q2 (l/min)	T6 °C	T10 °C	FR(τa)	U(T10-T6)/I	η FR(τa)-U(T10-T6)/I
	(hora)	(min)							
1	10	26	108,34	1,78	20,48	21,06	0,60	0,048	0,55
2	10	36	104,89	2,03	20,92	20,97	0,60	0,004	0,60
3	10	46	135,08	3,96	21,86	21,96	0,60	0,007	0,59
4	10	56	129,09	2,81	22,55	22,63	0,60	0,006	0,59
5	11	6	136,04	3,66	23,22	23,32	0,60	0,007	0,59
6	11	16	155,97	4,54	24,71	24,89	0,60	0,010	0,59
7	11	26	155,31	3,76	25,86	25,98	0,60	0,007	0,59
8	11	36	146,36	4,56	26,74	26,91	0,60	0,010	0,59
9	11	46	133,14	3,68	27,70	27,87	0,60	0,011	0,59
10	11	56	145,23	4,42	28,15	28,28	0,60	0,008	0,59
11	12	6	152,23	3,49	28,66	28,73	0,60	0,004	0,60
12	12	16	161,86	4,25	29,47	29,63	0,60	0,009	0,59
13	12	26	148,11	2,73	29,79	29,83	0,60	0,002	0,60
14	12	36	219,31	2,14	29,68	29,68	0,60	0,000	0,60
15	12	46	120,49	3,83	29,71	29,74	0,60	0,002	0,60
16	12	56	159,23	4,14	29,87	29,90	0,60	0,002	0,60
17	13	6	180,21	4,52	30,50	30,59	0,60	0,004	0,60
18	13	16	189,93	3,01	30,70	30,72	0,60	0,001	0,60
19	13	26	164,45	2,59	30,52	30,52	0,60	0,000	0,60
20	13	36	152,05	2,63	30,48	30,52	0,60	0,002	0,60
21	13	46	159,49	2,56	30,41	30,43	0,60	0,001	0,60
22	13	56	151,10	2,78	30,40	30,44	0,60	0,002	0,60
23	14	6	157,33	4,07	30,66	30,73	0,60	0,004	0,60
24	14	16	284,47	2,98	31,04	31,08	0,60	0,001	0,60
25	14	26	192,90	3,78	31,50	31,61	0,60	0,005	0,59
26	14	36	508,83	3,44	32,79	32,92	0,60	0,002	0,60
27	14	46	364,71	2,58	33,12	33,20	0,60	0,002	0,60
28	14	56	356,40	4,17	33,81	33,89	0,60	0,002	0,60
29	15	6	523,88	4,70	34,93	35,04	0,60	0,002	0,60
30	15	16	608,33	4,29	35,38	35,41	0,60	0,000	0,60
31	15	26	568,77	4,77	36,11	36,18	0,60	0,001	0,60
32	15	36	620,72	3,57	36,80	36,90	0,60	0,001	0,60
PROMEDIO									0,59

La eficiencia energética del calentador de PET transparente es del 59%. Estos valores permiten indicar que el calentador de PET con cubierta transparente es ligeramente más eficiente.

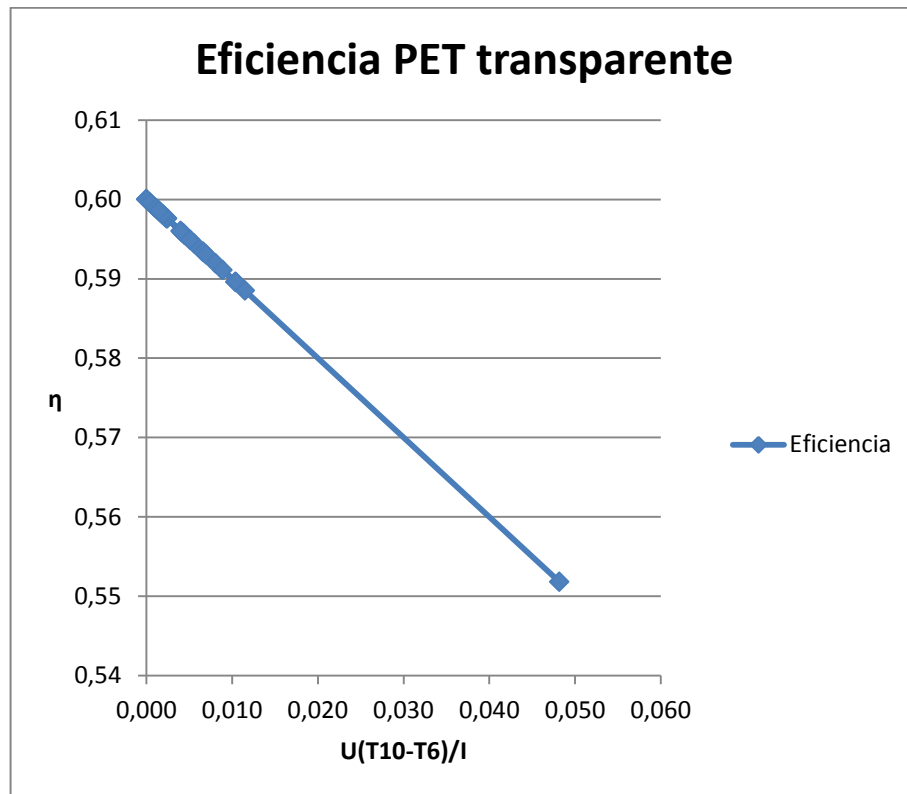


Figura 46 Eficiencia energética del calentador PET transparente

5.3.2 Balance de energía

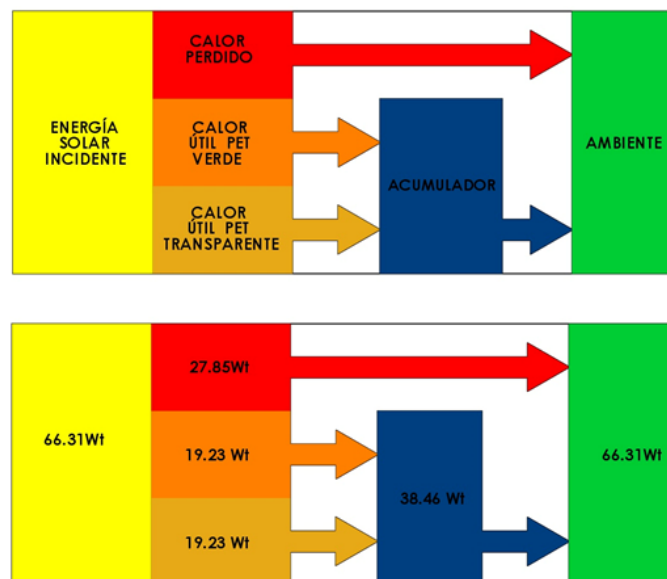


Figura 47 Balance de energía de los colectores de PET, calentados por energía solar

La descripción de la figura 47 es la siguiente:

- a) La energía solar incidente se descompone en calor perdido hacia el ambiente, calor ganado por el absorbedor de PET verde, calor ganado por el absorbedor de PET transparente; la energía térmica de los dos colectores se almacenan en el acumulador y luego al enfriarse el agua , el calor se disipa al ambiente
- b) Los valores de energía térmica son: energía solar 66,31 W, Calor perdido 27,85 Wt, calor útil del campo de colectores 19,23 Wt cada uno, calor acumulado en el recipiente de agua 39,46 Wt. Finalmente al sumidero de calor que es el ambiente llega los 66,31 Wt.

5.4 Verificación de resultados

5.4.1 Procedimiento matemático para estimar la radiación solar

$n = 165$ Día del año, 13 de junio

ÁNGULO DE DECLINACIÓN (δ_1)

$$\delta_1 = 23.45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284+n}{365} \cdot \text{deg}\right) \quad \text{fórmula de COOPER (Jutglar, 2004)}$$

$$\delta_1 = 23.268 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$I_{sc} = 1367 \left(\frac{W}{m^2}\right) \text{ Constante solar}$$

$$\text{deg} = \left(\frac{\pi}{180}\right)$$

ÁNGULO HORARIO (W_s)

$$\phi = -1.2 \quad \text{Latitud del lugar}$$

$$W_s = [\text{acos}((-\tan(\phi \cdot \text{deg}) \cdot \tan(\delta_1 \cdot \text{deg})))] \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$W_s = 89.484 \text{ (}^\circ\text{)}$$

DURACIÓN DEL DÍA (Duffie, 1991)

$$Nd = \frac{2}{15} \cdot Ws = \frac{2}{15} \cdot [\text{acos}((- \tan(\phi \cdot \text{deg}) \cdot \tan(\delta_1 \cdot \text{deg})))] \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$Nd = 11,931 \text{ (Horas)}$$

RADIACIÓN EXTRATERRESTRE

$$FC = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365} \cdot \text{deg}\right) \quad \text{Factor de corrección}$$

$$C_1 = \cos(\phi \cdot \text{deg}) \cdot \cos(\delta_1 \cdot \text{deg}) \cdot \sin(Ws \cdot \text{deg})$$

$$C_2 = 2 \cdot \pi \cdot \frac{Ws}{360} \cdot \sin(\phi \cdot \text{deg}) \cdot \sin(\delta_1 \cdot \text{deg})$$

$$He = \frac{24}{\pi} \cdot I_{sc} \cdot [(FC) \cdot (C_1 + C_2)]$$

$$He = 9,158 \times 10^3 \left(\frac{Wh}{m^2 \text{ día}}\right) \quad \text{Radiación solar fuera de la atmósfera}$$

MÉTODO DE PAGE**FACTORES CLIMATICOS**

$$a = 0,25 \quad \text{Para la Sierra}$$

$$b = 0,45$$

$$HSP = 3,97 \quad \text{Horas de Sol Pico, Mapa del INAMHI}$$

RADIACIÓN SOBRE LA SUPERFICIE HORIZONTAL

$$Ho = He \cdot \left(a + b \cdot \frac{HSP}{Nd}\right)$$

$$Ho = 3,661 \times 10^3 \left(\frac{Wh}{m^2 \text{ día}}\right)$$

FACTOR DE INSOLACIÓN

$$\sigma = \frac{HSP}{Nd}$$

$$\sigma = 0,333$$

$$\beta = 20^\circ \quad \text{Ángulo de inclinación de la instalación}$$

$$s1 = \beta$$

Ángulo horario de la puesta de sol para la superficie inclinada (hss)

$$hs1 = \text{acos}[-\tan[(\phi - s1) \cdot \text{deg}] \cdot \tan(\delta_1 \cdot \text{deg})] \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$hs1 = 80.399 \text{ (}^\circ\text{)}$$

$$hs = \min(hs1, Ws)$$

$$hs = 80.399 \text{ (}^\circ\text{)}$$

ÍNDICE DE CLARIDAD

$$k1 = a + b \cdot \sigma$$

$$k1 = 0.4$$

$$Hd = Ho \cdot (1.39 - 4.027 \cdot k1 + 5.531 \cdot k1^2 - 3.108 \cdot k1^3)$$

$$Hd = 1.704 \times 10^3 \left(\frac{Wh}{m^2 \text{ día}} \right) \quad \text{Radiación Difusa}$$

$$R_1 = hs \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \sin[(\phi - s1) \cdot \text{deg}] \cdot \sin(\delta_1 \cdot \text{deg})$$

$$R_b = \frac{\cos[(\phi - s1) \cdot \text{deg}] \cdot \cos(\delta_1 \cdot \text{deg}) \cdot \sin(hs \cdot \text{deg}) + R_1}{\cos(\phi \cdot \text{deg}) \cdot \cos(\delta_1 \cdot \text{deg}) \cdot \sin(Ws \cdot \text{deg}) + Ws \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \sin(\phi \cdot \text{deg}) \cdot \sin(\delta_1 \cdot \text{deg})}$$

$R_b = 0.711$ Factor de corrección de la radiación solar de la horizontal a inclinada

RADIACIÓN TOTAL PARA CIELO ISÓTROPO

$\rho = 0.4$ Refractividad del suelo: grava, ripio, pavimento

$$Hb = Ho - Hd$$

$$Hb = 1.957 \times 10^3 \left(\frac{Wh}{m^2 \text{ día}} \right) \quad \text{Radiación directa}$$

$$Ht = Hb \cdot R_b + \frac{1 + \cos(\delta_1 \cdot \text{deg})}{2} \cdot Hd + \rho \cdot \frac{1 - \cos(\delta_1 \cdot \text{deg})}{2} \cdot Ho$$

$$Ht = 3.089 \times 10^3 \left(\frac{Wh}{m^2 \text{ día}} \right) \quad \text{Radiación total sobre superficie inclinada}$$

Con este procedimiento la radiación solar sobre superficie horizontal para día característico del mes de junio es $H_o=3.661$ kWh/m² día, y para superficie inclinada $H_t=3.09$ kWh/m² día. Por lo tanto, dividiendo para la media mundial de la irradiancia que tiene un valor de 1000W/ m², en términos de horas de sol pico para el mes peor en la ciudad de Ambato, se tiene:

Superficie horizontal: HSP=3.6 horas

Superficie inclinada: HSP=3.0 horas

5.4.2 Estimación de la temperatura de salida del agua del colector

Para estimar la temperatura de salida del agua del colector (Cejudo, 2003) (T_{fo}) se parte del concepto de temperatura media volumétrica $T_{pm} = \frac{T_{fo}+T_{fi}}{2}$, donde T_{fo} temperatura de salida del agua caliente hacia el acumulador; T_{fi} temperatura de entrada de agua al calentador de PET.

Por otra parte, T_{pm} puede ser calculada del análisis energético del colector solar:

$$T_{pm} = T_{fi} + \frac{Q_u}{F_R U_L A_C} (1 - F_R)$$

Con la ecuación de BLISS, $Q_u = A_C [IF_R(\tau\alpha) - U_L F_R(T_{fi} - T_a)]$

Q_u Calor útil transferido al fluido de proceso, agua.

Realizando las simplificaciones necesarias:

$$T_{fo} = 2T_{pm} - T_{fi}$$

Corresponde a la expresión matemática con la que se determina la temperatura de salida del agua del colector a partir del dato de medición de la temperatura de ingreso del agua al colector.

Para el colector con PET verde, se tiene:

Datos:

$$T_{fi} = 20.50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$A_c = 0.28\text{m} \times 7 \times 0.08\text{m} = 1.96\text{m} \times 0.08 \text{ m} = 0.1568 \text{ m}^2$$

$$I_o = 108.34 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$F_R = 0.9 \quad \text{valor de referencia para colectores eficientes}$$

$$U_L = 10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{ } ^\circ\text{C}}, \text{ para transferencia de calor del agua al aire (Mills, 1995)}$$

$$F_R U_L = 9$$

$$T_\alpha = 19.7^\circ\text{C}$$

$$F_R \tau_\alpha = 0.6 \quad \text{Valor de norma}$$

$$Q_u = A_c [I_o \cdot F_R \tau_\alpha - F_R U_L (T_{fi} - T_\alpha)]$$

$$Q_u = 9.06 \text{ W} = 151.76 \text{ WT}$$

$$T_{pm} = T_{fi} + \frac{Q_u(1 - F_R)}{F_R U_L * A_c}$$

$$T_{pm} = 21.14^\circ\text{C}$$

Dónde:

$$T_{fo} = 2 \cdot T_{pm} - T_{fi}$$

$$T_{fo} = 21.78^\circ\text{C}$$

Error:

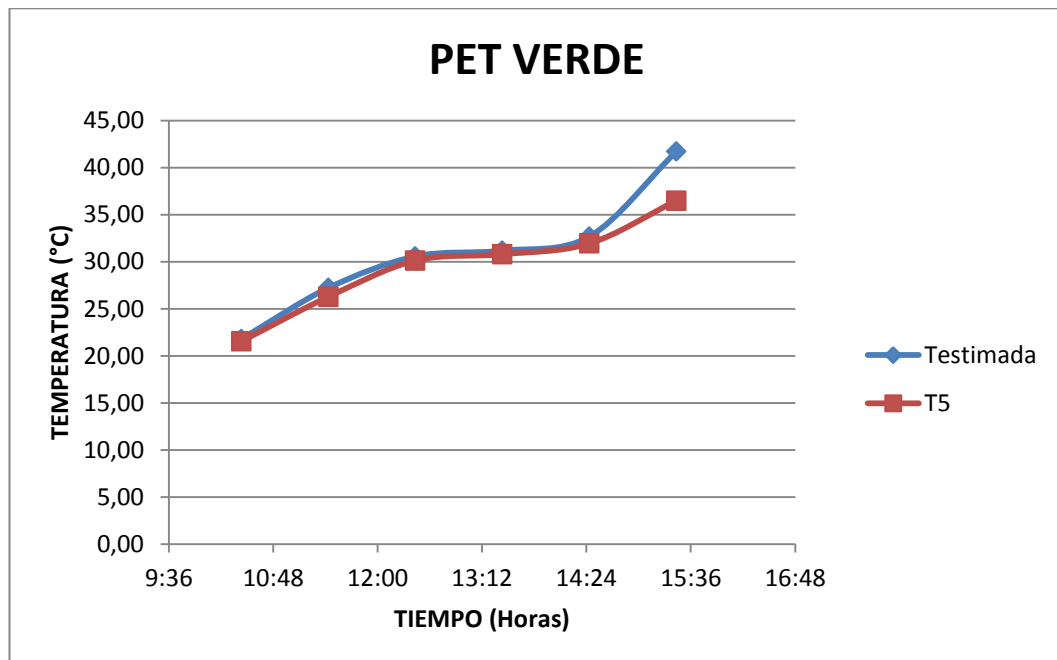
$$\% \text{ error} = \frac{|T_{med} - T_{fo}|}{T_{med}}$$

$$\% \text{ error} = -1.14\% \quad \text{El porcentaje de error en la estimación es del 1.14\%}$$

Tabla 12

Estimación de la temperatura de salida Tfo para el colector con PET verde

TOMA	H	M	RADIACION (W/m ²)	T1 °C	T5 °C	Tamb °C	Qu W	Tprom °C	Tfo °C	error %
1	10	26	108,34	20,50	21,54	19,70	9,06	21,14	21,78	-1,14
7	11	26	155,31	25,90	26,27	22,13	9,30	26,56	27,22	-3,61
13	12	26	148,11	29,91	30,12	23,30	4,61	30,24	30,56	-1,47
19	13	26	164,45	30,65	30,79	22,30	3,69	30,91	31,17	-1,24
25	14	26	192,90	31,60	31,94	24,10	7,56	32,14	32,67	-2,29
31	15	26	568,77	36,25	36,48	25,63	38,53	38,98	41,71	-14,34
Promedio			222,98	29,14	29,52	22,86	12,12	29,99	30,85	-4,01

**Figura 48** Estimación de la temperatura de salida del colector con PET verde

En el anexo D se presentan las tablas y figuras correspondientes a la estimación de la temperatura de salida del colector con PET verde y transparente.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- Existen los sistemas convencionales para calentamiento de agua con energía solar, donde los de mayor aplicación son los colectores planos (CSP) que tiene rangos de eficiencia energética que varían del 40 al 60 %. En los últimos 10 años se están implementando captadores de tubos al vacío, que alcanzan rendimientos del 70 al 80%. Para el calentamiento de piscinas es común la utilización de los colectores fabricados en tubo de polipropileno de color negro mate. La mayoría de estas tecnologías vienen por importación al Ecuador. En el ámbito nacional muy pocas empresas se dedican a la investigación o el desarrollo de sistemas de calentamiento de agua con energía solar, esta situación encarece los costos de adquisición e implementación porque no existe una diversificación en el mercado.
- En la presente investigación se realiza el análisis energético y óptico de dos tipos de calentadores el uno compuesto por tubería interna de polietileno con envolvente de PET de color verde y el otro con tubería interna y cubierta cilíndrica de PET transparente. La eficiencia energética alcanzada por el primer calentador es del 58% y con el segundo calentador se tiene un 59%. Se observa una eficiencia muy parecida en los dos casos y de un valor aceptable, conociendo que la eficiencia de un colector solar plano comercial es del 60% a un costo muy elevado.

- En el banco de ensayos para calentamiento de agua con PET, en un tiempo de 5 horas 30 minutos con irradiancia promedio de 216.38 W/m^2 , la temperatura del acumulador se incrementa de 20.65°C hasta 37°C . Esta temperatura es cercana a la de confort térmico que de acuerdo con el código técnico de la edificación (CTE), es de 42°C . Por lo tanto este tipo de calentador puede ser utilizado para aplicaciones sanitarias.
- Los sistemas convencionales de calentamiento de agua utilizan el efecto termosifón para el movimiento del agua, por lo que en climas donde existe mucha nubosidad no son eficientes por las constantes sombras que enfrían el captador. En esta investigación se mejora el rendimiento energético mediante un sistema de bombeo fotovoltaico que solo funciona cuando existe una adecuada insolación con valor superiores a 200 W/m^2 .
- Las propiedades ópticas del PET se han determinado mediante el uso de instrumentos tales como el piranómetro y luxómetro, con los cuales la transmitancia del cilindro del PET verde es de 0.79 y la reflectividad de 0.18; para el PET transparente la transmitancia es de 0.86 y la reflectividad de 0.16.

6.2 Recomendaciones

- En el Ecuador existe la necesidad de potenciar el uso de la energía solar para mejorar la calidad de vida de poblaciones emergentes que no tienen acceso a este servicio indispensable, por esta razón es necesario que se facilite la experimentación, desarrollo e innovación de nuevos dispositivos que capturen con mayor eficiencia la energía solar, así como también nuevos materiales y equipos para

acumulación del ACS, en ambientes sanitarios adecuados, a fin de precautelar la salud de las personas.

- Para ir fortaleciendo la investigación respecto al uso de cilindros de PET, en los captadores de energía solar, es necesario que se realicen análisis y estudios del proceso de envejecimiento del polietileno tereftalato, bajo diversas condiciones ambientales a fin de determinar la vida útil de estos materiales.
- Se puede desarrollar otras pruebas de calentamiento de agua con energía solar variando los flujos de agua, diámetros de tuberías y diversos tipos de recipientes de PET; además sería importante modelar energéticamente captadores de geometrías complejas como la espiral, en serpentín, entre otras.
- La combinación del uso de sistemas mixtos solar térmico con fotovoltaico pueden ser de especial interés para calentar grandes volúmenes de agua durante las horas de máxima insolación.

BIBLIOGRAFÍA

- Cejudo, J. M. (2003). *Modelado Térmico del Colector Solar*. Málaga: IAER-Universidad de Málaga.
- Duffie, J. (1991). *Solar Thermal Energy Processes*. New York: John Wiley & Sons.
- Fernandez, J. (2010). *Compendio de Energía solar, Adaptado al Código Técnico de la Edificación*. Madrid: Mundi-Prensa.
- García, M. (1999). *Manual de Energía Solar Fotovoltaica y cooperación al desarrollo*. Madrid: IEPALA.
- Incropera, F. (1996). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. New York: John Wiley & Sons.
- Jutglar, L. (2004). *Energía Solar*. Barcelona: CEAC.
- Kreith, F. (2001). *Principios de Transferencia de calor*. México: Thomson.
- Mills, F. (1995). *Transferencia de Calor*. Madrid: Irwin.
- Pitts, D. (1980). *Transferencia de Calor*. Bogotá: McGraw Hill.
- Wilson, J. (1982). *La Energía Solar*. Madrid: Alambra.