

“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN COLECTOR SOLAR CON TUBOS AL VACÍO PARA EL PRECALENTAMIENTO DE AGUA PARA LA COCCIÓN DE ALIMENTOS”

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES

Trabajo de Fin de Carrera Titulado:

“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN COLECTOR SOLAR CON TUBOS AL VACÍO PARA EL PRECALENTAMIENTO DE AGUA PARA LA COCCIÓN DE ALIMENTOS”

Realizado por:

JORGE ALFREDO RIOS ENCALADA

Director del proyecto:

JAVIER MARTINEZ GÓMEZ

Como requisito para la obtención del título de:

MAESTRANTE EN ECOEFICIENCIA

INDUSTRIAL CON MENCIÓN EN EFICIENCIA

ENERGÉTICA

Quito, 12 de marzo del 2021

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN COLECTOR SOLAR CON TUBOS AL VACÍO PARA EL PRECALENTAMIENTO DE AGUA PARA LA COCCIÓN DE ALIMENTOS

DECLARACIÓN JURAMENTADA

Yo, JORGE ALFREDO RIOS ENCALADA, con cédula de identidad # 0201534252, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado a calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

JORGE
ALFREDO RIOS
ENCALADA

Firmado digitalmente por JORGE
ALFREDO RIOS ENCALADA
Nombre de reconocimiento (DN):
c=EC, o=SECURITY DATA S.A. 1,
ou=ENTIDAD DE CERTIFICACION DE
INFORMACION,
serialNumber=041220094737,
cn=JORGE ALFREDO RIOS ENCALADA
Fecha: 2021.05.03 14:43:54 -0500'

FIRMA

0201534252

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN COLECTOR SOLAR CON TUBOS AL VACÍO PARA EL PRECALENTAMIENTO DE AGUA PARA LA COCCIÓN DE ALIMENTOS

DECLARATORIA

El presente trabajo de investigación titulado:
EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN COLECTOR SOLAR CON TUBOS AL VACÍO PARA EL PRECALENTAMIENTO DE AGUA PARA LA COCCIÓN DE ALIMENTOS

Realizado por:

JORGE ALFREDO RIOS ENCALADA

Como Requisito para la Obtención del Título de:
**MAESTRANTE EN ECOEFICIENCIA INDUSTRIAL
CON MENCIÓN EN EFICIENCIA ENERGÉTICA**

Ha sido dirigido por el profesor

JAVIER MARTINEZ GÓMEZ

Quien considera que constituye un trabajo original de su autor



FIRMA

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN COLECTOR SOLAR CON TUBOS AL VACÍO PARA EL PRECALENTAMIENTO DE AGUA PARA LA COCCIÓN DE ALIMENTOS

LOS PROFESORES INFORMANTES

Los Profesores Informantes:

Diego Bustamante

Jesús López Villada

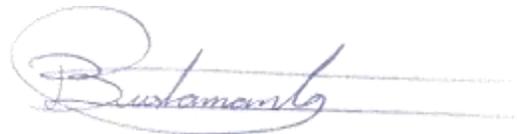
Después de revisar el trabajo presentado,

lo han calificado como apto para su defensa oral ante

el tribunal examinador



FIRMA



FIRMA

Quito, 12 de marzo del 2021

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN COLECTOR SOLAR CON TUBOS AL VACÍO PARA EL PRECALENTAMIENTO DE AGUA PARA LA COCCIÓN DE ALIMENTOS

DEDICATORIA

A Dios, que es mi motivación que
guía mi camino.

A mis padres, que son un ejemplo, y
un apoyo constante e incondicional.

A los docentes, que me compartieron
sus conocimientos y sus experiencias
para contribuir de la mejor forma con
mi formación profesional.

Jorge Ríos E

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN COLECTOR SOLAR CON TUBOS AL VACÍO PARA EL PRECALENTAMIENTO DE AGUA PARA LA COCCIÓN DE ALIMENTOS

AGRADECIMIENTO

A Dios por regalarme de bendiciones, a mi madre que con su ejemplo me hizo un hombre de bien, a mi padre mi mejor amigo quien me inculcó disciplina y perseverancia, a mis hermanos, mi familia que me brindan su apoyo incondicional y por último y no menos importante agradezco a mi esposa Miriam y a mis hijos que son mi fuerza de voluntad.

Jorge Ríos E

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN COLECTOR SOLAR CON TUBOS AL VACÍO PARA EL PRECALENTAMIENTO DE AGUA PARA LA COCCIÓN DE ALIMENTOS

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN COLECTOR SOLAR CON TUBOS AL VACÍO PARA EL PRECALENTAMIENTO DE AGUA PARA LA COCCIÓN DE ALIMENTOS

¹ Universidad Internacional SEK, Facultad de Ciencias Naturales y Ambientales, Quito, Ecuador.

*AUTOR DE CORRESPONDENCIA:

Resumen.

Con el propósito de contribuir con una alternativa viable para la reducción del consumo de gas de uso doméstico (GLP) en la cocción de alimentos, se propone desarrollar la presente investigación sobre el uso de la energía solar térmica de baja temperatura, inferior a los 100°C, para el precalentamiento del agua. Se puede reducir el tiempo de ebullición de este fluido, ingresando al recipiente de cocción el agua caliente sanitaria (ACS) a una temperatura de 33,20 °C. Esto se consigue mediante un calentador solar de agua con tubos al vacío (CSATV) que tiene una eficiencia térmica del 68% en condiciones climáticas desfavorables que se presentan en los meses de invierno donde se puede obtener un ahorro en el consumo de gas del 50% hasta alcanzar la temperatura de ebullición del agua precalentada. Por otra parte, es necesario indicar que el gas licuado de petróleo es un combustible deficitario, contaminante y tiene subsidio estatal, por lo que es necesario reducir su consumo tanto en los calefones de gas, como en la cocción de los alimentos. Estas nuevas posibilidades de aprovechamiento de la energía solar, permitirá el mejoramiento de la calidad de vida de la población, el ahorro de divisas por reducción en los volúmenes de importación de este combustible y la conservación ambiental en beneficio de las presentes y futuras generaciones, especialmente del sector rural marginal.

Palabras clave:

Irradiancia, calentador, vacío, eficiencia, ahorro

Abstract

In order to contribute with a viable alternative for reducing the consumption of domestic gas (LPG) in cooking food, it is proposed to develop this research on the use of low temperature solar thermal energy, below $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, for preheating the water. The boiling time of this fluid can be reduced by entering the domestic hot water (DHW) at a temperature of $33.20\text{ }^{\circ}\text{C}$ into the cooking container. This is achieved by means of a solar water heater with vacuum tubes (CSATV) that has a thermal efficiency of 68% in unfavorable weather conditions that occur in the winter months where a saving in gas consumption of 50% can be obtained. until reaching the boiling temperature of the preheated water. On the other hand, it is necessary to indicate that liquefied petroleum gas is a deficit fuel, polluting and has a state subsidy, so it is necessary to reduce its consumption both in gas boilers and in cooking food. These new possibilities of taking advantage of solar energy, will allow the improvement of the quality of life of the population, saving foreign currency by reducing the import volumes of this fuel and environmental conservation for the benefit of present and future generations, especially of the marginal rural sector.

1. Introducción.

En la actualidad el uso de la energía solar para la obtención de agua caliente sanitaria (ACS) tiene un importante desarrollo debido a las mejoras implementadas en el diseño, ensayos y montaje de nuevas instalaciones de calentamiento que utilizan tubos al vacío con el propósito de mejorar el rendimiento energético y la temperatura de salida del fluido de proceso. Por otra parte es importante conocer las investigaciones que se realizan utilizando este tipo de captadores, por lo que a continuación se presenta un análisis de estos nuevos trabajos. La generación de vapor es un proceso de aplicación en la industria por lo que **(Bataineh & Al-Karasneh, 2016)** utilizaron la radiación solar directa para captarlo en un absorbedor de tubos al vacío simple. La determinación de los parámetros característicos lo realizaron utilizando Matlab, variando la presión de vapor de (3 a 10 MPa). En el estado del arte la nanotecnología es una ciencia que sirve para mejorar los materiales y las técnicas de producción convencional, por lo que es prioritario analizar el uso de nanofluidos como lo propuesto por **(Hussain , Jawad, & Sultan, 2014)**, los cuales desarrollan el análisis experimental de la eficiencia térmica del captador de tubos al vacío utilizando (Ag (30nm)) + agua destilada y óxido de titanio y (ZrO₂ (50nm) + agua destilada).

Por otra parte, es necesario indicar que los colectores de tubos al vacío simples no pueden soportar presiones superiores a 1kg/cm^2 (98000 N/m^2) por lo que en las investigaciones de **(Núñez, Martínez-Rodríguez, & Fuentes-Silva, 2016)** se realiza el diseño y la orientación de redes de colectores de tubos al vacío para hallar sus características de funcionamiento.

El calentador solar no solo sirve para calentar agua, sino también para calentar aire como lo demuestra el análisis experimental del sistema de calentamiento con tubos de vacío variando el ángulo de inclinación (β) realizado por **(Dabra, Yadav, & Yadav, 2013)**. Los ángulos seleccionados en los ensayos son de 30 a 40°, logrando eficiencias térmicas del 51,12 hasta 79,59%.

Contribuyendo con aplicaciones de la energía solar **(Yadav & Saraswat, 2016)** realizaron en la India un estudio con un calentador solar de tubos al vacío para generación de vapor.

En este trabajo, la irradiancia promedio fue de $795 \text{ (W/m}^2\text{)}$ y se obtuvieron eficiencias del 46,26%. En aplicaciones de media temperatura entre 100 y 400°C , se pueden utilizar concentradores parabólicos para el calentamiento directo de fluidos que circulan por el interior de los tubos de vacío. Por lo que se han ejecutado ensayos con o sin concentradores compuestos para captadores con tubos de vacío según **(Jia, Wu, & Jeng, 2017)**, se pueden alcanzar un incremento de la eficiencia térmica superior al 20%.

Los captadores solares térmicos representan una de las tecnologías más utilizadas para producir calor con fuentes renovables como la solar. En las pruebas de colectores realizadas por **(Ricci, Bocci, & Michelangeli, 2015)** utilizando la norma UNI-EN 12975 se obtienen rendimientos del 15% superiores a los modelos convencionales de captadores planos que tienen una eficiencia térmica dentro del rango del 40 al 60%. Los rendimientos de flujo y de transferencia de calor de los captadores solares variando la temperatura de ingreso del agua de (0° a 40°C) se pueden estudiar con simulación numérica como lo indica el trabajo de **(Yao, Li, & Tao, 2015)** donde se consigue aumentar el número de Nusselt y por consecuencia el coeficiente de transferencia de calor por convección.

El análisis térmico de colectores es fundamental para conocer su ganancia óptica y pérdidas térmicas por esta razón, se revisa el proyecto de colectores con tubos evacuados (al vacío) desarrollado por **(Arora , Chitkara , & Udayakumar, 2011)** Donde, para Dubái con irradiación solar de $8,35 \text{ kWh/medía}$ y una irradiancia de 1050 W/m^2 , la temperatura del absorbedor alcanza 180°C . Sin embargo, hay que tomar en cuenta que mientras más alta es la temperatura del fluido de proceso, el rendimiento térmico instantáneo decrece.

Además, se debe considerar que los colectores deben ser analizados bajo diferentes condiciones ambientales para determinar su eficiencia mínima y máxima, por lo que Zubriski en 2017 publica la investigación denominada: medición de la eficiencia térmica de colectores con tubos de vacío, bajo diferentes condiciones de operación **(Zubriski & Dick, 2021)**. Otro estudio analiza el desempeño de un calentador solar de agua de tubos al vacío con baja concentración estática para aplicaciones de media temperatura entre 100 y 400°C , **(Li, Pei, & Su, 2016)** obtienen eficiencias ópticas alrededor de 76,9% con ángulos de inclinación de 0 a 60° , temperaturas de proceso de 80 a 140°C . Con este procedimiento

se pueden desarrollar aplicaciones en refrigeración, desalinización de agua mar, generación de potencia térmica. También, se ha propuesto comparar los rendimientos térmicos de los captadores de placa plana y los de tubos al vacío, como es el trabajo desarrollado por **(Olczak, Matuszewska, & Zavaglo, 2020)** donde se indica que para los captadores planos la eficiencia térmica es de 33,7% en Brzesko y para colectores de tubos evacuados la eficiencia es de 67,3 % en Krosno. El almacenamiento de energía térmica utilizando materiales de cambio de fase (Phase Change Material, PCM), permiten reducir el consumo energético y tienen un mayor rendimiento que los de almacenamiento de calor sensible. En esta configuración se alcanza un incremento de 11 a 12 °C., en el acumulador según **(Pankaj, Sachin , & Ganesh, 2016)** descrito en el proyecto de Evaluación del rendimiento de colectores solares de tubos de vidrio al vacío con almacenamiento de calor latente.

Por otra parte, es necesario explicar que el uso del gas licuado de petróleo (GLP) tiene gran influencia en la cocción de alimentos por lo que existen estudios e investigaciones técnicas que determinan el tipo de quemadores, flujo volumétrico, tipos de combustibles gaseosos, temperatura de llama, potencia térmica. En cuanto a la eficiencia térmica **(Arias , Caydiid , & Omondi, 2018)** establecen que para una combustión con 50% de aire, la eficiencia térmica es del 53% con un desprendimiento de potencia térmica de 1,4 kW cuando se quema GLP. Además, las cocinas de gas de uso comercial tienen un rendimiento promedio del 45% de acuerdo por lo descrito por **(Rojas , Jiménez , & Soto , 2018)**. En sus ensayos varían la cantidad de puertos, geometría del quemador y diámetro del inyector para producir una potencia térmica mínima de 3,75 kW. El GLP utilizado está constituido por 55% de propano y 45 % de butano. El quemador diseñado puede operar en un rango de potencias de 3,0 -4,6 kW. Sin embargo en el límite superior o más puede ocurrir un desprendimiento de llama que hace peligroso para el usuario. En el año 2011, en la Espol se realizaron ensayos sobre el proceso de combustión del gas en cocinas de uso doméstico **(Leon Guijarro, 2015)**, en el cual se utiliza una cocina de gas marca MABE modelo INGENIOUS 769, para el quemador estándar de 0,71mm., el intervalo de potencia térmica es de 1,84 a 2,16 kW.

2. Hipótesis.

Mediante la evaluación energética de un colector solar de tubos al vacío se propone precalentar el agua caliente sanitaria (ACS) para la cocción de alimentos y de esta manera obtener un ahorro energético superior al 40%, reduciendo el consumo de gas de uso doméstico, que es un recurso contaminante y deficitario en el Ecuador.

3. Objetivos:

3.1 General:

Determinar la eficiencia térmica de un colector solar de tubos al vacío de 200L, para precalentar agua para la cocción de alimentos.

3.2 Específicos:

- Evaluar el recurso solar local y su potencial aplicación en la obtención de agua caliente sanitaria (ACS).
- Realizar la validación térmica del calentador solar de tubos al vacío con capacidad de 200 L.
- Determinar el consumo de gas en la cocción de alimentos y su potencial ahorro al utilizar agua precalentada con energía solar
- Proponer mejoras de ahorro energético, mediante la utilización de sistemas térmicos híbridos solar-gas para mejoramiento de las condiciones ambientales y de la calidad de vida de la sociedad.

4. Metodología.

4.1. Localización del sitio de ensayo y determinación de la radiación solar



Fig.1. Mapa de ubicación del sitio de instalación del colector solar de tubos al vacío

Fuente: Google Map

Sobre la terraza de una edificación localizada en la ciudad de Guaranda, con latitud $1,58^\circ$ sur y longitud -79° , se encuentra instalado el colector solar de tubos al vacío. Estas coordenadas geográficas permiten realizar los estudios del recurso solar disponible en el sitio utilizando varias técnicas entre las cuales se indican las siguientes: Mapa de radiación solar del Banco Mundial, datos de satélite de la NASA, mapa de radiación solar del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI). A continuación se realiza la descripción de cada uno de estos procedimientos de estimación de la radiación solar.

Mapa de irradiación solar del Banco Mundial.

El Atlas de radiación solar del Banco Mundial proporciona un resumen del potencial de energía solar a nivel mundial para contribuir con el desarrollo de proyectos de aplicaciones de la energía solar térmica y fotovoltaica.

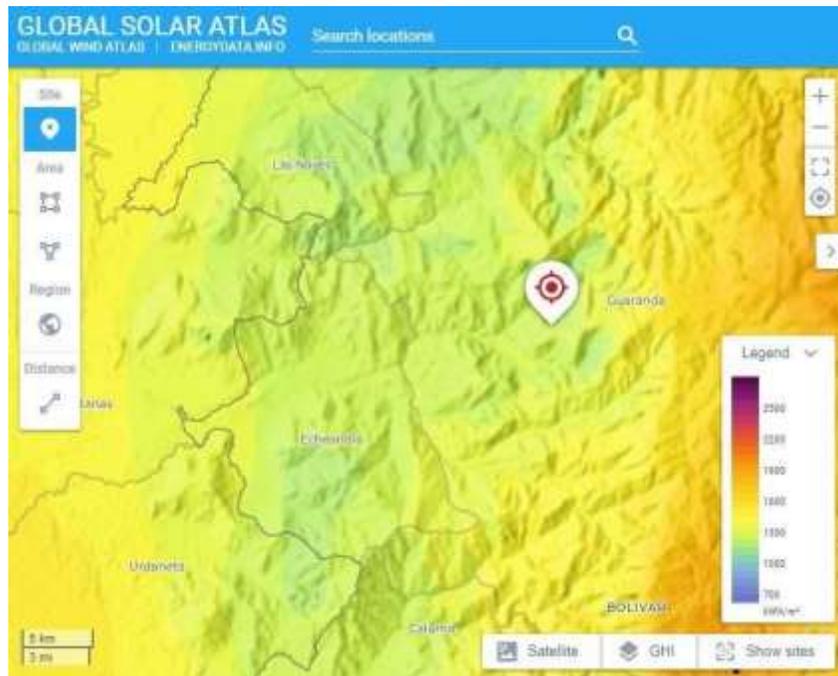


Fig.2. Mapa de radiación solar para Guaranda
Fuente: Atlas de radiación solar del banco mundial

De acuerdo con los datos de radiación solar del Banco Mundial, la irradiación solar global sobre superficie horizontal para todo el año es 1269 kWh/m². Este valor se lo divide para 365 días, con lo que se obtiene 3,476 kWh/m²día. Si se utiliza la media mundial de la irradiancia que equivale a 1000 W/m², se obtiene 3,476 horas de sol pico (HSP).

Datos de radiación solar de la Nasa

La NASA proporciona un conjunto de datos meteorológicos y de radiación solar para colaborar con proyectos de energías renovables, eficiencia energética en la edificación y necesidades agrícolas.

De acuerdo con el mapa y la leyenda de la Fig.4., se puede indicar que la irradiación solar para la ciudad de Guaranda se encuentra en el rango de 4.0 a 4.5 kWh/m²día. De manera similar al procedimiento anterior si se utiliza la media mundial de la irradiancia se tiene un rango de HSP entre 4,0 y 4,5 h.

Tabla 1

Promedios de irradiación solar en media anual para la ciudad de Guaranda

Método	Irradiación (kWh/m ² día)	HSP
BM	3,476	3,476
NASA	4,48	4,48
INAMHI	4,0	4,0
Promedio	3,98	3,98

Se obtiene un promedio de 3,98 HSP, valor que permite el cálculo del calor sensible para aumentar la temperatura del agua fría hasta la de confort térmico que corresponde a la temperatura de ACS suministrada por el calentador solar de agua con tubos de vacío (CSATV). Además, otro parámetro característico para completar la evaluación del recurso solar consiste en la irradiancia global (W/m²) que se mide utilizando el instrumento conocido como piranómetro. En este contexto, la irradiancia global corresponde a la suma de la irradiancia difusa y la directa representada por la siguiente expresión:

$$I_g = I_d + I_b \quad (1)$$

Dónde: I_g es la irradiancia global medida sobre superficie horizontal; I_d irradiancia difusa proveniente de la bóveda celeste y I_b irradiancia directa que proviene del sol.

Por otra parte, de acuerdo con Hottel y Woertz (1942) la componente difusa puede considerarse isótropa es decir uniformemente distribuida en el cielo, esto es más exacto cuando el cielo está enteramente cubierto de nubes (De Juana J. , 2007). Se puede determinar la componente difusa sobre superficie horizontal, utilizando el piranómetro de radiación global, que incorpora un disco o una banda de color negro mate que evita la visión del disco solar. En este caso se debe conocer la elevación solar para cada día, mediante el procedimiento de la NOAA, que permite orientar la sombra sobre el par termoelectrico.

City:	Deg:	Min:	Sec:	Time Zone		
Enter Lat/Long -->	Lat: North--+	-1	34	48	Offset to UTC (MST--7):	Daylight Saving Time: No
	South--					
Click here for help finding your lat/long coordinates	Long: East--	-79	0	0	7	
	West--+					
Note: To manually enter latitude longitude, select Enter Lat/Long --> from the City pull-down box, and enter the values in the text boxes to the right.						
Month:	Day:	Year (e.g. 2000):	Time: (hh:mm:ss)			
March	21	2021	0	: 30	: 00	<input type="radio"/> AM <input type="radio"/> PM <input checked="" type="radio"/> 24hr
<input type="button" value="Calculate Solar Position"/>						
Equation of Time (minutes):	Solar Declination (degrees):	Solar Azimuth:	Solar Elevation:	cosine of solar zenith angle		
-7.14	0.35	281.2	80.09	0.985		
Azimuth is measured in degrees clockwise from north. Elevation is measured in degrees up from the horizon. Az & El both report dark after astronomical twilight.						

Fig.5. Cálculo de la posición angular del sol.

Fuente: NOAA solar calculator-ESRL Global monitoring laboratory

De acuerdo con la Fig.5, para el día 21 de marzo de 2021, el ángulo de elevación solar es de 80,09° y el de zenit es:

$$Z = \cos^{-1}(0.985) = 9.936^\circ$$

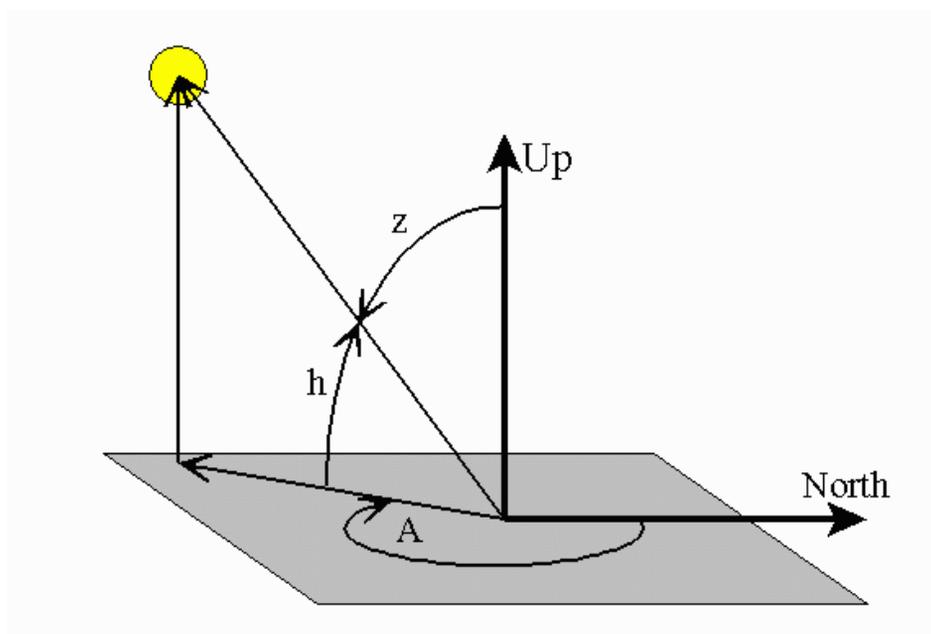


Fig.6. Posición angular del sol

A ángulo acimutal solar medido en sentido de las manecillas del desde el norte; **z** ángulo de zenit formado entre la vertical al plano horizontal local y la dirección de la radiación; **h** ángulo de elevación medido desde la horizontal.

Tabla 2

Condiciones de referencia de la localidad seleccionada

Ubicación ciudad de Guaranda		Irradiación promedio anual 0° (kWh/m ²)	Temperatura promedio anual del aire exterior (°C)	Temperatura promedio anual del agua fría (°C)
latitud	longitud			
-1,2 °	-78,89°	3,98	17	15

4.2. Calentador solar de tubos al vacío

4.2.1 Tipos de calentadores de agua con tubos de vacío

Los aspectos técnicos más relevantes relacionados con los captadores de tubos al vacío son su eficiencia energética, así como una mejor captación de la radiación solar debido al vacío que se produce en la región anular de los tubos. En cuanto a la eficiencia energética se puede indicar que supera en un 35% a los colectores planos convencionales construidos con tubería de cobre y

cubierta transparente de vidrio, que tienen un rendimiento térmico que varía entre el 40 hasta el 60%.

Tubos de vacío simples:

Este sistema se utiliza en colectores solares que funcionan por el efecto termosifón. Son tubos evacuados que se ensamblan de manera directa al tanque de acumulación que contiene agua. La pared interna del tubo de vacío se encuentra recubierta con un material absorbente que puede ser cromo negro. Cuando incide la luz solar en este material, se genera calor para calentar el agua que se encuentra en contacto con el tubo por la parte interna. El agua caliente se eleva por convección natural, es decir por efecto termosifón y es reemplazada por el agua fría que cae debido a su mayor densidad.

Desventajas:

El tubo es muy sensible a la presión y no ofrece ninguna protección contra las bajas temperaturas por lo que no es adecuado para ser utilizado en zonas con inviernos fríos y bajas temperaturas del ambiente. Por esta situación es necesario un calentador eléctrico para precalentar el agua del acumulador cuando alcanza bajas temperaturas. El agua al congelarse se expande y puede reventar los tubos por la presión interna.

Tubo de vacío heat pipe:

Dentro de cada uno de los tubos, a los que se ha hecho el vacío, se coloca un heat pipe o tubo de calor (Rufes Martínez, 2010), que es un dispositivo capaz de transmitir una gran cantidad de calor a partir de una pequeña diferencia de temperatura entre sus extremos. Dentro del tubo de calor de cobre, hay un líquido que se evapora en el rango de temperaturas deseado. Para aumentar la transferencia de calor desde la superficie interior del tubo de vacío al se colocan aletas de aluminio. El inconveniente de utilizar este tipo de tubo heat pipe radica en que no soporta altas tensiones térmicas.

Tubo de vacío de flujo directo:

En este tipo de colectores de tubos al vacío, se colocan una placa de material absorbente pintada de color negro mate que convierte la radiación solar en calor. Se acopla a la placa, un tubo en sentido longitudinal por donde circula el fluido térmico que eleva su temperatura al ponerse en contacto con el tubo. Algunos colectores de flujo directo utilizan la tecnología de concentradores cilíndrico parabólicos (CPC) para reflejar la energía solar que atraviesa por la región entre tubos y calentar por la parte posterior. Se pueden utilizar en regiones con climas de invierno muy frías y en bajas temperaturas.

4.2.2. Descripción del CSATV utilizado en los ensayos térmicos

En esta investigación se utiliza un colector solar de tubos concéntricos al vacío Marca TECNOSOLAR, que está formado con 20 tubos de borosilicato, con diámetro exterior de 58 mm., y longitud útil de 1800 mm. La superficie del tubo interior de vidrio está recubierta con una película absorbente (cromo negro) para captar la mayor cantidad de radiación solar posible. El tubo exterior de vidrio semitransparente permite el paso de la radiación solar que calienta la superficie absorbente de color negro mate, al aumentar la temperatura superficial del tubo emite radiación en el infrarrojo térmico. La ventaja de utilizar el vacío consiste en reducir las pérdidas térmicas por convección y radiación.

En la Fig.7., se puede observar al colector solar con un ángulo de inclinación de 30° , con cara del colector orientado al este. Es decir, hacia la salida del sol para aprovechar la radiación solar de la mañana en vista de que en la tarde la región donde se encuentra ubicada la instalación ($\phi = -158^\circ$; $L = -79^\circ$) tiene un clima variable con nubosidad y lluvias en la tarde. Por otra parte, para determinar el área de captación de la radiación solar, se considera que la luz ingresa por un rectángulo formado por el diámetro exterior del tubo (58mm) y su longitud (1800mm) obteniéndose un área de $2,088 \text{ m}^2$, similar al área del colector solar plano de tubos de cobre que tiene una longitud de 2m., de largo por 1 m., de ancho.



Fig.7. Calentador Solar de Tubos al Vacío con capacidad 200 litros

4.2.3. Acumulador

El acumulador de agua caliente sanitaria (ACS) utilizado en los ensayos de calentamiento tiene una capacidad de almacenamiento de 200L de agua. El diámetro interior del tanque de 0,42m, espesor de 0.8mm y longitud 1,44 m., con el propósito de reducir los efectos de la corrosión el material del tanque es acero inoxidable SUS 304 2B. La pared exterior se encuentra recubierta con aislante térmico de espuma de poliuretano de espesor 55 mm, para mantener la temperatura del agua caliente durante un tiempo de 72 horas. En este recipiente no presurizado instalado en forma horizontal, se acoplan los 20 tubos al vacío que calientan el agua por el efecto termosifón. Además dispone de dos neoplasmas para acometida del agua fría de la red y para salida del agua caliente sanitaria hacia las duchas. Es importante indicar en el interior del acumulador no existe ningún intercambiador de calor tipo serpentín o de forma helicoidal. Para proteger al tanque de las condiciones ambientales, en la pared cilíndrica exterior se halla instalado una envolvente metálica de acero inoxidable de espesor 0,4mm., con esto se evita que la humedad afecte a las características del aislamiento térmico, con la consecuente pérdida de calor hacia el ambiente.

Tabla 3

Características técnicas del colector solar de tubos de vacío marca TECNOSOLAR

N	Tipo de absorbedor	A (m ²)	Volumen (V)(l)	V/A (l/m ²)	Aislamiento térmico del tanque		Diámetro del tanque (mm)	Longitud del tanque (mm)
					material	espesor (mm)		
1	Tubo de vacío	2,088	200	95,78	Poliuretano	55	420	1440

4.3. Instrumentos de medición

Termómetro Electrónico Digital Hidro termómetro Agua

Para la toma de datos de las temperaturas de entrada del agua, del tanque de acumulación y del ambiente se utilizó el termómetro electrónico digital que tiene las siguientes especificaciones técnicas: pantalla LCD digital, alta precisión y estabilidad; rango de temperatura de -50 a 100 °C; resolución de visualización de temperatura 0,1°C; precisión ±1°C; sonda de caja moldeada de 1m.



Fig.8. Termómetro electrónico digital

Piranómetro Digital:

Es un instrumento digital que permite medir la irradiancia solar global difusa y directa (W/m^2) sobre superficie horizontal, para lo cual está compuesto por un sensor térmico con un campo de aplicación de 180° . A continuación, en la Fig.9., se observa el piranómetro para irradiancia global SM 206- SOLAR.



Fig.9. Medidor de irradiancia solar

El equipo anteriormente descrito tiene las siguientes especificaciones técnicas en unidades del sistema Internacional y sistema Inglés: resolución de 0.1 W / m^2 , $0.1 \text{ Btu / (ft}^2\text{-h)}$; rango de error: $\pm 10 \text{ W / m}^2$ [$\pm 3 \text{ Btu / (ft}^2\text{-h)}$]; pantalla 3-3 / 4LCD, valor numérico máximo visualizado 3999, rango: $0.1\text{-}399.9 \text{ W / m}^2$, $1\text{-}3999 \text{ W / m}^2$, $0.1\text{-}399.9 \text{ Btu / (ft}^2\text{-h)}$, $1\text{-}3999 \text{ Btu / (ft}^2\text{-h)}$, tiempo de muestreo 0.5 segundos; temperatura y humedad relativa de funcionamiento: 0 a 50 ° C, HR <80% ; temperatura y humedad de almacenamiento: -10 a 60 ° C, HR <70% ; batería de 9V ; Vida útil de la batería: Aprox. 100 horas de operación continua.

Anemómetro digital:

Es un instrumento que sirve para medir la velocidad del viento en m/s. Conocidos los valores de velocidad se puede determinar el promedio diario con lo que se calcula el coeficiente de convección externo, para determinar las pérdidas térmicas del calentador solar de tubos al vacío. Las características técnicas del anemómetro digital son:

Especificaciones técnicas: rango: $0 - 30 \text{ m / s}$, $0 - 90 \text{ km / h}$, $0 - 5860 \text{ pies / min}$, $0 - 65 \text{ mph}$, $0 - 55$ nudos; resolución: 0.1 m / s , 0.3 km / h , 19 pies / min , 0.2 mph , 0.2 nudos; umbral 0.1 m / s , 0.3 km / h , 39 pies / min , 0.2 mph , 0.1 nudos; con precisión: $\pm 5\%$.

Temperatura del aire: rango de -10 a 45 ° C, 14 a 113 ° F; resolución: 0.2 ° F, 0.36 ° F; precisión ± 2 ° C, ± 3.6 ° F; termómetro NTC con temperatura de funcionamiento: -10 a 45 ° C; 14 ° F a 113 ° F.



Fig.10. Anemómetro digital***Microcontrolador solar TK-7:***

Es un dispositivo de control electrónico de nivel de agua y temperatura, que funciona las 24 horas con el propósito de facilitar información en tiempo real sobre las condiciones térmicas de operación del calentador solar de tubos al vacío. En la Fig.11., se puede observar los principales componentes del microcontrolador solar TK-7

**Fig.11.** Microcontrolador Solar**Tabla 4**

Instrumentos de medición

Instrumento	Modelo
Termómetro electrónico	
Piranómetro digital	SM 206-SOLAR
Anemómetro digital	NTC
Microcontrolador	TKDZ

4.4. Descripción del método de ensayo

Determinación de la eficiencia térmica del calentador solar de agua con tubos de vacío (CSATV), a partir del estudio de las condiciones ambientales del lugar de ensayo y de los parámetros del colector que funciona por el efecto termosifón. Se debe tomar en consideración la ganancia óptica y las pérdidas térmicas.

Paso 1. Medición de los parámetros que se indican a continuación: irradiancia solar y difusa (W/m^2); temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$); Temperatura del agua fría ($^{\circ}\text{C}$); Temperatura del agua caliente sanitaria ($^{\circ}\text{C}$); velocidad del aire (m/s)

En el **Anexo A**, se indican las Tablas de datos correspondientes a los 10 ensayos realizados en el mes de marzo que corresponde a uno de los peores meses del año por la nubosidad y presencia permanente de lluvias.

A continuación en la Tabla 5 se puede observar los parámetros característicos ambientales y de funcionamiento del (CSATV) en promedio diario.

Tabla 5
Promedio de los parámetros característicos

Ensayo	Tentrada Te ($^{\circ}\text{C}$)	Ttanque Tp ($^{\circ}\text{C}$)	Tambiente Ta ($^{\circ}\text{C}$)	Irradiancia global Ig (W/m^2)	Irradiancia difusa Id (W/m^2)	Velocidad viento (m/s)
1	14.29	25.59	13.85	151.98	78.23	0.58
2	14.06	31.24	15.41	363.49	228.55	0.51
3	13.46	25.18	12.49	183.23	93.80	0.95
4	13.92	32.76	14.21	495.99	137.79	0.95
5	14.64	40.76	14.35	488.38	124.43	1.62
6	14.65	39.43	14.90	784.24	207.95	1.58
7	14.05	32.35	13.84	420.51	145.52	1.04
8	13.98	30.47	13.21	280.05	88.39	1.17
9	14.11	35.07	14.13	423.40	83.77	1.06
10	14.11	39.13	13.89	706.10	126.17	1.31
Promedio	14.13	33.20	14.03	429.74	131.46	1.08

Considerando los datos de la Tabla 5, Los valores promedios para la temperatura del ACS es de $33,20^{\circ}\text{C}$; Temperatura ambiente $14,03^{\circ}\text{C}$; temperatura de agua fría $14,13^{\circ}\text{C}$; Irradiancia solar global de $429,74 (\text{W}/\text{m}^2)$; irradiancia difusa proveniente de la bóveda celeste $131,46 (\text{W}/\text{m}^2)$ y la velocidad del viento de $1,08 (\text{m}/\text{s})$.

En esta etapa del proceso de levantamiento de datos es importante dar a conocer el procedimiento de análisis realizado para la validación de los valores de Irradiancia y temperatura del ACS. Para lo cual se utiliza como caso práctico el ensayo 1.

Tabla 6
Datos del colector solar de tubos al vacío. Ensayo 01

<u>Agua caliente sanitaria (ACS)</u>						
Tiempo (hr)	Tentrada Te (°C)	Ttanque Tp (°C)	Tambiente Ta (°C)	Irradiancia global Ig (W/m ²)	Irradiancia difusa Id (W/m ²)	Velocidad viento (m/s)
08:00	14.8	19	14.2	249	101.2	0
08:30	14.8	21	14.3	159.9	72.8	0.1
09:00	15	22	15.3	340.1	177.1	0.1
09:30	15	23	15.3	207.4	104.1	0.8
10:00	15.2	24	15.3	129.1	93.9	0.1
10:30	15.3	24	14	205.8	107	1
11:00	14.8	25	16	91.6	46.1	1
11:30	14.4	26	15	196.8	114.1	1
12:00	14.1	26	15	156.1	88.7	0.9
12:30	14.2	27	14	75.9	53.6	0.9
13:00	13.5	27	14	80.7	31.3	0.9
13:30	13.5	27	13	88.1	57.3	0.9
14:00	13.7	28	13	172.3	97.2	0.8
14:30	13.8	29	12	171.1	69.2	0.1
15:00	13.9	29	11	113.8	44.1	0.1
15:30	14	29	12	86.4	35.6	0.6

16:00	13	29	12	59.6	36.6	0.6
Promedio	14.29	25.59	13.85	151.98	78.23	0.58

Datos recolectados en la ciudad de Guaranda, Bolívar. Condición climática= muy nuboso, n=68.

El horario para la toma de datos se selecciona de 8:00 AM hasta las 16:00 PM, tomando en cuenta el ángulo horario máximo para la mañana de (+ 60°) y en la tarde hasta (-60°). Este ángulo tiene un valor de 15° para cada hora del día, en la mañana es (+) y en la tarde (-) y se lo toma desde el mediodía solar o zenit. De acuerdo con las condiciones climáticas del sitio no es recomendable realizar el levantamiento de datos muy por la mañana debido a la baja altura solar y presencia de neblina y por la tarde por los efectos de la lluvia y nubosidad, donde la irradiancia global decrece notablemente y al realizar los cálculos de la eficiencia térmica dan valores negativos.

Con los datos correspondientes a la irradiancia solar global y la difusa se calcula la directa para posteriormente representar gráficamente como se puede observar en la Fig.12., que se presenta a continuación.

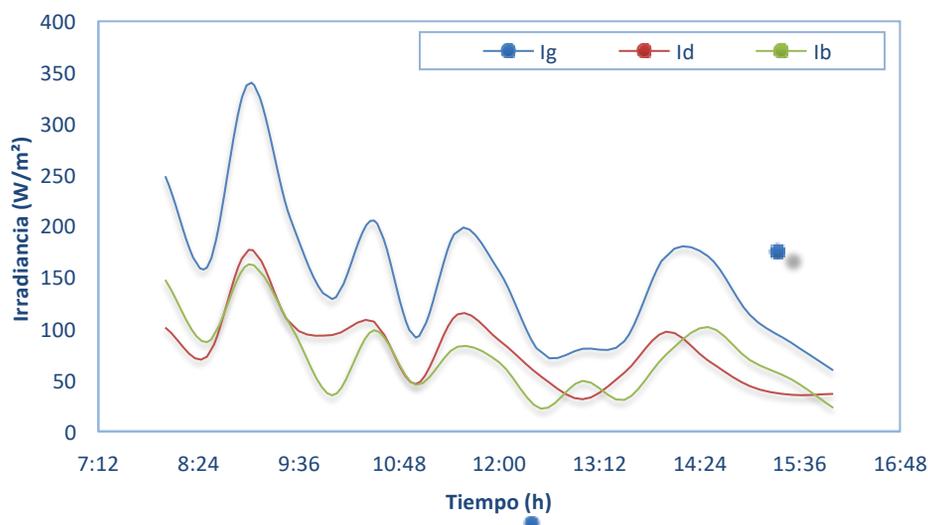


Fig. 12. Irradiancias: global (Ig), directa (Id) y difusa (Ib); Ensayo 01.

Tomando en cuenta la tendencia de datos de irradiancia global de la Fig. 12., se puede indicar que en este día existe presencia de nubosidad a lo largo de todo el período de ensayo.

Por otra parte, para determinar el perfil de temperatura del proceso de calentamiento de agua sanitaria (ACS) utilizando el calentador de tubos al vacío, se realiza la Fig.13., donde la curva se

aproxima a una ecuación de segundo grado con R^2 de 0,9834 que es una medida estadística que indica que tan cerca están los datos de la curva de regresión ajustada. Esta tendencia se manifiesta en la mayoría de los ensayos térmicos realizados.

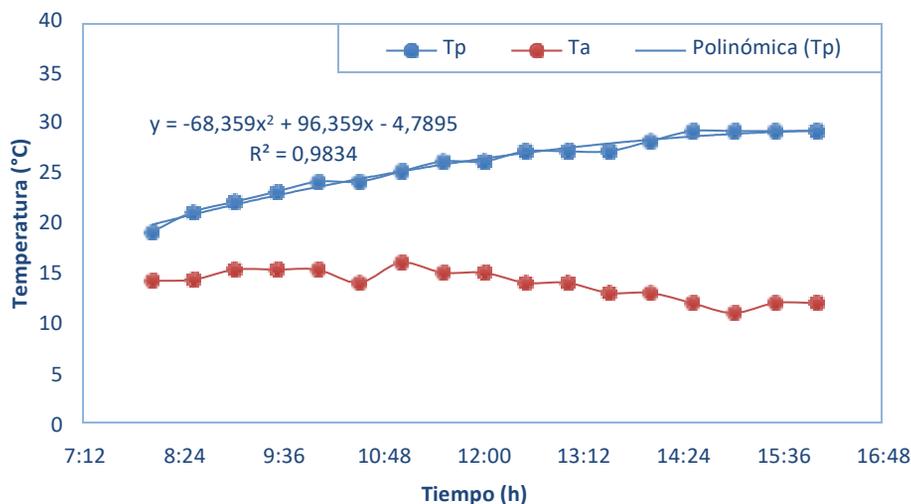


Fig. 13. Temperatura del ACS, Ensayo 01.

Paso 2. Parámetros característicos del CSATV

Componentes de la radiación sobre plano inclinado

Puesto que el colector solar formará generalmente un cierto ángulo con el plano horizontal, habrá que conocer los valores, tanto horarios como diarios, de las componentes directa y difusa de la irradiación que inciden sobre un plano inclinado. De acuerdo con Hottel y Woertz (1942), la componente difusa puede considerarse isótropa, es decir, uniformemente distribuida en el cielo. Esto es más exacto cuando el cielo está igualmente cubierto de nubes. Además, se considera la reflexión del suelo u otras posibles superficies que reflejan la radiación difusa, debiéndose añadirse al resto. De esta forma, la expresión que proporciona la radiación total horaria sobre una superficie inclinada un ángulo s es la siguiente:

$$I_T = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos(s)}{2} \right) + (I_b + I_d) \rho \left(\frac{1 - \cos(s)}{2} \right) \quad (2)$$

De allí que: I_b Irradiancia directa (W/m^2); I_d Irradiancia difusa (W/m^2); s ángulo de inclinación del colector; ρ reflectividad del suelo.

El factor R_b es el cociente entre la radiación que incide sobre una superficie inclinada y la que incide sobre una superficie horizontal. Este factor puede expresarse en función del ángulo i que forman la dirección de la radiación directa y su componente sobre la perpendicular a la superficie inclinada. $R_b = \frac{\cos(i)}{\sin(\alpha)}$ con α el ángulo correspondiente a la altura del Sol. Supuesto que la orientación de la superficie es sur, es decir, $\gamma = 0$, mediante las expresiones obtenidas se llegan al siguiente resultado:

$$R_b = \frac{\cos(L-s) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(L-s) \sin(\delta) \cos(L) \cos(\delta)}{\cos(\omega) + \sin(L) \sin(\delta)} \quad (3)$$

Dónde: L latitud del sitio; ω ángulo horario, δ ángulo de declinación.

Función y valores característicos:

El captador representa la fuerza motriz de la instalación. En su interior se calienta el fluido de trabajo por la energía de la radiación solar, transfiriéndose el calor generado a través del circuito primario que, en la mayoría de los casos se almacena en un acumulador. Según se vaya necesitando, el calor pasa desde el acumulador al circuito de consumo.

Todos los diseños tienen el objetivo común de convertir con el mayor rendimiento posible la radiación solar en calor, para después suministrar eficientemente éste a los consumos. Los diseños de los captadores varían considerablemente en cuanto a calidad, rendimiento, construcción y costo. En los siguientes apartados se describirán las propiedades típicas de los captadores, usándose para ello curvas y valores característicos. Una lista completa que abarque todos los valores característicos básicos es parte esencial de una descripción correcta de las propiedades de los captadores, y en el caso de que falten algunos de estos valores, será imposible la realización de cualquier análisis o la comparación de los captadores entre sí. En Europa la norma principal para la determinación de los valores característicos de los captadores se establece a partir de la EN 12975.

Curvas de rendimiento de los captadores:

El rendimiento del captador, η , es la relación entre la potencia térmica generada por unidad de área y la irradiancia solar incidente. Es un valor que carece de dimensiones y se suele expresar en forma porcentual.

Un modelo matemático utilizando con bastante frecuencia, que también se aplica en EN 12975, describe la curva característica del rendimiento de un captador:

$$\eta = \eta_0 - a_1 \frac{(T_m - T_a)}{E_g} - a_2 \frac{(T_m - T_a)^2}{E_g} \quad (4)$$

η_0 Representa el rendimiento del captador cuando la diferencia entre la temperatura media del fluido y la temperatura ambiente sea igual a cero, o sea, el captador se halla a temperatura ambiente, anulándose los dos últimos términos de la ecuación. El factor η_0 también se denomina rendimiento óptico del captador o también eficacia óptica, no debiéndose confundir con el factor óptico, que es el producto $\tau\alpha$.

Las pérdidas térmicas del captador se describen por medio de los dos coeficientes de pérdidas térmicas a_1 y a_2 . El coeficiente a_1 define una variación lineal, mientras que a_2 denota una variación cuadrática de las pérdidas térmicas. Se trata de una aproximación matemática al modelo físico real. Cuanto mayor sean los dos coeficientes, menor será el rendimiento, sobre todo a elevadas temperaturas.

Tabla 7

Magnitudes y símbolos relacionados con la ecuación de la curva de rendimiento del captador

Símbolo	Unidad	Descripción	Valor
η	%	Rendimiento del captador	
η_0	%	Rendimiento óptico del captador = $\alpha\tau F'(\theta = 0^\circ)$	
a_1	$W/(m^2K)$	Coficiente lineal de pérdidas térmicas	1,2-4
a_2	$W/(m^2K^2)$	Coficiente cuadrático de pérdidas térmicas	0,005-0,015
T_e	°C	Temperatura de entrada del fluido de trabajo	
T_s	°C	Temperatura de salida del fluido de trabajo	
T_m	°C	Temperatura media del fluido de trabajo en el absorbedor	
T_a	°C	Temperatura ambiente	
E_g	W/m^2	Irradiancia	1000
F'	%	Factor de eficiencia del captador	0,92-0,97

τ	%	Transmitancia de la cubierta	0,88-0,91
α	%	Absortancia del absorbedor	0,90-0,96
Valores adicionales			
K_{θ}	%	Modificador del ángulo de incidencia	
$a_{glob} = a_1 + a_2 \Delta T$		Coefficiente global de pérdidas térmicas	
$(\Delta T = T_m - T_a)$			
C	$kJ/m^2.K$	Capacidad térmica del captador	

Paso 3. Corrección de la irradiancia y cálculo de la eficiencia térmica

Para el procedimiento de cálculo en Mathcad se toma como referencia los datos del ensayo 1

$\rho := 0.4$		Reflectividad del concreto, arena
$I_g := 129.1$	$\left(\frac{W}{m^2}\right)$	Irradiancia global
$I_d := 93.9$	$\left(\frac{W}{m^2}\right)$	Irradiancia difusa
$I_b := I_g - I_d$		
$I_b = 35.2$	$\left(\frac{W}{m^2}\right)$	Irradiancia directa
$\beta := 30 \cdot \frac{\pi}{180}$	(°)	Angulo de inclinación del colector de tubos al vacío
$\phi := -1.58 \cdot \frac{\pi}{180}$	(°)	Latitud de la ciudad de Guaranda
$n := 68$		Número de día del año

$$\delta_e := 23.45 \cdot \sin\left[\frac{\pi}{180} \cdot (284 + n) \cdot \frac{360}{365}\right] \quad \text{Angulo de declinación, COOPER}$$

$$\delta_e = -5.204 \quad (^\circ)$$

$$\omega_1 := 30 \cdot \frac{\pi}{180} \quad (^\circ) \quad \text{Angulo horario, en la mañana positivo}$$

$$R_b := \frac{\cos(\phi - \beta) \cdot \cos\left(\delta_e \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot \cos(\omega_1) + \sin\left(\delta_e \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot \sin(\phi - \beta)}{\cos(\phi) \cdot \cos\left(\delta_e \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot \cos(\omega_1) + \sin(\phi) \cdot \sin\left(\delta_e \cdot \frac{\pi}{180}\right)}$$

$$R_b = 0.905 \quad \text{Factor para pasar la radiación directa de la horizontal a inclinada}$$

$$I_T := I_b \cdot R_b + I_d \cdot \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2}\right) + (I_b + I_d) \cdot \rho \cdot \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2}\right)$$

$$I_T = 122.915 \quad \left(\frac{W}{m^2}\right) \quad \text{Irradiancia total sobre superficie inclinada}$$

La eficiencia óptica se calcula mediante el producto entre transmitancia y absorptancia del tubo de vacío por el coeficiente de rendimiento teórico del captador.

$$n_o = \tau \alpha F' \quad (5)$$

Por lo tanto, utilizando los datos de la Tabla 7 normativa EN-12975, donde la transmitancia del tubo de vidrio semitransparente $\tau = 0.895$ es el promedio entre 0,88 y 0,91; para la absorptancia del recubrimiento de cromo negro del tubo de vacío $\alpha = 0.93$ que corresponde al promedio entre 0,9 y 0,96; $F' = 0.945$ factor de eficiencia del colector que se obtiene mediante el promedio entre 0,92 y 0,97 respectivamente. Reemplazando los valores anteriormente descritos, y en términos de porcentaje (%) la eficiencia óptica es del 78,65%.

$$n_o = (0.895)(0.93)(0.945) = 0.7865$$

A continuación se realiza el procedimiento para definir el modelo matemático de la eficiencia instantánea, considerando el coeficiente lineal de pérdidas térmicas $a_1 = 12$; y el coeficiente cuadrático de pérdidas térmicas $a_2 = 0.015$ con lo que se obtiene la siguiente expresión:

$$\eta = 0.7865 - 12 \frac{(T_m - T_a)}{E_g} - \frac{0.015 (T_m - T_a)^2}{E_g} \quad (6)$$

Con la ecuación (8) se calculan los datos de eficiencia instantánea del colector para cada ensayo y período de tiempo. En la Tabla 8 se muestran los datos correspondientes a l Ensayo 1

Tabla 8
Cálculo de la eficiencia térmica, Ensayo 01

Tiempo (hr)	Irradiancia directa Ib (W/m ²)	IT (W/m ²)	ΔT	$(\Delta T)^2$	no	n	$(T_p - T_a)/IT$
08:00	147.8	240.45	4.80	23.04	0.79	0.76	0.0200
08:30	87.1	152.93	6.70	44.89	0.79	0.73	0.0438
09:00	163	323.73	6.70	44.89	0.79	0.76	0.0207
09:30	103.3	196.63	7.70	59.29	0.79	0.73	0.0392
10:00	35.2	122.91	8.70	75.69	0.79	0.69	0.0708
10:30	98.8	194.4	10.00	100.00	0.79	0.72	0.0514
11:00	45.5	86.38	9.00	81.00	0.79	0.65	0.1042
11:30	82.7	186	11.00	121.00	0.79	0.71	0.0591
12:00	67.4	147.44	11.00	121.00	0.79	0.68	0.0746
12:30	22.3	72.07	13.00	169.00	0.79	0.53	0.1804
13:00	49.4	75.79	13.00	169.00	0.79	0.55	0.1715
13:30	30.8	83.58	14.00	196.00	0.79	0.55	0.1675
14:00	75.1	163.24	15.00	225.00	0.79	0.66	0.0919
14:30	101.9	161.82	17.00	289.00	0.79	0.63	0.1051
15:00	69.7	108.07	18.00	324.00	0.79	0.54	0.1666
15:30	50.8	82.61	17.00	289.00	0.79	0.49	0.2058
16:00	23	57.06	17.00	289.00	0.79	0.35	0.2979
Promedio	73.75	144.42	11.74	154.16	0.79	0.63	0.11

no=eficiencia óptica; n=eficiencia instantánea.

Para un valor promedio diario de irradiancia corregida para superficie inclina (30°) de 144,42 (W/m²) la eficiencia térmica es de 0,63 que en térmicos de porcentaje representa el 63%.

En el análisis de los sistemas de calentamiento de agua con energía solar, es importante definir la curva de rendimiento térmico del colector, por lo que utilizando los datos de eficiencia instantánea que se registran en la Tabla 8 se presenta la Fig.14

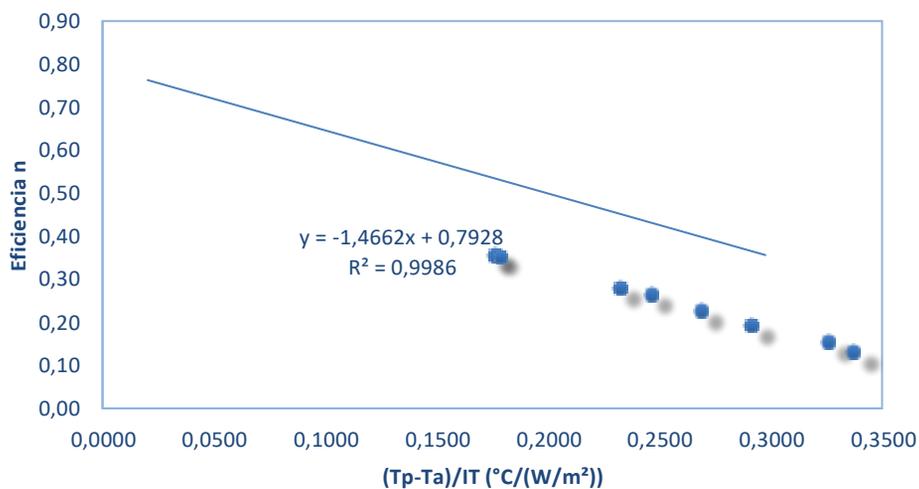


Fig. 14. Eficiencia térmica, Ensayo 01.

De acuerdo con la Fig.15., se puede indicar que la irradiancia corregida no difiere en mayor cantidad que la irradiancia solar global, por lo que en primera aproximación se podría para este caso de estudio, reemplazar los valores de irradiancia global medido sobre superficie horizontal, en la ecuación (6)



Fig. 15. Irradiancias global (I_g) y corregida (I_T), Ensayo 01.

Realizando el procedimiento de cálculo de eficiencia térmica del (CSATV), para los 10 ensayos se presentan los datos en la siguiente Tabla 9.

Tabla 9

Eficiencia térmica del calentador solar de agua con tubos al vacío

Ensayo	Irradiancia directa I_b (W/m^2)	I_T (W/m^2)	ΔT	$(\Delta T)^2$	no	n	$(T_p - T_a)/I_T$
1	73.75	144.42	11.74	154.16	0.79	0.63	0.11
2	159.34	409.16	13.72	232.06	0.79	0.72	0.04
3	89.43	172.88	12.68	178.70	0.79	0.68	0.08
4	358.20	462.42	18.55	395.45	0.79	0.70	0.06
5	363.95	452.86	26.41	813.61	0.79	0.65	0.08
6	576.29	725.61	24.53	694.87	0.79	0.72	0.04
7	274.99	390.26	18.51	373.87	0.79	0.70	0.06
8	191.66	257.90	17.25	320.01	0.79	0.65	0.07
9	339.63	387.65	20.94	483.84	0.79	0.63	0.10
10	579.93	637.81	25.25	714.06	0.79	0.71	0.05
Promedio	300.72	404.10	18.96	436.06	0.79	0.68	0.07

I_T =irradiancia corregida; no=eficiencia óptica; n=eficiencia instantánea.

De acuerdo con la tabla anterior, la eficiencia térmica del calentador solar de agua con tubos al vacío es del 68% para el peor mes, con una irradiancia corregida para la superficie inclinada 30° con respecto al este, de $404,10 W/m^2$.

4.5. Proceso de calentamiento y ebullición del agua

Para conocer la temperatura de saturación del agua es necesario calcular la presión de saturación que corresponde a la presión atmosférica local, la misma que depende de la altura geográfica, como consecuencia de la reducción de la capa de aire en la atmósfera. En la troposfera la presión en función de la altura se puede calcular mediante la expresión dada en (Corvalan, Horn, & Roman, 1992).

$$P = P_0 \left[\frac{288 - 0,0065z}{288} \right]^{5,256} \quad (7)$$

Dónde: P_0 es la presión atmosférica a nivel del mar en (Pa); z la altura geográfica (m); P es la presión atmosférica local en (Pa). Reemplazando la altura geográfica de la ciudad de Guaranda de 2668 msnm., se obtiene una presión de 73065,27 (N/m²), que equivale a 0,073 MPa.

A continuación se calcula la temperatura de ebullición del agua con los siguientes datos tomados de (Potter & Somerton, 2004)

Tabla 10

Datos para hallar la temperatura de saturación del agua

P°, MPa	Temperatura (°C)
0,06	85,9
0,073	x
0,08	93,5

Realizando la respectiva interpolación, la temperatura de saturación del agua en la ciudad de Guaranda es de 90,84 °C.

4.6 Calentamiento y ebullición del agua

Para hallar el calor sensible de calentamiento de un fluido se puede utilizar la siguiente expresión:

$$Q_s = mC_p(T_{SAT} - T_i) \quad (8)$$

Dónde: Q_s calor sensible para calentamiento del agua (kJ); m masa de agua (kg); C_p capacidad calorífica del agua a presión constante (kJ/kg°C); T_{SAT} temperatura de saturación o de ebullición del agua a la presión atmosférica local (°C); T_{ij} temperatura del agua fría o la temperatura de suministro del calentador solar de tubos de vacío.

En la cocción de alimentos, para calentar 2 litros (2kg) de agua fría con una temperatura de 14,13 °C y $C_p = 4184$ (kJ/kg °C) hasta la temperatura de ebullición de 90,84 °C se requiere un consumo energético de 641,9 kJ., mientras que al utilizar agua precalentada proveniente del captador solar de tubos al vacío con temperatura promedio de suministro de 33,20 °C, el consumo energético es de 482,33 kJ, dando como resultado un ahorro energético de 159,57 kJ que corresponde al 25%. Sin embargo, en un día soleado se puede conseguir un mayor ahorro energético porque el agua precalentada puede ser suministrada a temperaturas alrededor de 86°C.

En este último caso, el calor sensible requerido para alcanzar la temperatura de ebullición de 90,84°C, es de 40,51 kJ, produciendo un ahorro energético de 601,4 kJ., que equivale a 93,69% al comparar con el consumo energético que se requiere para calentar el agua fría.

4.7 Consumo de gas de uso doméstico

Para hallar la densidad energética (Baskakov, 1985) de un combustible se utiliza la siguiente expresión:

$$Q = \frac{M_{gas}}{t_{combustion}} \varepsilon HR \quad (9)$$

Dónde: M_{gas} masa de gas (kg) que se quema en un período de tiempo; $t_{combustion}$ es el tiempo de combustión (s); HR calor de combustión o entalpía de reacción del combustible en (kJ/kg); ε la eficiencia de combustión, para el GLP de 0,53 en quemador normal; y Q es la potencia térmica o densidad energética del combustible (W).

De acuerdo con investigaciones realizadas, el desprendimiento de potencia térmica de una llama de quemador de cocina de gas es 2.16 kW. Si el calor de combustión del (GLP) es de 51000 (kJ/kg), para el agua fría la ebullición se consigue en un tiempo de 12 minutos que equivale a (720 s), por lo que reemplazando estos datos en la Ecuación (9) el consumo de gas es 0,05753 (kg). Por otra parte, el tiempo necesario para alcanzar el punto de ebullición del agua precalentada

es de 6 minutos, obteniéndose un consumo de gas de 0,02876 (kg) que representa un ahorro del 50%., en el gas de uso doméstico.

4.8. Proyección del ahorro en el consumo de gas de uso doméstico.

Para realizar una estimación del ahorro energético, y económico se toma en cuenta la cantidad de viviendas del Cantón Guaranda, que utilizan gas, por lo que de acuerdo con el censo de 2010, el 65,4% es de la población utiliza gas (31189 casos) de acuerdo con el grafico de la Fig.16.

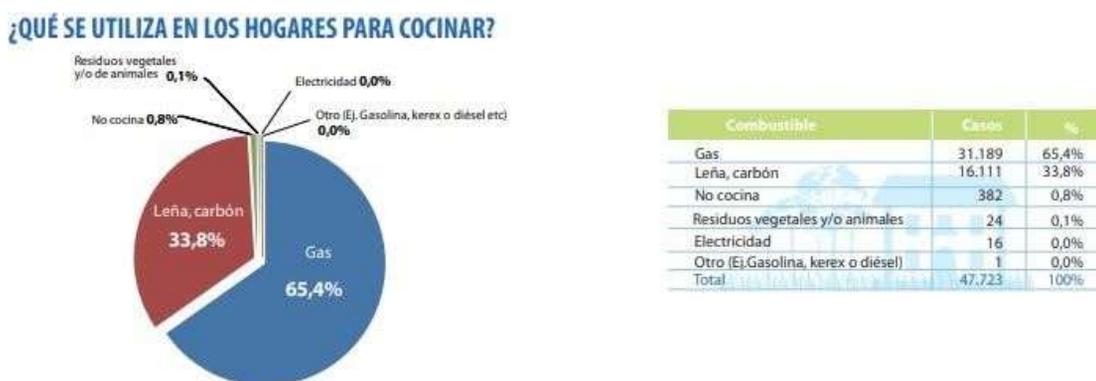


Fig.16. Combustibles que se utilizan para la cocción de alimentos

Fuente: INEC, censo 2010 del cantón Guaranda

Se supone que al día se preparan 3 comidas, utilizando la masa de gas que se ahorra de 0,02876 (kg) hasta alcanzar la temperatura de ebullición del agua, por la demanda total de gas de la ciudad se obtiene al año lo siguiente:

$$M_{gas} = N_c m_{gas} N_d D_e \quad (10)$$

Dónde: M_{gas} masa total de gas que se ahorraría en un año (kg); N_c numero de comidas que se preparan en el día (3) m_{gas} cantidad de gas que se deja de quemar al utilizar agua precalentada (0,02876 kg); N_d número de días del año (365); D_e demanda de usuarios del Cantón Guaranda (31189). Reemplazando valores se tiene:

$$M_{gas} = (3)(0,02876)(365)(31189) = 98221022 \text{ (kg)}$$

Con un cilindro de gas de 15 kg, se tendría una reducción de 65.480 cilindros de GLP a un valor subsidiado de 1.6 USD el ahorro económico anual es de 104 768 USD.

A parte de conocer las ventajas en la reducción el consumo de (GLP) y el ahorro económico, es necesario tomar en cuenta el aspecto ambiental para estimar las emisiones por lo que se utiliza el estudio sobre emisiones provocadas por la combustión de gas licuado de petróleo a partir de calefones (Samaniego Ojeda , Alvarez Hernández , & Maldonado Correa , 2016)

Tabla 11

Emisiones por cilindro de gas licuado de petróleo (GLP)

<u>Emisiones por cilindro de GLP</u>	<u>g/cilindro</u>
CO2	43224,8
SO2	3,0
NOx	42,6
Volátiles	7,6
CO	7,6
Partículas	<u>1,5</u>

La reducción en las emisiones de CO₂ son:

$$TON_{CO_2} = (65480 \text{ cil.})(432248 \text{ kg}/1000) = 283035$$

En un año se reducirían 2830, 35 Toneladas métricas de CO₂

5. Resultados y discusión

Tabla 12

Valores promedios de irradiancia corregida, eficiencia y velocidad del viento

Ensayo	EFICIENCIA (n)	IRRADIANCIA IT (W/m ²)	Velocidad viento (m/s)
1	0,63	144,42	0,58
2	0,72	409,16	0,51
3	0,68	172,88	0,95
4	0,7	462,48	0,95
5	0,65	452,86	1,62
6	0,72	725,61	1,58
7	0,7	390,26	1,04
8	0,65	257,9	1,17
9	0,63	387,65	1,06
10	0,71	637,81	1,31
Promedio	0,68	404,10	1,08

Se ha determinado que la eficiencia térmica del colector solar de tubos al vacío ensayado en condiciones climáticas adversas alcanza el 68 %, valor que es superior al de los captadores planos con tubería de cobre, placa absorbedora de color negro mate y cubierta semitransparente de vidrio templado que alcanzan del 40 al 60 % de rendimiento térmico.

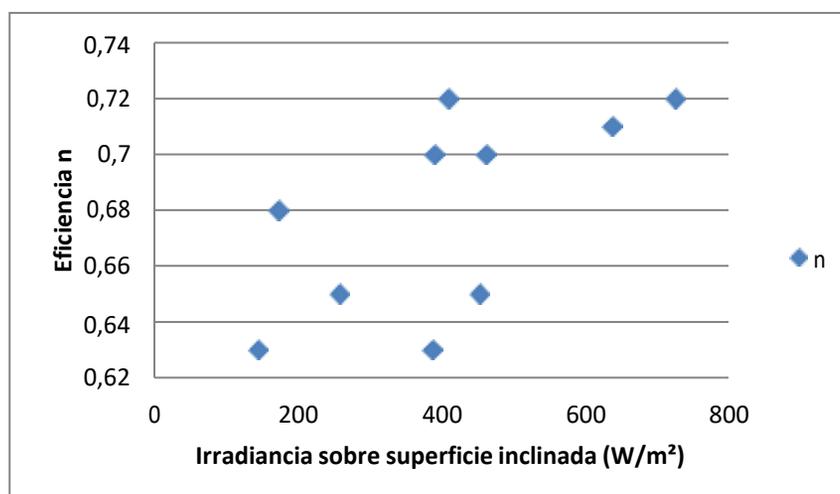


Fig.17. variación de la eficiencia térmica con la irradiancia

De acuerdo con la Fig.17., al aumentar la irradiancia solar aumenta la eficiencia, al disminuir la irradiancia solar sobre superficie inclinada disminuye el rendimiento térmico.

En cuanto a la variación de la eficiencia térmica con la velocidad del viento Fig.18., no se ve afectada porque los tubos al vacío están diseñados para reducir las pérdidas por convección natural hacia el ambiente

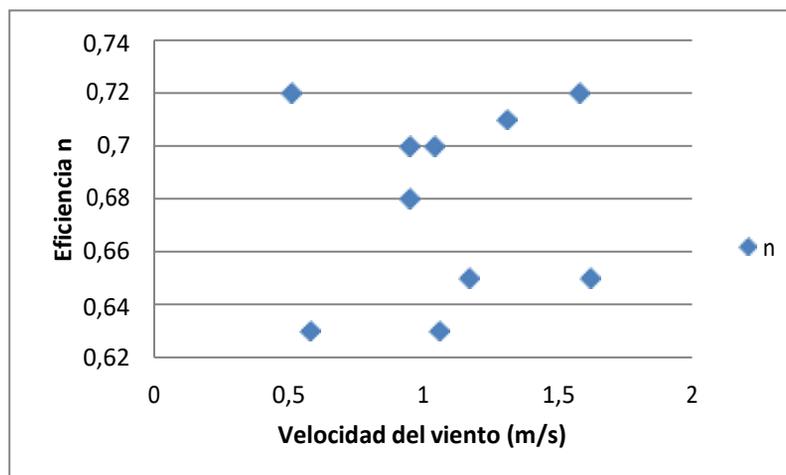


Fig.18. Efecto de la velocidad del viento en la eficiencia térmica

6. Conclusiones

El recurso solar disponible en la ciudad de Guaranda, de acuerdo con las técnicas de estimación del BM, NASA, INAMHI es de 3,98 (kWh/m²día). Si se toma la media mundial de la irradiancia de 1000 W/m², las horas de sol pico (HSP) disponibles para el calentamiento del agua caliente sanitaria (ACS) es de 3,98 h.

En el sitio de ensayo ubicado en una latitud de -1,58° y longitud -79°, la irradiancia global promedio medida con el piranómetro es de 420,74 (W/m²) y la corregida sobre superficie inclinada 30°, es de 404, 10 (W/m²), con una variación del 5,96%.

En esta investigación se utilizó un calentador solar de agua con tubos al vacío (CSATV) con capacidad del acumulador de 200L y área de captación de 2,088 m², con el que se establece una eficiencia térmica del 68% para el peor mes del año que corresponde a marzo.

Analizando el proceso de combustión del gas, se indica que para alcanzar la temperatura de ebullición del agua de 90,84 °C a 2680 msnm, partiendo a la temperatura de agua fría de 14,3 °C,

el tiempo es de 12 minutos. Por otra parte si se utiliza agua precalentada a 33,20 °C el tiempo se reduce a 6 minutos, logrando un ahorro en el consumo de gas de 0,02876 (kg) en el calentamiento de 2L. de agua.

Realizando una proyección futura de los resultados de esta investigación, tomado como caso práctico el Cantón Guaranda, que según el CENSO de 2010 el 65,4% de la población utiliza gas de uso doméstico es decir 31189 viviendas, se tiene que se dejaría de utilizar 65480 cilindros de gas por año. Por lo tanto, de acuerdo con la Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero (ARCH) que verifica la venta oficial del cilindro de gas en 1,6 USD. El ahorro anual sería de 104768 USD. Considerando el precio de distribuidor de 3,5 USD el ahorro anual sería de 229180 USD. Además, La reducción de emisiones de CO₂ sería de 2830,35 Toneladas métricas por año.

Bibliografía

Arias , J., Caydiid , M., & Omondi, A. (2018). Evaluación de la eficiencia térmica en estufas fabricadas y modificadas a biogás . *Red de Biodigestores para América Latina y el Caribe* , 6.

Arora , S., Chitkara , S., & Udayakumar, R. (2011). Thermal analysis of evacuated solar tube collectors . *Journal of petroleum an gas engineering* , 9.

Baskakov, A. P. (1985). *Termotecnia* . URSS: Editorial MIR.

Bataineh, K. M., & Al-Karasneh, A. N. (2016). Direct solar steam generation inside evacuated tube absorber . *Energy*, 15.

Corvalan, R., Horn, M., & Roman , R. (1992). *Ingeniería del Secado Solar*. Madrid: Cytod-D.

Dabra, V., Yadav, L., & Yadav, A. (2013). The effect of the tilt angle on a performance of evacuated tube solar air collector: experimental analysis. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCE AND TECHNOLOGY* , 11.

De Juana, J. (2007). *Energías Renovables para el Desarrollo*. Madrid, España: Thomson Editores.

De Juana, J. M. (2007). *Energías Renovables para el Desarrollo* . Madrid: Thomson.

- Hussain , H. A., Jawad, Q., & Sultan, K. F. (2014). Experimental analysis on the thermal efficiency of evacuated tube solar collector by using nanofluids . *International Journal of Sustainable and Green Energy* , 10.
- Jia, X., Wu, G., & Jeng, T. (2017). Experimental study for evacuated tube solar collector with/without a compound parabolic concentrator . *EAME 2017*, 5.
- Juana, J. M. (s.f.). *Energías Renovables para elñ*.
- Jutglar, L. (2004). *Energía Solar* . Barcelona: Grafos Arte.
- Leon Guijarro, J. F. (2015). Modificación del sistema de combustión autorregulable para eliminar problemas de flotación de llama y ruido en un quemador rápido en una cocina de gas . *Tesis de grado Ingeniería Mecánica ESPOL* , 63.
- Li, G., Pei, G., & Su, Y. (2016). Performance study of a static low concentration evacuated tube solar collector for medium temperature applications . *International Journal of Low Carbon technologies* , 365.
- Núñez, M. P., Martinez-Rodriguez, G., & Fuentes-Silva, A. L. (2016). Targeting and Design of Evacuated-Tube Solar Collector Networks. *CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS*, 6.
- Olczak, P., Matuszewska, D., & Zavaglo, J. (2020). The comparision of solar energy gaining effectiveness between flat plate collectors and evacuated tube collectors with heat pipe: Case study . *Energies* , 14.
- Pankaj, J., Sachin , M., & Ganesh, B. (2016). Performance evaluation of a evacuated glass tube solar collector with latent heat storage material . *IJEDR* , 7.
- Potter, M. C., & Somerton, C. W. (2004). *Termodinámica para Ingenieros* . Madrid: Mc Graw Hill.
- Ricci, M., Bocci, E., & Michelangeli, E. (2015). Experimental test of solar collectors prototypes systems . *Science Direct*, 8.
- Rojas, F., Jiménez , F., & Soto , J. (2018). Análisis teórico y experimental de la potencia y eficiencia térmica de cocinas industriales que usan gas licuado de petróleo . *Research Gate* , 7.
- Rufes Martinez, P. (2010). *Energía Solar Térmica* . Barcelona : Marcombo .
- Samaniego Ojeda , C., Alvarez Hernández , O., & Maldonado Correa , J. (2016). Emisiones provocadas por combustión de GLP a partir de calefones en la ciudad de Loja y su posible relación con enfermedades respiratorias agudas. *CEDAMAZ*, 8.
- Yadav, A., & Saraswat, A. (2016). An experimental study on evacuated tube solar collector for steam generation in India . *International Journal of Energy and Power engineering* , 5.
- Yao, K., Li, T., & Tao, H. (2015). Performance evaluation of all glass evacuated tube solar water heater with twist tape inserts using CFD. *Science Direct* , 332.

Zubriski, S., & Dick, K. (2021). Measurement of the efficiency of evacuated tube solar collectors under various operating conditions . *Journal of Green Building* , 114.

Nomenclatura

A (m^2): Área de apertura del colector

$G_{dm}(0^\circ)$ ($kWh/m^2día$): Irradiación solar sobre el plano horizontal

IT (W/m^2): Irradiancia solar sobre el plano del colector de tubos al vacío

I_d (W/m^2): Irradiancia difusa

I_b (W/m^2): Irradiancia directa

I_g (W/m^2): Irradiancia solar global

T_{amb} ($^\circ C$): Temperatura ambiente

T_{in} ($^\circ C$): Temperatura de entrada del agua fría

T_{out} ($^\circ C$): Temperatura de salida del agua caliente

V (l): Volumen del tanque

CSATV: Calentador solar de agua con tubos de vacío

ANEXO A.

Datos de los ensayos realizados con el calentador solar de agua con tubos al vacío (CSATV)

Tabla 1.

Datos del colector solar de tubos al vacío, Ensayo 01

<u>Agua caliente sanitaria (ACS)</u>						
Tiempo (hr)	Tentrada Te (°C)	Ttanque Tp (°C)	Tambiente Ta (°C)	Irradiancia global Ig (W/m ²)	Irradiancia difusa Id (W/m ²)	Velocidad viento (m/s)
08:00	14.8	19	14.2	249	101.2	0
08:30	14.8	21	14.3	159.9	72.8	0.1
09:00	15	22	15.3	340.1	177.1	0.1
09:30	15	23	15.3	207.4	104.1	0.8
10:00	15.2	24	15.3	129.1	93.9	0.1
10:30	15.3	24	14	205.8	107	1
11:00	14.8	25	16	91.6	46.1	1
11:30	14.4	26	15	196.8	114.1	1
12:00	14.1	26	15	156.1	88.7	0.9
12:30	14.2	27	14	75.9	53.6	0.9
13:00	13.5	27	14	80.7	31.3	0.9
13:30	13.5	27	13	88.1	57.3	0.9
14:00	13.7	28	13	172.3	97.2	0.8
14:30	13.8	29	12	171.1	69.2	0.1
15:00	13.9	29	11	113.8	44.1	0.1
15:30	14	29	12	86.4	35.6	0.6
16:00	13	29	12	59.6	36.6	0.6
Promedio	14.29	25.59	13.85	151.98	78.23	0.58

Datos recolectados en la ciudad de Guaranda, Bolívar. Condición climática= muy nuboso, n=68.

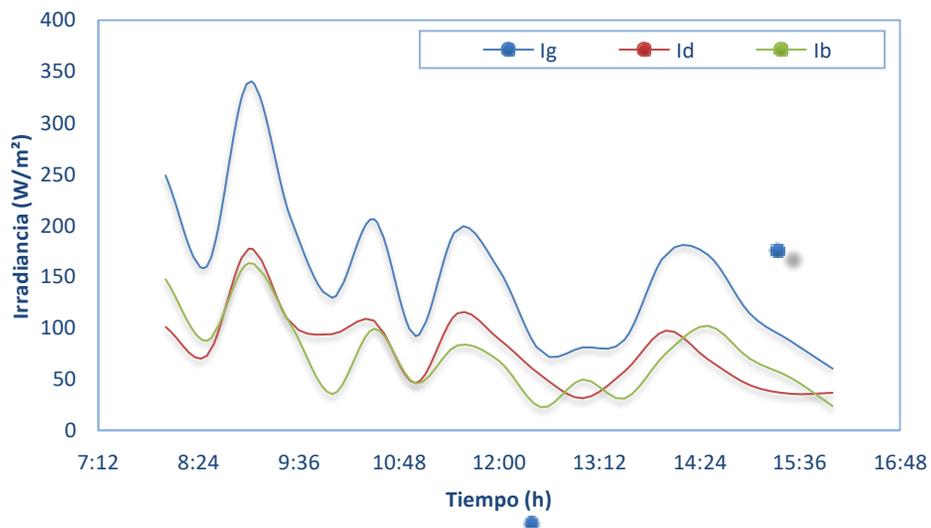


Fig. 2. Irradiancias: global (Ig), directa (Id) y difusa (Ib); Ensayo 01.

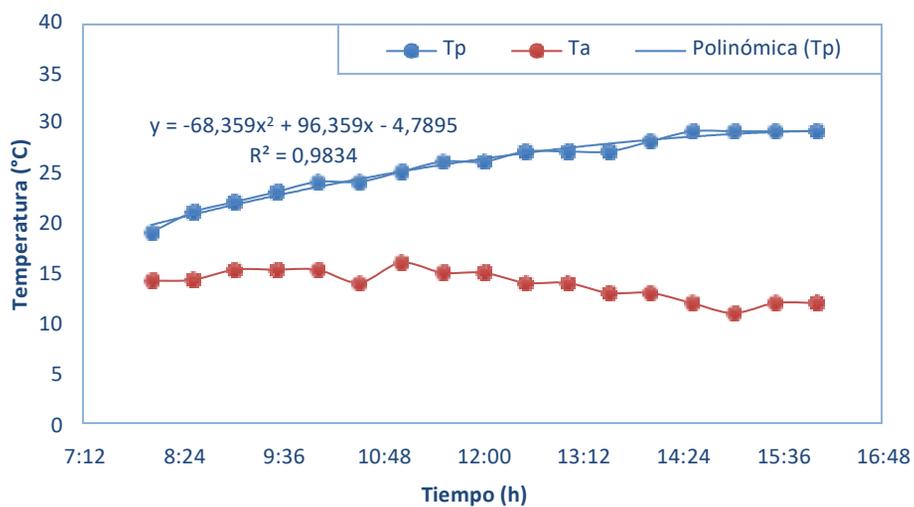


Fig. 3. Temperatura del ACS, Ensayo 01.

Tabla 2.

Cálculo de la eficiencia térmica, Ensayo 01

Tiempo (hr)	Irradiancia directa Ib (W/m ²)	IT (W/m ²)	ΔT	$(\Delta T)^2$	no	n	$(T_p - T_a)/IT$
08:00	147.8	240.45	4.80	23.04	0.79	0.76	0.0200
08:30	87.1	152.93	6.70	44.89	0.79	0.73	0.0438
09:00	163	323.73	6.70	44.89	0.79	0.76	0.0207
09:30	103.3	196.63	7.70	59.29	0.79	0.73	0.0392
10:00	35.2	122.91	8.70	75.69	0.79	0.69	0.0708
10:30	98.8	194.4	10.00	100.00	0.79	0.72	0.0514
11:00	45.5	86.38	9.00	81.00	0.79	0.65	0.1042
11:30	82.7	186	11.00	121.00	0.79	0.71	0.0591
12:00	67.4	147.44	11.00	121.00	0.79	0.68	0.0746
12:30	22.3	72.07	13.00	169.00	0.79	0.53	0.1804
13:00	49.4	75.79	13.00	169.00	0.79	0.55	0.1715
13:30	30.8	83.58	14.00	196.00	0.79	0.55	0.1675
14:00	75.1	163.24	15.00	225.00	0.79	0.66	0.0919
14:30	101.9	161.82	17.00	289.00	0.79	0.63	0.1051
15:00	69.7	108.07	18.00	324.00	0.79	0.54	0.1666
15:30	50.8	82.61	17.00	289.00	0.79	0.49	0.2058
16:00	23	57.06	17.00	289.00	0.79	0.35	0.2979
Promedio	73.75	144.42	11.74	154.16	0.79	0.63	0.11

no=eficiencia óptica; n=eficiencia instantánea.

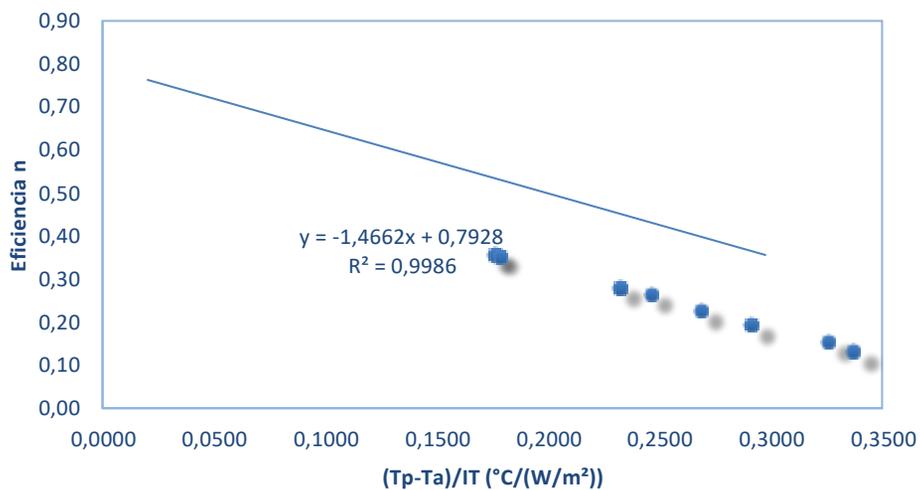


Fig. 4. Eficiencia térmica, Ensayo 01.



Fig. 5. Irradiancias global (Ig) y corregida (IT), Ensayo 01.

Tabla 3.

Datos del colector solar de tubos al vacío, Ensayo 02

Tiempo (h)	Agua caliente sanitaria(ACS)		Tambiente Ta (°C)	Irradiancia global Ig (W/m ²)	Irradiancia difusa Id (W/m ²)	Velocidad viento (m/s)
	Tentrada Te (°C)	Ttanque Tp (°C)				
08:00	14	18	15	308.1	204.7	0.1
08:30	14	20	15	306.7	151.9	0.1
09:00	14.8	21	15.3	280.4	139.3	0.1
09:30	14.3	22	15.3	416.1	351.1	0.5
10:00	15.2	26	15.3	537.5	466.7	0.1
10:30	13.8	28	16	471.4	339.3	0.1
11:00	14.1	29	16	707.3	505.1	0.8
11:30	13.6	32	17	580.9	373	0.1
12:00	14.2	33	17	682.2	337.1	0.1
12:30	14.3	34	16	328.2	242.1	0.8
13:00	14.4	36	16	462.1	267.1	1
13:30	14.3	37	17	556.8	227.2	1.2
14:00	13.4	38	15	243.3	115.6	2
14:30	13.7	38	14	160.7	90.8	0.1
15:00	13.7	39	14	41.3	23.7	0.1
15:30	13.7	40	14	52.1	27.9	0.1
16:00	13.5	40	14	44.3	22.7	0.1
Promedio	14.06	31.24	15.41	363.49	228.55	0.51

Datos recolectados en la ciudad de Guaranda, Bolívar; n=69.

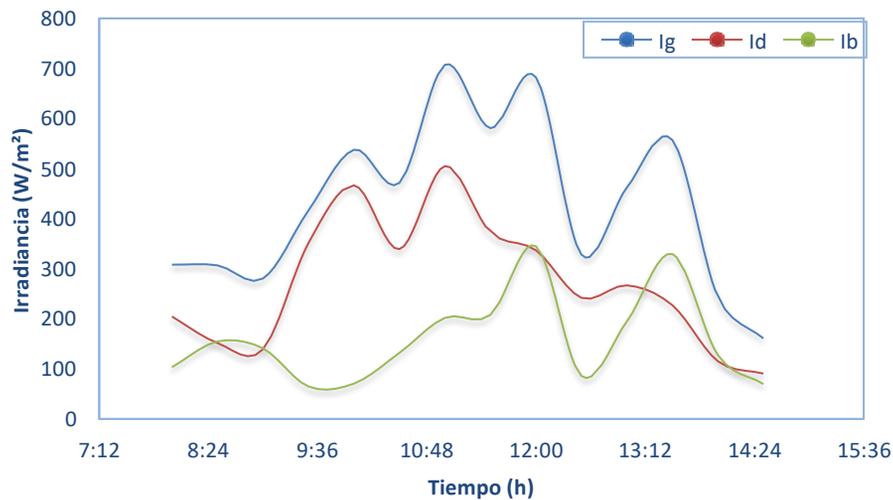


Fig. 6. Irradiancias: global (I_g), directa (I_d) y difusa (I_b); Ensayo 02

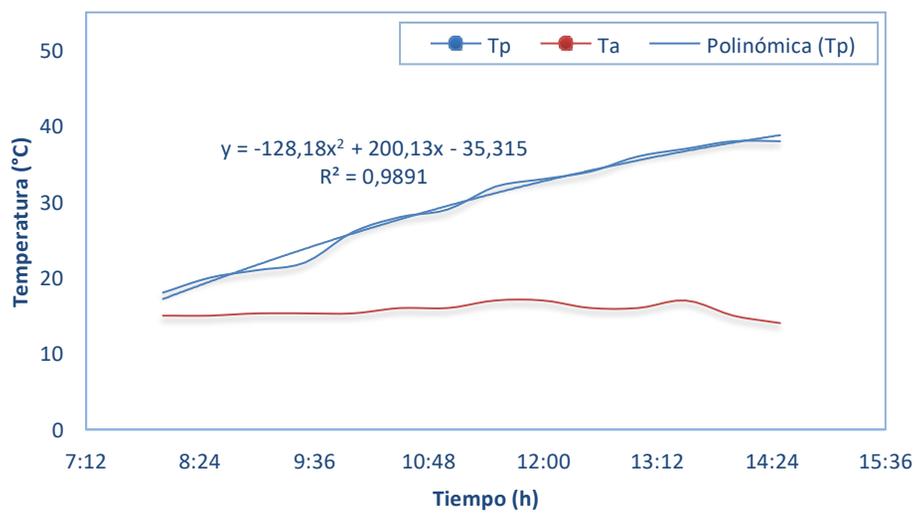


Fig. 7. Temperatura del ACS, Ensayo 02.

Tabla 4.

Cálculo de la eficiencia térmica, Ensayo 02

Tiempo (h)	Irradiancia directa Ib (W/m ²)	IT (W/m ²)	ΔT (°C)	$(\Delta T)^2$	no	n	$(T_p - T_a)/IT$ (°C/(W/m ²))
08:00	103.4	296.03	3	9	0.7865	0.77	0.0101
08:30	154.8	292.53	5	25	0.7865	0.76	0.0171
09:00	141.1	266.1	5.7	32.49	0.7865	0.76	0.0214
09:30	65	397.56	6.7	44.89	0.7865	0.76	0.0169
10:00	70.8	513.61	10.7	114.49	0.7865	0.76	0.0208
10:30	132.1	447.78	12	144	0.7865	0.75	0.0268
11:00	202.2	671.33	13	169	0.7865	0.76	0.0194
11:30	207.9	549.56	15	225	0.7865	0.75	0.0273
12:00	345.1	641.4	16	256	0.7865	0.75	0.0249
12:30	86.1	311.7	18	324	0.7865	0.70	0.0577
13:00	195	436.25	20	400	0.7865	0.72	0.0458
13:30	329.6	522.77	20	400	0.7865	0.73	0.0383
14:00	127.7	229.39	23	529	0.7865	0.63	0.1003
14:30	69.9	152.29	24	576	0.7865	0.54	0.1576
15:00	17.6	39.26	25	625	0.7865	-0.22	0.6368
15:30	24.2	49.71	26	676	0.7865	-0.05	0.5230
16:00	21.6	42.58	26	676	0.7865	-0.18	0.6106
Promedio	159.34	409.16	13.72	232.06	0.79	0.72	0.04

no=eficiencia óptica; n=eficiencia instantánea.

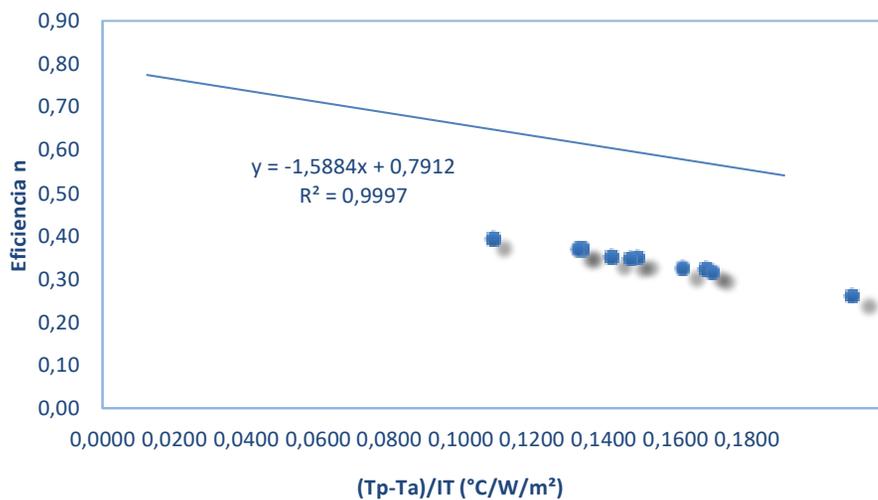


Fig. 8. Eficiencia térmica, Ensayo 02.

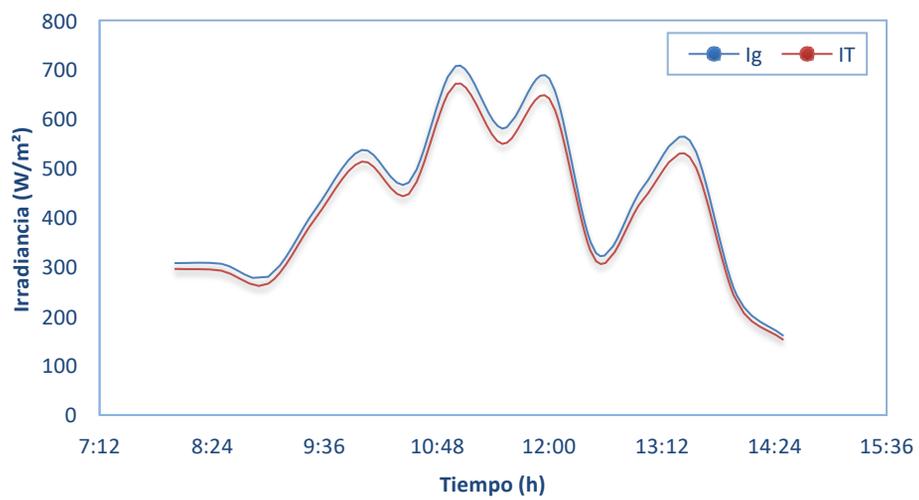


Fig. 9. Irradiancias global (Ig) y corregida (IT), Ensayo 02.

Tabla 5.

Datos del colector solar de tubos al vacío, Ensayo 03

Tiempo (h)	Agua caliente sanitaria (ACS)		Tambiente Ta (°C)	Irradiancia global Ig (W/m ²)	Irradiancia difusa Id (W/m ²)	Velocidad viento (m/s)
	Tentrada Te (°C)	Ttanque Tp (°C)				
08:00	13.3	19	12	78.2	46.6	0.8
08:30	13.2	20	12.5	116.3	94.2	0.8
09:00	13.3	20	13	129.2	90.3	0.1
09:30	13.5	21	12	136.7	93.8	0.9
10:00	14	21	12	155.8	111.3	0.9
10:30	13.6	22	12	163.7	106.2	0.1
11:00	13.9	23	14	201	113.5	0.8
11:30	13.2	23	12	210.7	90.6	0.5
12:00	13.8	24	12	260.7	111.9	0.9
12:30	13.4	26	12	229.6	75	0.9
13:00	13.2	28	12	345	151.2	1.9
13:30	13.4	28	13.5	201.8	125.1	2
14:00	13.5	29	13.4	221.2	113.2	1.6
14:30	13.5	31	13	227.1	101.6	0.6
15:00	13.3	31	13	152.6	76.3	1.2
15:30	13.7	31	12	114.7	46.7	1.2
16:00	13.1	31	12	170.6	47.1	0.9
Promedio	13.46	25.18	12.49	183.23	93.80	0.95

Datos recolectados en la ciudad de Guaranda, Bolívar. Condición climática= nuboso, n=70.

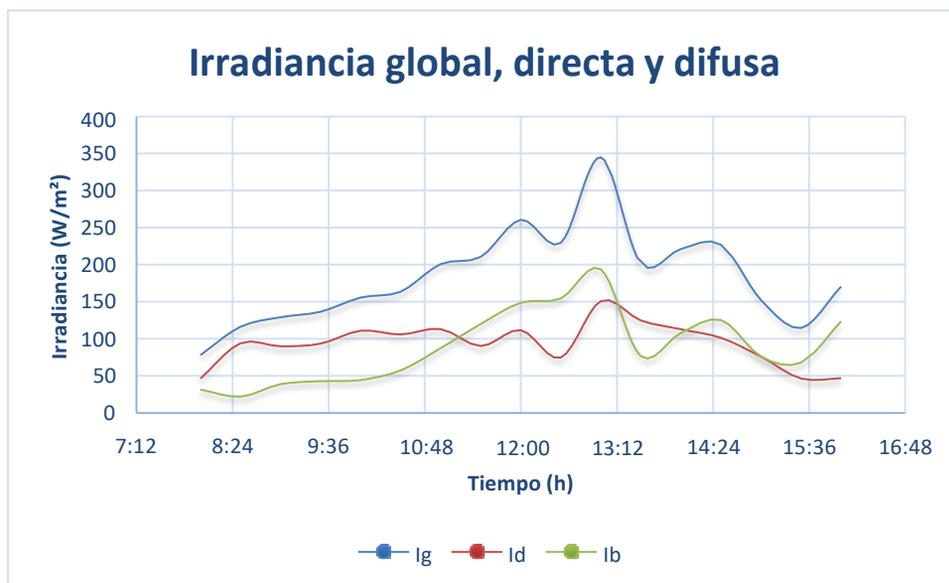


Fig. 10. Irradiancias: global (Ig), directa (Id) y difusa (Ib); Ensayo 03

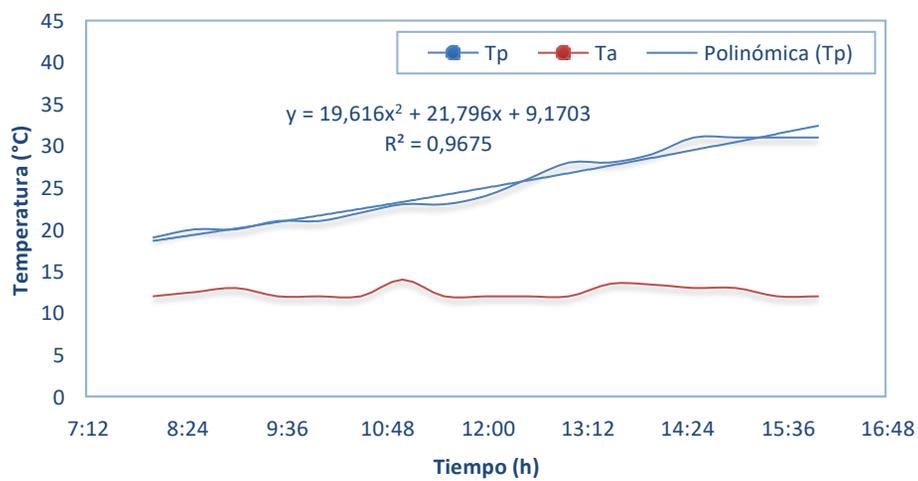


Fig. 11. Temperatura del ACS, Ensayo 03.

Tabla 6.

Cálculo de la eficiencia térmica, Ensayo 03

Tiempo (h)	Irradiancia directa Ib (W/m ²)	IT (W/m ²)	ΔT (°C)	$(\Delta T)^2$	no	n	$(T_p - T_a) / IT$ (°C/(W/m ²))
08:00	31.6	74.93	7	49	0.7865	0.66	0.0934
08:30	22.1	111.23	7.5	56.25	0.7865	0.70	0.0674
09:00	38.9	122.98	7	49	0.7865	0.71	0.0569
09:30	42.9	129.82	9	81	0.7865	0.69	0.0693
10:00	44.5	147.99	9	81	0.7865	0.71	0.0608
10:30	57.5	154.87	10	100	0.7865	0.70	0.0646
11:00	87.5	189.34	9	81	0.7865	0.72	0.0475
11:30	120.1	197.19	11	121	0.7865	0.71	0.0558
12:00	148.8	243.93	12	144	0.7865	0.72	0.0492
12:30	154.6	213.89	14	196	0.7865	0.69	0.0655
13:00	193.8	323.21	16	256	0.7865	0.72	0.0495
13:30	76.7	190.69	14.5	210.25	0.7865	0.68	0.0760
14:00	108	208.39	15.6	243.36	0.7865	0.68	0.0749
14:30	125.5	213.92	18	324	0.7865	0.66	0.0841
15:00	76.3	144.45	18	324	0.7865	0.60	0.1246
15:30	68	108.89	19	361	0.7865	0.53	0.1745
16:00	123.5	163.26	19	361	0.7865	0.61	0.1164
Promedio	89.43	172.88	12.68	178.70	0.79	0.68	0.08

no=eficiencia óptica; n=eficiencia instantánea.

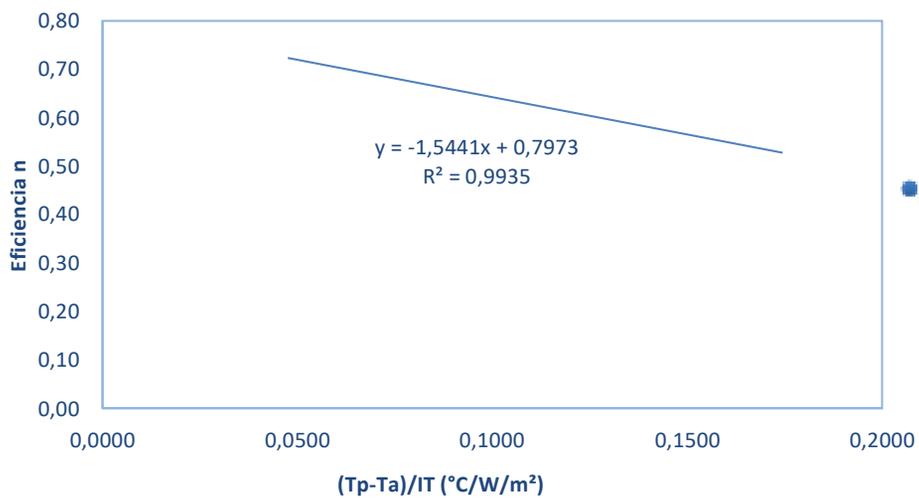


Fig. 12. Eficiencia térmica, Ensayo 03.

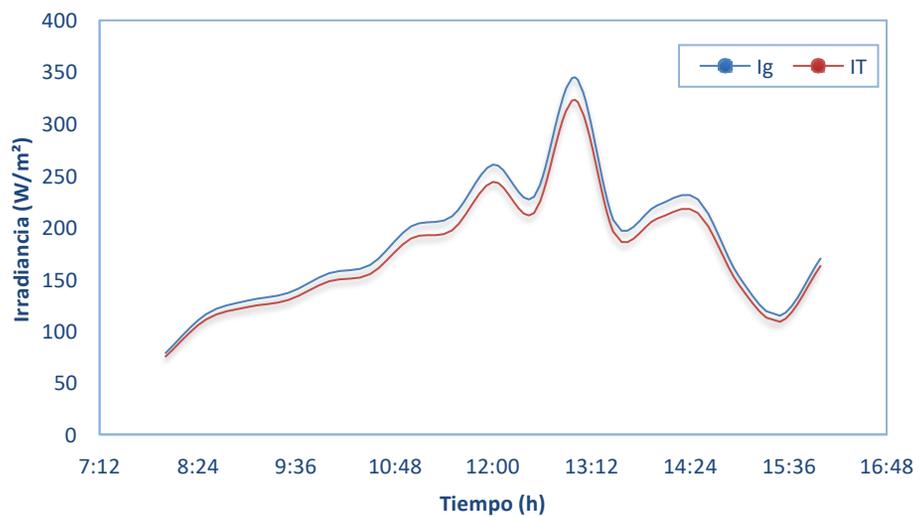


Fig. 13. Irradiancias global (I_g) y corregida (I_T), Ensayo 03.

Tabla 7.

Datos del colector solar de tubos al vacío, Ensayo 04

<u>Agua caliente sanitaria (ACS)</u>						
Tiempo (h)	Tentrada Te (°C)	Ttanque Tp (°C)	Tambiente Ta (°C)	Irradiancia global Ig (W/m ²)	Irradiancia difusa Id (W/m ²)	Velocidad viento (m/s)
08:00	14	19	12	85	42.5	0.8
08:30	14.6	21	12	195	59.6	0.8
09:00	14	22	12.6	383.5	150.6	0.1
09:30	13.1	25	12.2	619.3	169.8	0.9
10:00	13.5	26	13	316.3	140.8	0.9
10:30	13.4	27	15	578.4	155.1	0.1
11:00	13.1	31	15	672.6	197.2	0.8
11:30	14.1	32	15.2	376	141.3	0.5
12:00	13.9	34	15.6	826	146.4	0.9
12:30	14.1	36	15.5	684.1	82.7	0.9
13:00	14.9	37	15.6	1241	250.6	1.9
13:30	14	38	15.5	160.2	107.5	2
14:00	13	39	15.5	336.1	182.6	1.6
14:30	13.9	40	14.6	293.1	146.6	0.6
15:00	14.1	42	14.1	960.8	191.1	1.2
15:30	14.5	43	14.2	177.3	70.7	1.2
16:00	14.5	45	14	527.1	107.3	0.9
Promedio	13.92	32.76	14.21	495.99	137.79	0.95

Datos recolectados en la ciudad de Guaranda, Bolívar; n=71.

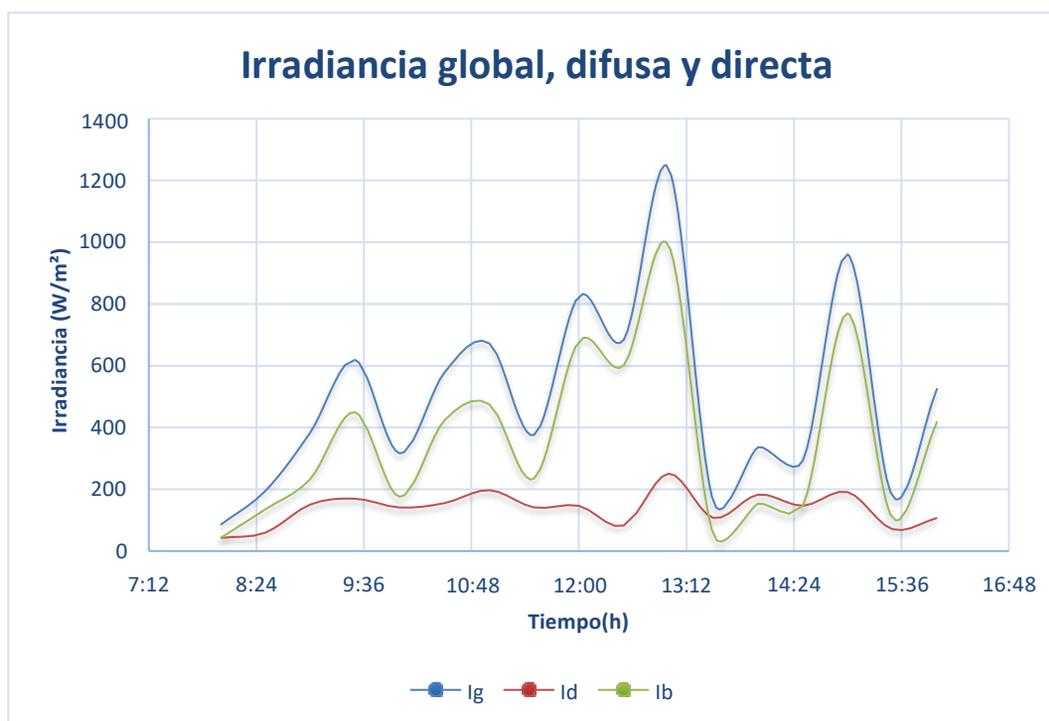


Fig. 14. Irradiancias: global (I_g), directa (I_d) y difusa (I_b); Ensayo 04

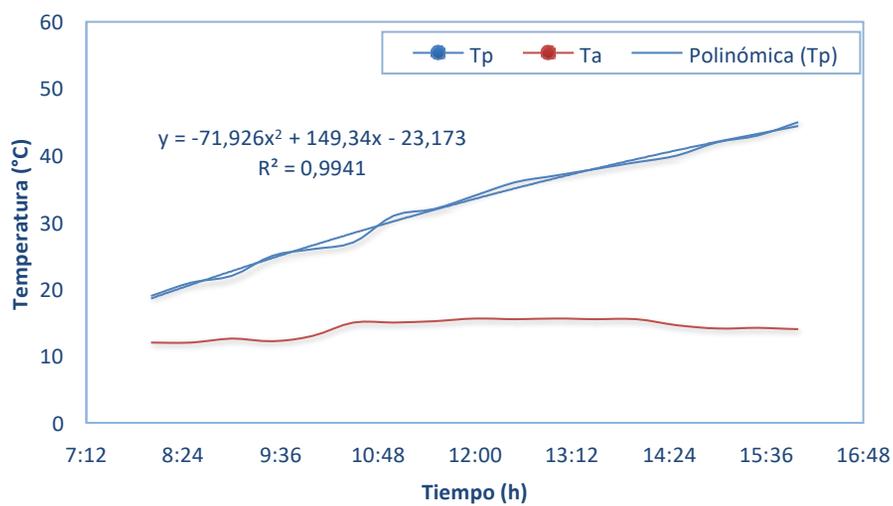


Fig. 15. Temperatura del ACS, Ensayo 04.

Tabla 8.

Cálculo de la eficiencia térmica, Ensayo 04

Tiempo (h)	Irradiancia directa Ib (W/m ²)	IT (W/m ²)	ΔT (°C)	$(\Delta T)^2$	no	n	$(T_p - T_a) / IT$ (°C/(W/m ²))
08:00	42.5	81.12	7	49	0.7865	0.67	0.0863
08:30	135.4	184.01	9	81	0.7865	0.72	0.0489
09:00	232.9	360.81	9.4	88.36	0.7865	0.75	0.0261
09:30	449.5	577.95	12.8	163.84	0.7865	0.76	0.0221
10:00	175.5	296.51	13	169	0.7865	0.73	0.0438
10:30	423.3	537.02	12	144	0.7865	0.76	0.0223
11:00	475.4	624.42	16	256	0.7865	0.75	0.0256
11:30	234.7	350.23	16.8	282.24	0.7865	0.72	0.0480
12:00	679.6	761.73	18.4	338.56	0.7865	0.75	0.0242
12:30	601.4	629.29	20.5	420.25	0.7865	0.74	0.0326
13:00	990.4	1147	21.4	457.96	0.7865	0.76	0.0187
13:30	52.7	151.5	22.5	506.25	0.7865	0.56	0.1485
14:00	153.5	316.4	23.5	552.25	0.7865	0.67	0.0743
14:30	146.5	275.95	25.4	645.16	0.7865	0.64	0.0920
15:00	769.7	898.15	27.9	778.41	0.7865	0.74	0.0311
15:30	106.6	167.69	28.8	829.44	0.7865	0.51	0.1717
16:00	419.8	501.39	31	961	0.7865	0.68	0.0618
Promedio	358.20	462.42	18.55	395.45	0.79	0.70	0.06

no=eficiencia óptica; n=eficiencia instantánea.

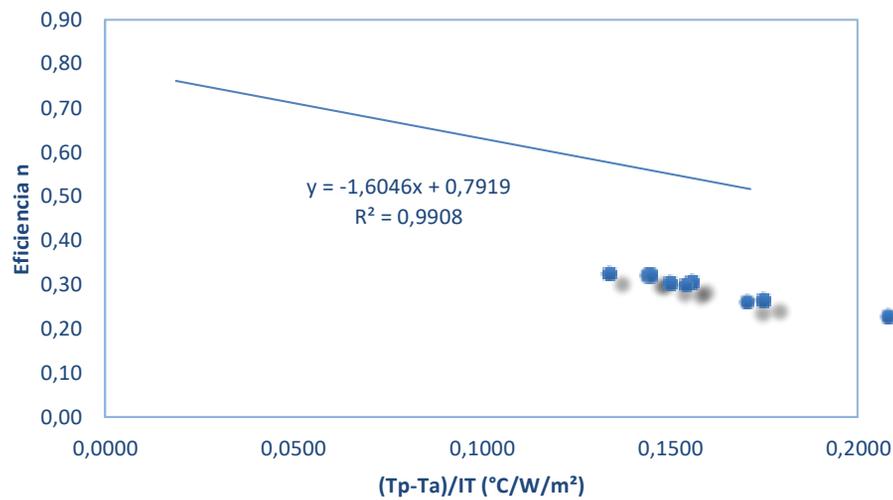


Fig. 16. Eficiencia térmica, Ensayo 04.

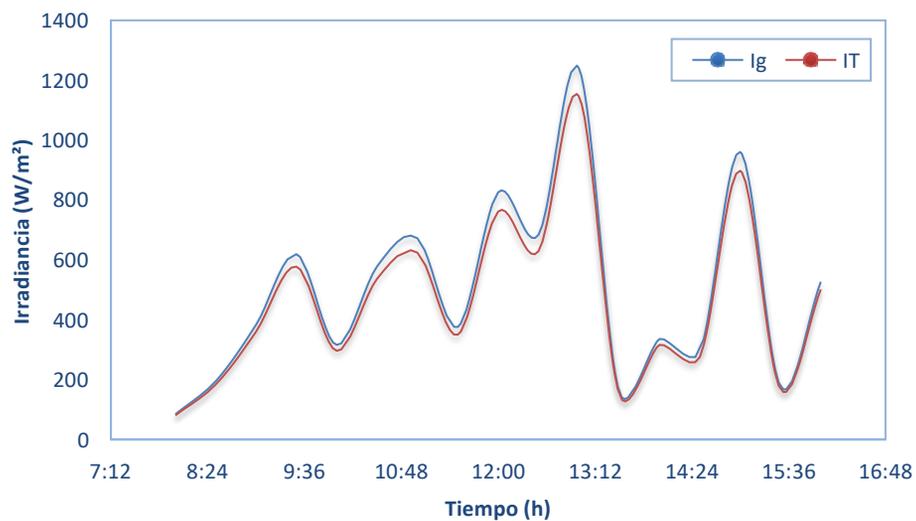


Fig. 17. Irradiancias global (Ig) y corregida (IT), Ensayo 04.

Tabla 9.

Datos del colector solar de tubos al vacío, Ensayo 05

Tiempo	Agua caliente sanitaria (ACS)		Tambiente	Irradiancia global	Irradiancia difusa	Velocidad viento
	Tentrada	Ttanque				
	Te (°C)	Tp (°C)				
(h)	Te (°C)	Tp (°C)	Ta (°C)	Ig (W/m ²)	Id (W/m ²)	(m/s)
08:00	13	19	13	146	75	1.5
08:30	13.6	21	13	166	86	1.9
09:00	13.8	25	12.6	573.1	93.2	2
09:30	14.6	30	13.5	843	88.6	1.2
10:00	14.3	34	14	924.8	127	8
10:30	14.3	36	14	942	134.3	1.6
11:00	14.3	38	13.9	722.7	128.2	1
11:30	14.5	40	14	503.1	123.6	0.9
12:00	15	43	15	343.1	133.5	0.1
12:30	15	46	15.5	344	161.1	1
13:00	14.9	47	15.6	397.6	117	1.8
13:30	14.9	48	16	280.1	120.5	1.2
14:00	15.2	49	16	216.9	118.7	1.6
14:30	15.3	52	15.5	384	118.9	0.7
15:00	15.2	54	15.3	1058.8	236.9	1.2
15:30	15.9	55	14	265.4	188.8	0.9
16:00	15	56	13.1	191.8	64	0.9
Promedio:	14.64	40.76	14.35	488.38	124.43	1.62

Datos recolectados en la ciudad de Guaranda, Bolívar. Condición climática= soleado, n=72.

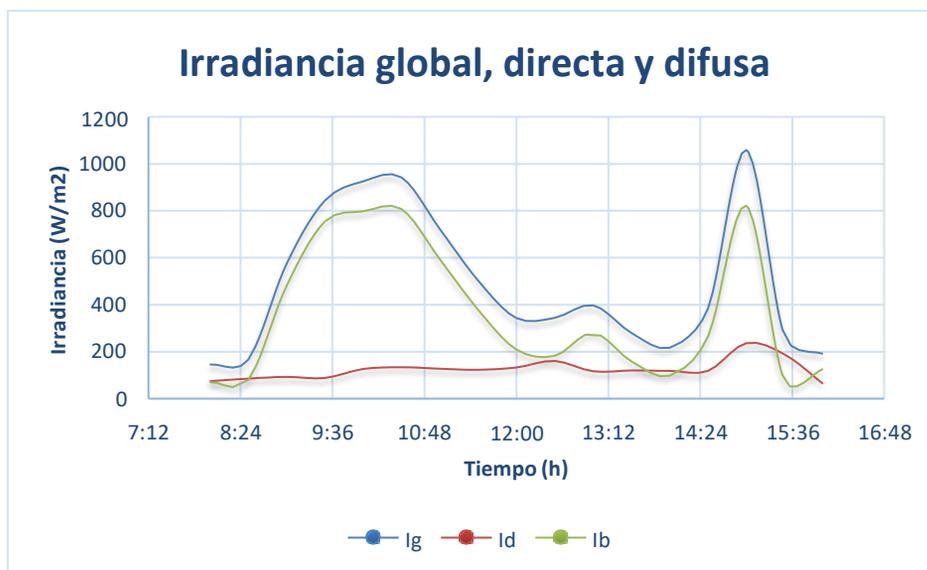


Fig. 18. Irradiancias: global (Ig), directa (Id) y difusa (Ib); Ensayo 05.

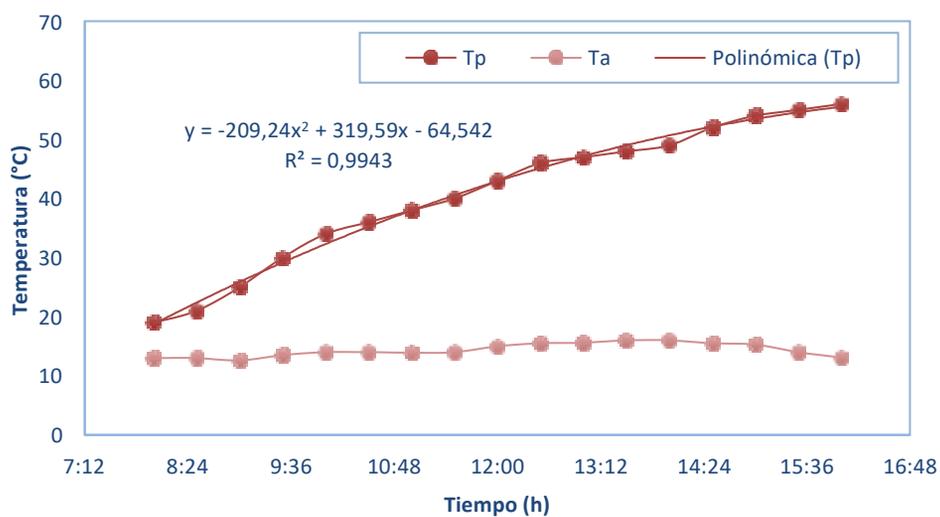


Fig. 19. Temperatura del ACS, Ensayo 05.

Tabla 10.

Cálculo de la eficiencia térmica, Ensayo 05

Tiempo (h)	Irradiancia directa Ib (W/m ²)	IT (W/m ²)	ΔT (°C)	$(\Delta T)^2$	no	n	$(T_p - T_a) / IT$ (°C/(W/m ²))
08:00	71	138.87	6	36	0.7865	0.7308	0.0432
08:30	80	157.01	8	64	0.7865	0.7192	0.0510
09:00	479.9	532.72	12.4	153.76	0.7865	0.7542	0.0233
09:30	754.4	778.2	16.5	272.25	0.7865	0.7558	0.0212
10:00	797.8	852.27	20	400	0.7865	0.7513	0.0235
10:30	807.7	866.5	22	484	0.7865	0.7477	0.0254
11:00	594.5	665.07	24.1	580.81	0.7865	0.7299	0.0362
11:30	379.5	464.31	26	676	0.7865	0.6975	0.0560
12:00	209.6	319	28	784	0.7865	0.6443	0.0878
12:30	182.9	321.22	30.5	930.25	0.7865	0.6291	0.0950
13:00	280.6	368.12	31.4	985.96	0.7865	0.6440	0.0853
13:30	159.6	261.4	32	1024	0.7865	0.5808	0.1224
14:00	98.2	203.81	33	1089	0.7865	0.5121	0.1619
14:30	265.1	357.7	36.5	1332.25	0.7865	0.6082	0.1020
15:00	821.9	986.54	38.7	1497.69	0.7865	0.7167	0.0392
15:30	76.6	244.13	41	1681	0.7865	0.4817	0.1679
16:00	127.8	181.82	42.9	1840.41	0.7865	0.3515	0.2359
Promedio	363.95	452.86	26.41	813.61	0.79	0.65	0.08

no=eficiencia óptica; n=eficiencia instantánea.

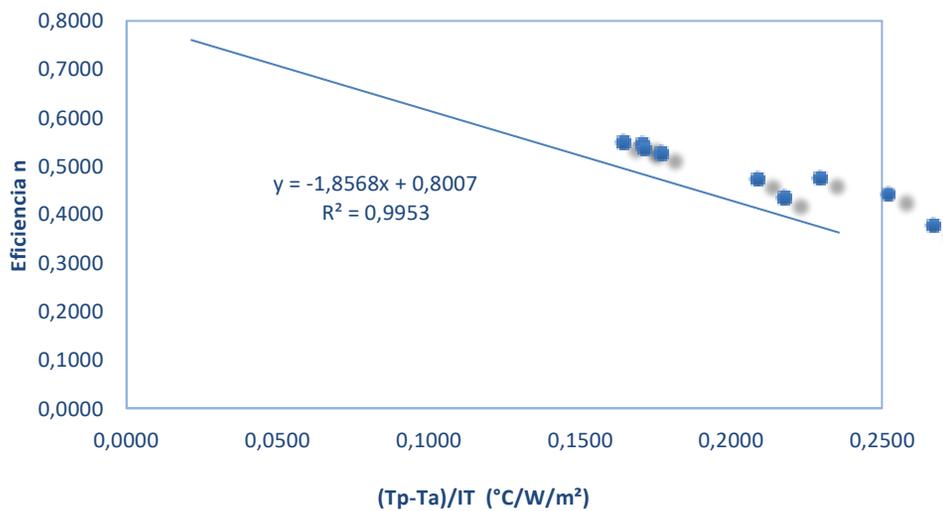


Fig. 20. Eficiencia térmica, Ensayo 05.

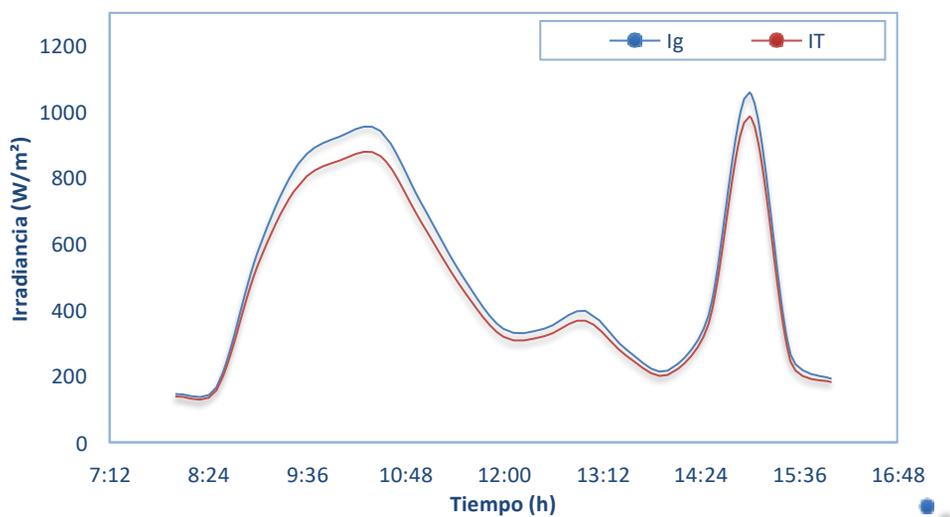


Fig. 21. Irradiancias global (Ig) y corregida (IT), Ensayo 05.

Tabla 11.

Datos del colector solar de tubos al vacío, Ensayo 06

<u>Agua caliente sanitaria(ACS)</u>						
Tiempo (h)	Tentrada Te (°C)	Ttanque Tp (°C)	Tambiente Ta (°C)	Irradiancia global Ig (W/m ²)	Irradiancia difusa Id (W/m ²)	Velocidad viento (m/s)
08:00	14	21	13	836	268	2.1
08:30	14.5	23	13	478.4	110.2	1.8
09:00	14.4	28	14.1	807.5	156.7	1.1
09:30	14.4	32	13.5	911.1	145.2	3.9
10:00	15	34	15	1027.2	230.6	0.1
10:30	15.1	36	16	1192.5	260.4	1.3
11:00	15.5	39	16	606.2	114.4	0.5
11:30	15.4	42	16.1	1185.5	253.4	1.8
12:00	15	45	16	447.3	178.8	0.1
12:30	15	48	15.5	398.3	168	1.3
13:00	14.9	49	15	1267.8	373.2	0.5
13:30	14.1	50	16	591.8	174.6	1.7
14:00	13.9	52	14.9	586.8	248.7	1.9
14:30	13.9	53	14.5	643	229.1	4
15:00	13.8	55	13	70.6	17.8	1.2
15:30	13	55	13	59.2	14.5	1.1
16:00	12	55	12	49.6	32.6	0.9
Promedio	14.65	39.43	14.90	784.24	207.95	1.58

Datos recolectados en la ciudad de Guaranda, Bolívar; n=73.

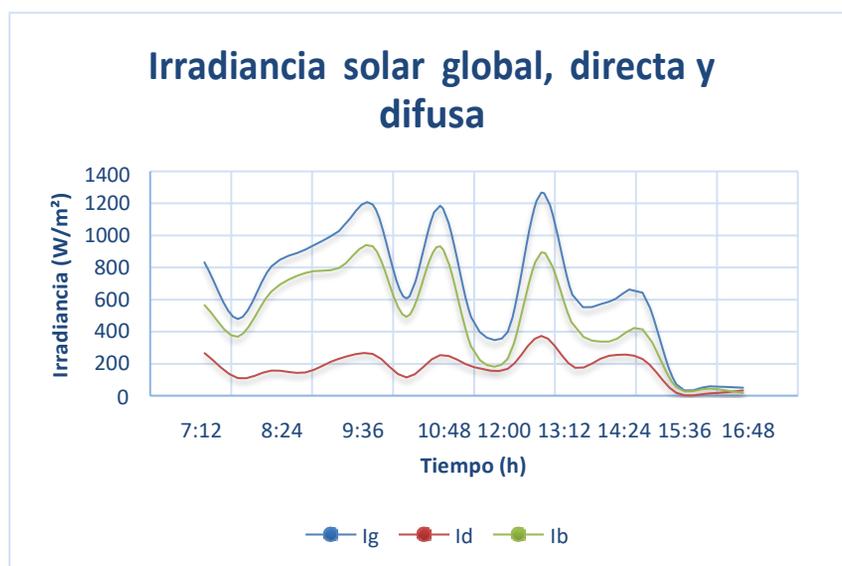


Fig. 22. Irradiancias: global (I_g), directa (I_d) y difusa (I_b); Ensayo 06

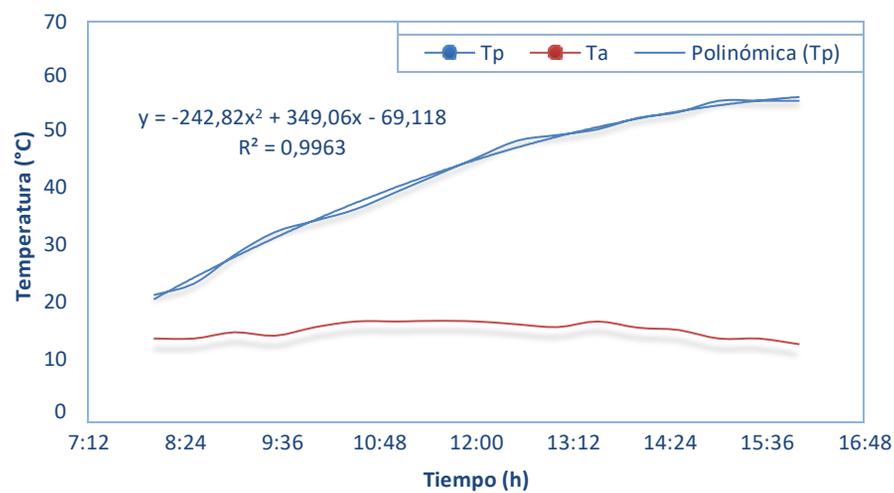


Fig. 23. Temperatura del ACS, Ensayo 06.

Tabla 12.

Cálculo de la eficiencia térmica, Ensayo 06

Tiempo (h)	Irradiancia directa Ib (W/m ²)	IT (W/m ²)	ΔT (°C)	$(\Delta T)^2$	no	n	$(T_p - T_a) / IT$ (°C/(W/m ²))
08:00	568	788.38	8	64	0.7865	0.77311	0.0101
08:30	368.2	446.4	10	100	0.7865	0.75626	0.0224
09:00	650.8	748.32	13.9	193.21	0.7865	0.76034	0.0186
09:30	765.9	839.72	18.5	342.25	0.7865	0.75395	0.0220
10:00	796.6	947.4	19	361	0.7865	0.75672	0.0201
10:30	932.1	1098	20	400	0.7865	0.75918	0.0182
11:00	491.8	552.76	23	529	0.7865	0.72221	0.0416
11:30	932.1	1089	25.9	670.81	0.7865	0.74872	0.0238
12:00	268.5	415.17	29	841	0.7865	0.67229	0.0699
12:30	230.3	370.21	32.5	1056.25	0.7865	0.63836	0.0878
13:00	894.6	1171	34	1156	0.7865	0.73685	0.0290
13:30	417.2	547	34	1156	0.7865	0.68021	0.0622
14:00	338.1	546.87	37.1	1376.41	0.7865	0.66734	0.0678
14:30	413.9	598.37	38.5	1482.25	0.7865	0.67213	0.0643
15:00	52.8	65.59	42	1764	0.7865	-0.38532	0.6403
15:30	44.7	52.27	42	1764	0.7865	-0.68394	0.8035
16:00	17	47.18	43	1849	0.7865	-0.89504	0.9114
Promedio	576.29	725.61	24.53	694.87	0.79	0.72	0.04

no=eficiencia óptica; n=eficiencia instantánea.

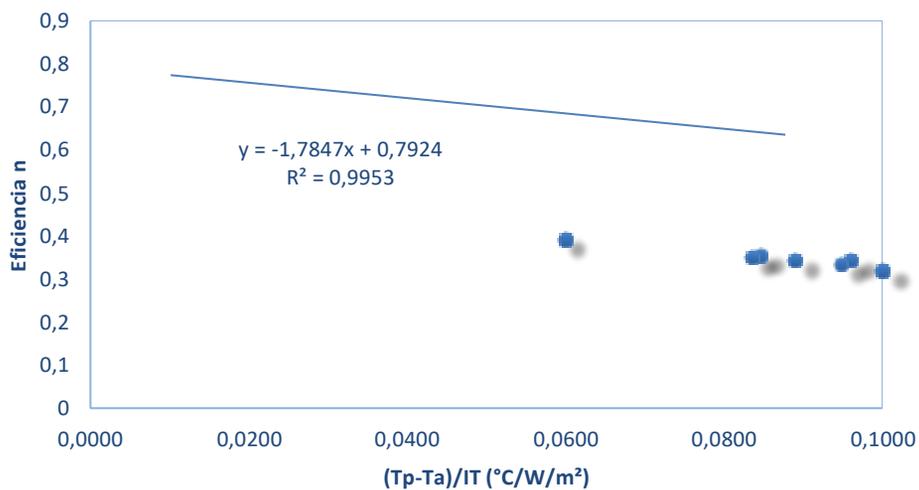


Fig. 24. Eficiencia térmica, Ensayo 06.

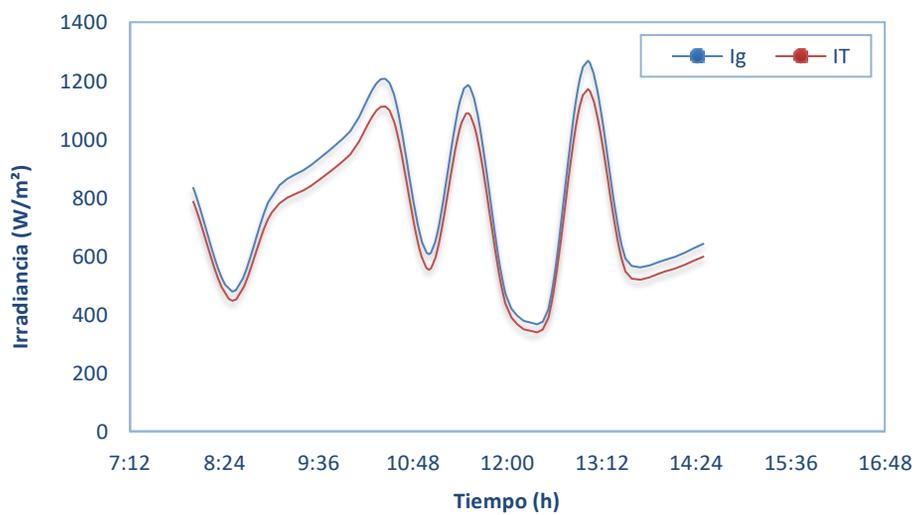


Fig. 25. Irradiancias global (Ig) y corregida (IT), Ensayo 06.

Tabla 13.

Datos del colector solar de tubos al vacío, Ensayo 07

<u>Agua caliente sanitaria(ACS)</u>						
Tiempo (h)	Tentrada Te (°C)	Ttanque Tp (°C)	Tambiente Ta (°C)	Irradiancia global Ig (W/m ²)	Irradiancia difusa Id (W/m ²)	Velocidad viento (m/s)
08:00	13.2	20	12.2	503	175	1.2
08:30	13.5	21	12.2	673.2	170.2	1.2
09:00	14.2	25	12.6	322.1	107.9	0.1
09:30	14.1	26	12.7	355	130.2	1
10:00	13.5	27	13	459.1	175.3	1
10:30	13.6	28	13.1	445.3	169.6	0.8
11:00	13.6	30	13.5	622.3	181.3	0.8
11:30	14.5	32	14	699.6	184.5	1.2
12:00	15	35	14	365.9	230.9	1.2
12:30	15	36	13	455.4	119	0.9
13:00	15	37	14.2	340.2	181.1	1.1
13:30	14	37	15.1	314.1	100.4	2.2
14:00	14	38	15.5	230.1	115.3	1.5
14:30	14.1	38	15.2	348	155.9	1.1
15:00	14	39	15	291.8	77.2	1.1
15:30	14.5	40	15	503.6	113.2	1.1
16:00	13	41	15	220	86.8	0.1
Promedio	14.05	32.35	13.84	420.51	145.52	1.04

Datos recolectados en la ciudad de Guaranda, Bolívar; n=74.

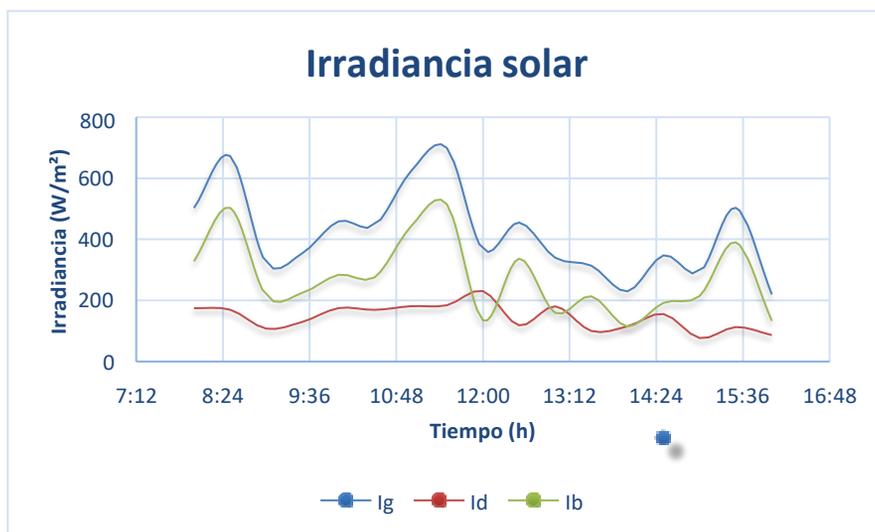


Fig. 26. Irradiancias: global (Ig), directa (Id) y difusa (Ib); Ensayo 07.

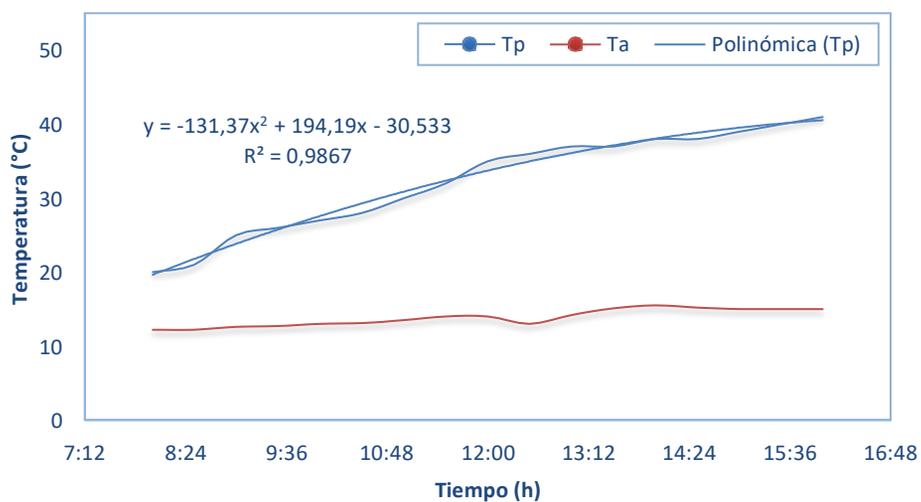


Fig. 27. Temperatura del ACS, Ensayo 07.

Tabla 14.
Cálculo de la eficiencia térmica, Ensayo 07

Tiempo (h)	Irradiancia directa Ib (W/m ²)	IT (W/m ²)	ΔT (°C)	$(\Delta T)^2$	no	n	$(T_p - T_a) / IT$ (°C/(W/m ²))
08:00	328	472.4	7.8	60.84	0.7865	0.7648	0.0165
08:30	503	625.82	8.8	77.44	0.7865	0.7678	0.0141
09:00	214.2	299.3	12.4	153.76	0.7865	0.7291	0.0414
09:30	224.8	329.54	13.3	176.89	0.7865	0.7300	0.0404
10:00	283.8	425.78	14	196	0.7865	0.7401	0.0329
10:30	275.7	412.47	14.9	222.01	0.7865	0.7351	0.0361
11:00	441	572.89	16.5	272.25	0.7865	0.7448	0.0288
11:30	515.1	642.65	18	324	0.7865	0.7453	0.0280
12:00	135	343.61	21	441	0.7865	0.6939	0.0611
12:30	336.4	418.27	23	529	0.7865	0.7015	0.0550
13:00	159.1	317.72	22.8	519.84	0.7865	0.6758	0.0718
13:30	213.7	289.9	21.9	479.61	0.7865	0.6710	0.0755
14:00	114.8	214.83	22.5	506.25	0.7865	0.6255	0.1047
14:30	192.1	324.45	22.8	519.84	0.7865	0.6781	0.0703
15:00	214.6	270.2	24	576	0.7865	0.6479	0.0888
15:30	390.4	467.58	25	625	0.7865	0.7023	0.0535
16:00	133.2	206.94	26	676	0.7865	0.5867	0.1256
Promedio	274.99	390.26	18.51	373.87	0.79	0.70	0.06

no=eficiencia óptica; n=eficiencia instantánea.

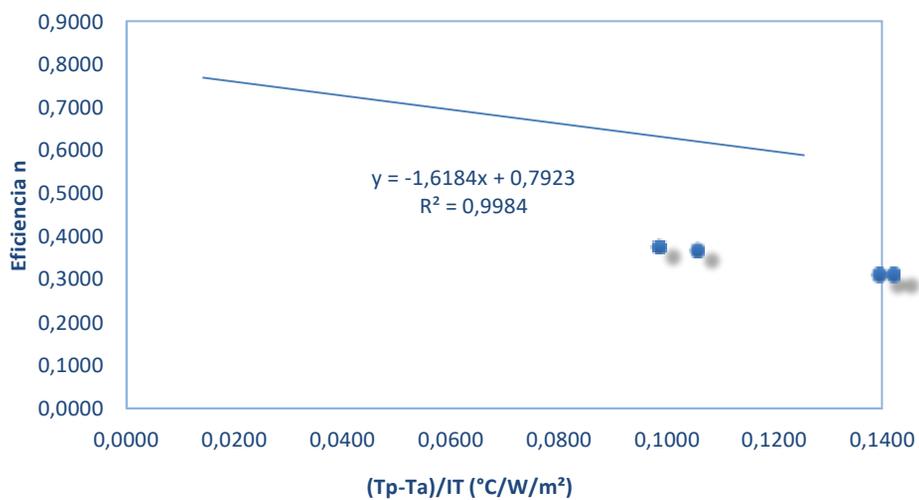


Fig. 28. Eficiencia térmica, Ensayo 07.

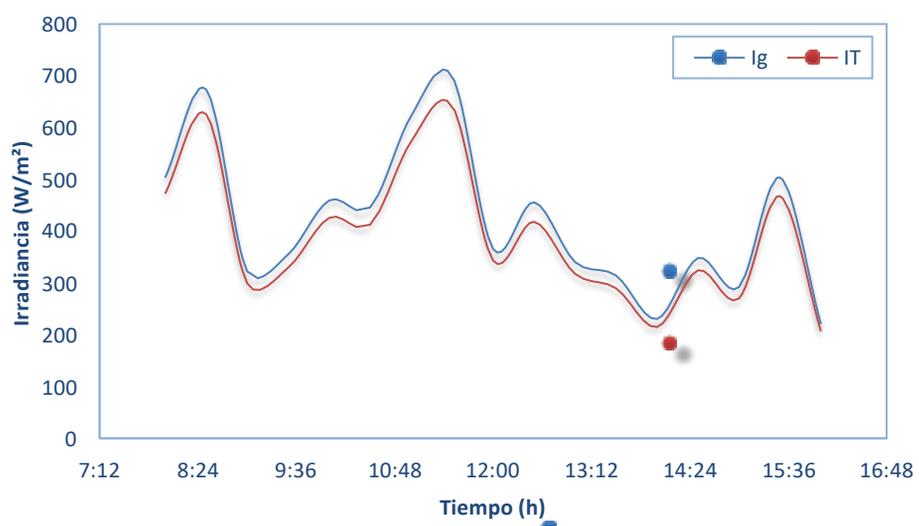


Fig. 29. Irradiancias global (I_g) y corregida (I_T), Ensayo 07.

Tabla 15.

Datos del colector solar de tubos al vacío, Ensayo 08

Tiempo (h)	Agua caliente sanitaria (ACS)		Tambiente Ta (°C)	Irradiancia global Ig (W/m ²)	Irradiancia difusa Id (W/m ²)	Velocidad viento (m/s)
	Tentrada Te (°C)	Ttanque Tp (°C)				
08:00	13.2	20	11.2	75.8	35.5	0.1
08:30	13.2	22	11.3	130.1	64.3	1.1
09:00	14.8	24	11.2	206.9	68	1.2
09:30	14.7	26	12.7	196.8	85.2	1.4
10:00	13.7	26	12.9	244.5	78.7	1.1
10:30	13.8	28	13.2	443.3	108.1	1.5
11:00	13.3	31	13.5	370.5	86.6	1.1
11:30	13.5	31	13.5	281.1	94	1.1
12:00	13.5	32	14.2	341	101.3	1.2
12:30	13.5	33	14.2	369.4	85.1	0.9
13:00	14.5	35	14.2	407.9	107.5	1.2
13:30	14.5	37	14.2	319.9	120.8	1.8
14:00	14.5	37	14.2	353.3	173.3	1.7
14:30	14.5	37	14.6	404.3	98.5	0.9
15:00	14.5	38	13.1	56	19	1.3
15:30	14.6	39	13.1	11.4	6.2	1.2
16:00	13.2	40	12	37.8	13.1	0.1
Promedio	13.98	30.47	13.21	280.05	88.39	1.17

Datos recolectados en la ciudad de Guaranda, Bolívar. Condición climática= nublado, n=75.

Con respecto a la Tabla 15, no se consideran en los cálculos los tres últimos datos de irradiancia global (56; 11,4; 37,8 W/m²) porque para valores muy bajos la eficiencia térmica es negativa.

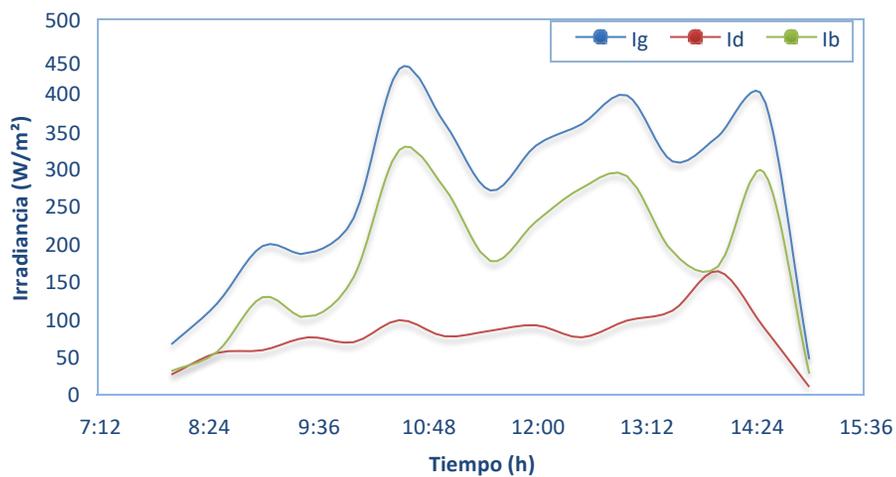


Fig. 30. Irradiancias: global (Ig), directa (Id) y difusa (Ib); Ensayo 08.

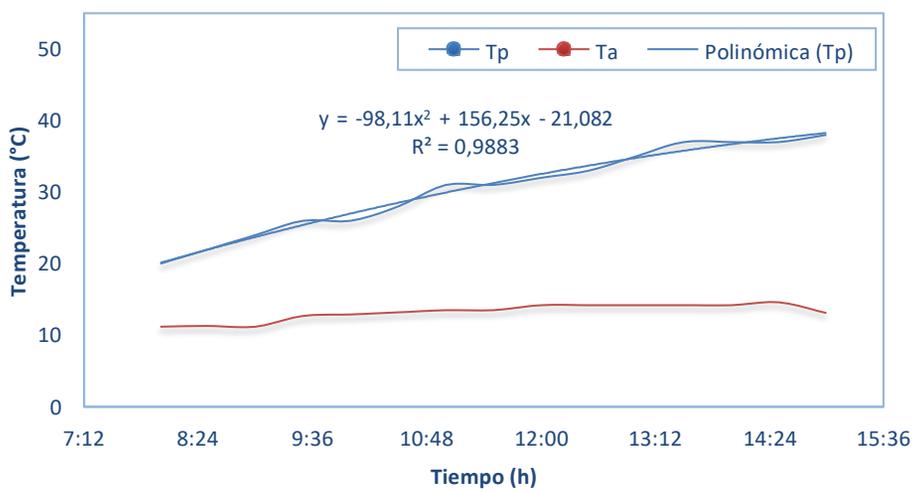


Fig. 31. Temperatura del ACS, Ensayo 08.

Tabla 16.

Cálculo de la eficiencia térmica, Ensayo 08

Tiempo (h)	Irradiancia directa Ib (W/m ²)	IT (W/m ²)	ΔT (°C)	$(\Delta T)^2$	no	n	$(T_p - T_a) / IT$ (°C/(W/m ²))
08:00	40.3	71.19	8.8	77.44	0.7865	0.6218	0.1236
08:30	65.8	121.85	10.7	114.49	0.7865	0.6670	0.0878
09:00	138.9	191.5	12.8	163.84	0.7865	0.6935	0.0668
09:30	111.6	182.84	13.3	176.89	0.7865	0.6847	0.0727
10:00	165.8	225.31	13.1	171.61	0.7865	0.7053	0.0581
10:30	335.2	406.06	14.8	219.04	0.7865	0.7347	0.0364
11:00	283.9	338.87	17.5	306.25	0.7865	0.7110	0.0516
11:30	187.1	258.67	17.5	306.25	0.7865	0.6876	0.0677
12:00	239.7	312.99	17.8	316.84	0.7865	0.7031	0.0569
12:30	284.3	337.63	18.8	353.44	0.7865	0.7040	0.0557
13:00	300.4	373.8	20.8	432.64	0.7865	0.7024	0.0556
13:30	199.1	295.5	22.8	519.84	0.7865	0.6675	0.0772
14:00	180	328.94	22.8	519.84	0.7865	0.6796	0.0693
14:30	305.8	371.48	22.4	501.76	0.7865	0.6939	0.0603
15:00	37	51.86	24.9	620.01	0.7865	0.0310	
15:30	5.2	10.7	25.9	670.81	0.7865	-3.0586	
16:00	24.7	35.32	28	784	0.7865	-0.4978	
Promedio	191.66	257.90	17.25	320.01	0.79	0.65	0.07

no=eficiencia óptica; n=eficiencia instantánea.

Con respecto a la Tabla 16, se puede indicar que al bajar la irradiancia solar global (W/m²) el valor de eficiencia térmica se reduce notablemente y se convierte en un valor negativo, por lo cual no se toman en cuenta para los cálculos los tres últimos valores. Esto ocurre debido al modelo matemático utilizado en la Norma EN 12975 donde al bajar la irradiancia las pérdidas primarias y secundarias se incrementan.

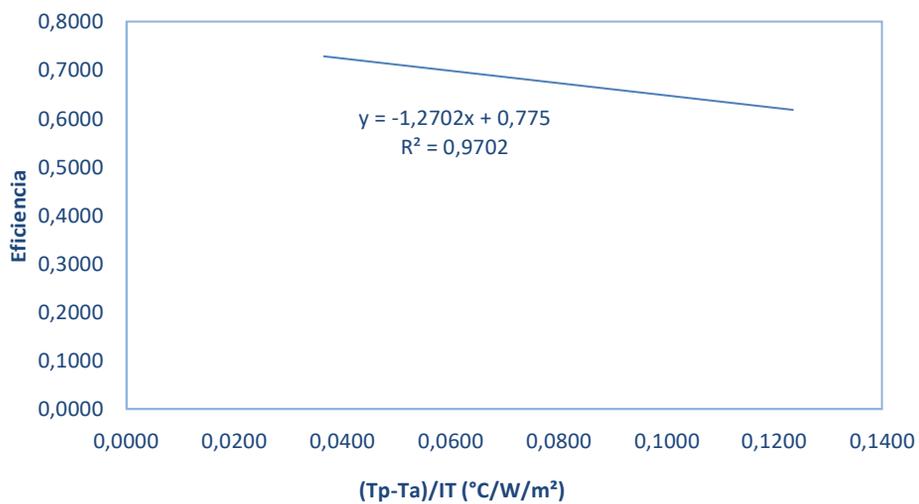


Fig. 32. Eficiencia térmica, Ensayo 08.

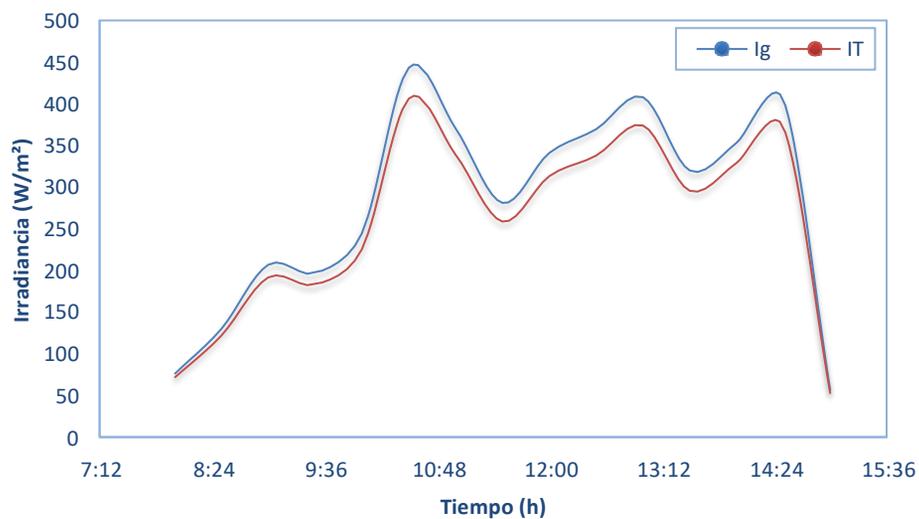


Fig. 33. Irradiancias global (I_g) y corregida (IT), Ensayo 08.

Tabla 17.

Datos del colector solar de tubos al vacío, Ensayo 09

Tiempo (h)	Agua caliente sanitaria (ACS)		Tambiente Ta (°C)	Irradiancia global Ig (W/m ²)	Irradiancia difusa Id (W/m ²)	Velocidad viento (m/s)
	Tentrada Te (°C)	Ttanque Tp (°C)				
08:00	14	20	12.5	178.5	46.3	0.1
08:30	14	21	12.5	495.8	62.5	0.8
09:00	14	25	13	593.3	70.7	1.1
09:30	14.2	29	13.2	726.9	116.2	1.3
10:00	14.5	33	13.2	605.7	74.2	1.1
10:30	13.7	37	16	714.8	123	1
11:00	14	37	16	885.9	121.5	0.1
11:30	14.3	39	15.9	235.1	140.4	1.9
12:00	14.5	40	15.5	144	73	1.8
12:30	14.5	40	15.5	136.5	49.5	1.3
13:00	14.2	40	14.3	142.3	52.3	1.4
13:30	14.3	41	14.3	1048	156.2	2
14:00	14.1	41	14	143.6	53.2	0.1
14:30	13.9	41	13	148.2	53	0.3
15:00	13.5	42	13	152.4	64.5	1.6
15:30	13	42	12	72.2	19.2	1.1
16:00	13	42	11	68.3	17.8	0.9
Promedio	14.11	35.07	14.13	423.40	83.77	1.06

Datos recolectados en la ciudad de Guaranda, Bolívar. Condición climática= nublado, n=76.

En esta tabla no se consideran en los cálculos los dos últimos valores de irradiancia solar.

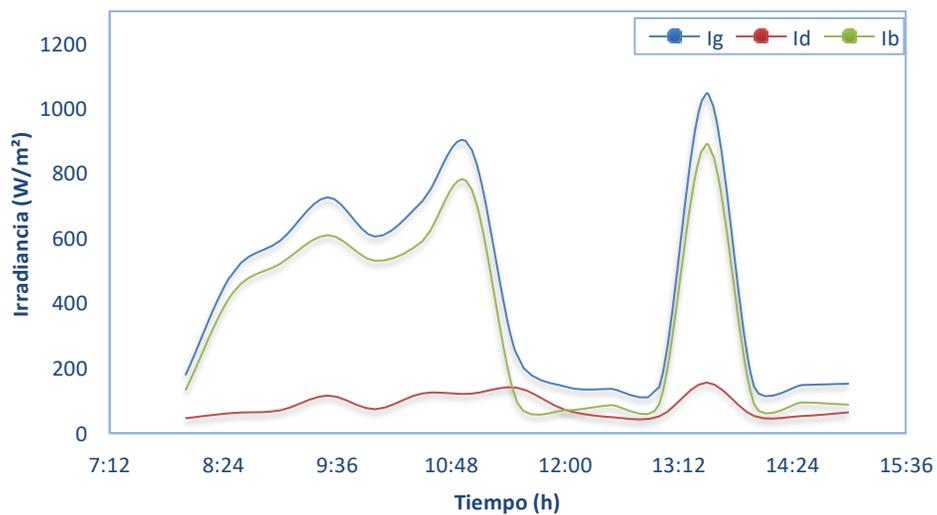


Fig. 34. Irradiancias: global (I_g), directa (I_d) y difusa (I_b); Ensayo 09.

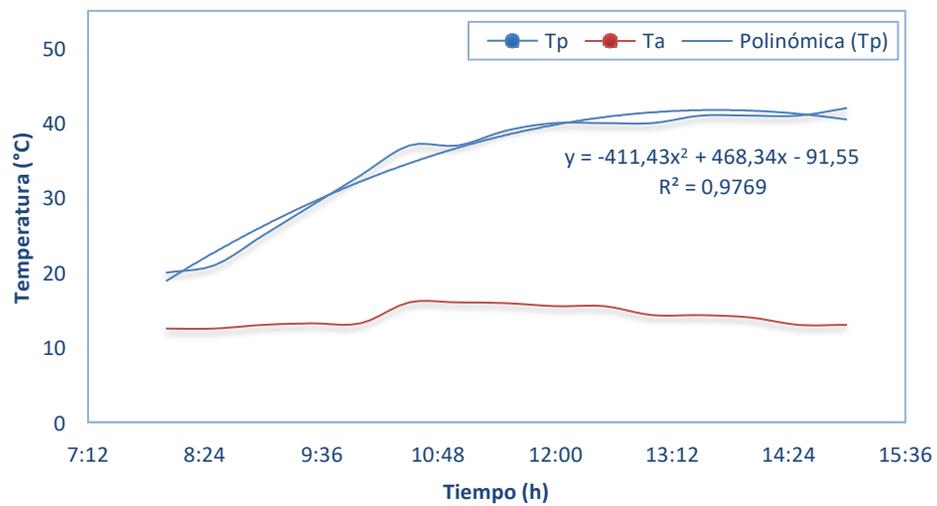


Fig. 35. Temperatura del ACS, Ensayo 09.

Tabla 18.

Cálculo de la eficiencia térmica, Ensayo 09

Tiempo (h)	Irradiancia directa I _b (W/m ²)	IT (W/m ²)	ΔT (°C)	(ΔT) ²	n _o	n	(T _p -T _a)/IT (°C/(W/m ²))
08:00	132.2	166.22	7.5	56.25	0.7865	0.7273	0.0451
08:30	433.3	455.88	8.5	72.25	0.7865	0.7617	0.0186
09:00	522.6	542.82	12	144	0.7865	0.7560	0.0221
09:30	610.7	664.59	15.8	249.64	0.7865	0.7523	0.0238
10:00	531.5	551.37	19.8	392.04	0.7865	0.7327	0.0359
10:30	591.8	651.78	21	441	0.7865	0.7377	0.0322
11:00	764.4	805.24	21	441	0.7865	0.7470	0.0261
11:30	94.7	220.01	23.1	533.61	0.7865	0.6241	0.1050
12:00	71	133.97	24.5	600.25	0.7865	0.4998	0.1829
12:30	87	125.83	24.5	600.25	0.7865	0.4813	0.1947
13:00	90	131.27	25.7	660.49	0.7865	0.4761	0.1958
13:30	891.8	954.2	26.7	712.89	0.7865	0.7417	0.0280
14:00	90.4	132.72	27	729	0.7865	0.4600	0.2034
14:30	95.2	137.08	28	784	0.7865	0.4556	0.2043
15:00	87.9	141.79	29	841	0.7865	0.4521	0.2045
15:30	53		30	900	0.7865	0.1009	
16:00	50.5		31	961	0.7865	0.0308	
Promedio	339.63	387.65	20.94	483.84	0.79	0.63	0.10

n_o=eficiencia óptica; n=eficiencia instantánea.

En la Tabla 18, se observa que los dos últimos valores de eficiencia energética son bajos, debido a la reducción de la irradiancia solar.

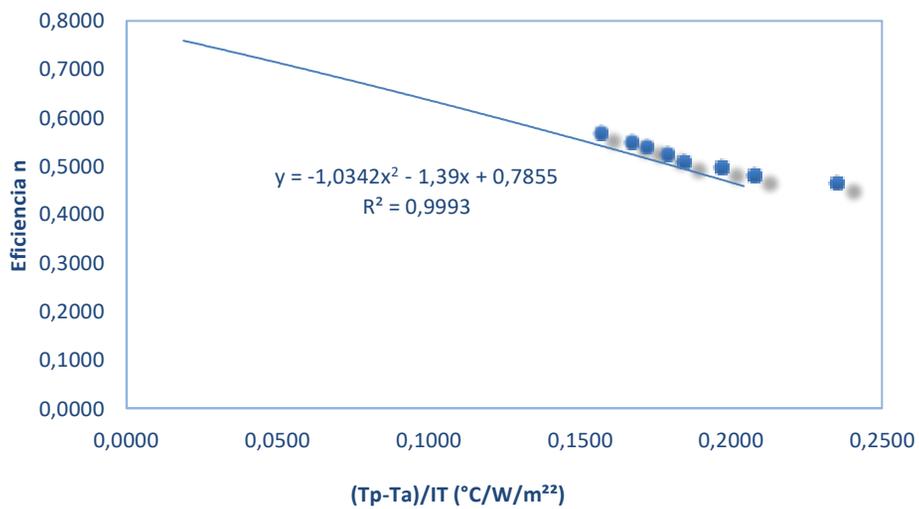


Fig. 36. Eficiencia térmica, Ensayo 09.

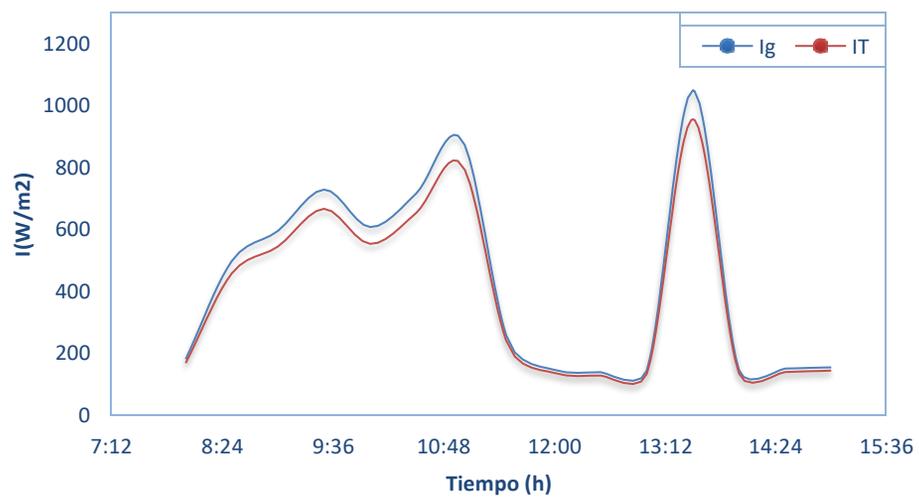


Fig. 37. Irradiancias global (I_g) y corregida (I_T), Ensayo 09.

Tabla 19.

Datos del colector solar de tubos al vacío, Ensayo 10

Tiempo Hora	Agua caliente sanitaria (ACS)		Tambiente (°C) Ta	Irradiancia(W/m ²) Ig	Irradiancia difusa Id	Velocidad viento (m/s)
	Tentrada (°C) Te	Ttanque(°C) Tp				
08:00	13.9	20	11.1	212	170.1	0
08:30	14.1	24	11.2	657	132	0.5
09:00	14.2	27	11	563.6	130.6	1.2
09:30	14.4	32	13.2	876.9	124.5	2.5
10:00	14.2	34	13.5	1047.5	130.9	1.5
10:30	14	35	14	937.4	128.7	1.3
11:00	14.3	37	14.5	748.4	173.6	0.5
11:30	14.4	40	14.5	962.4	155.1	3.5
12:00	15	42	15	1040.1	153	2.8
12:30	14.8	44	15	598.9	130.3	1.2
13:00	13.8	48	16	1116	153.4	0.5
13:30	13	49	15	551.5	78.6	1.9
14:00	13	50	14.9	585	82.6	0.1
14:30	13.5	52	14.9	317.4	57.6	1
15:00	15.1	53	14.5	377.4	91.5	1.2
15:30	15	54	13	187	95.4	0.9
16:00	15,1	55	13	195	78.4	0.5
Promedio	14.11	39.13	13.89	706.10	126.17	1.31

Datos recolectados en la ciudad de Guaranda, Bolívar; n=78.

En la Tabla 19, tampoco se consideran los dos últimos datos de irradiancia solar.

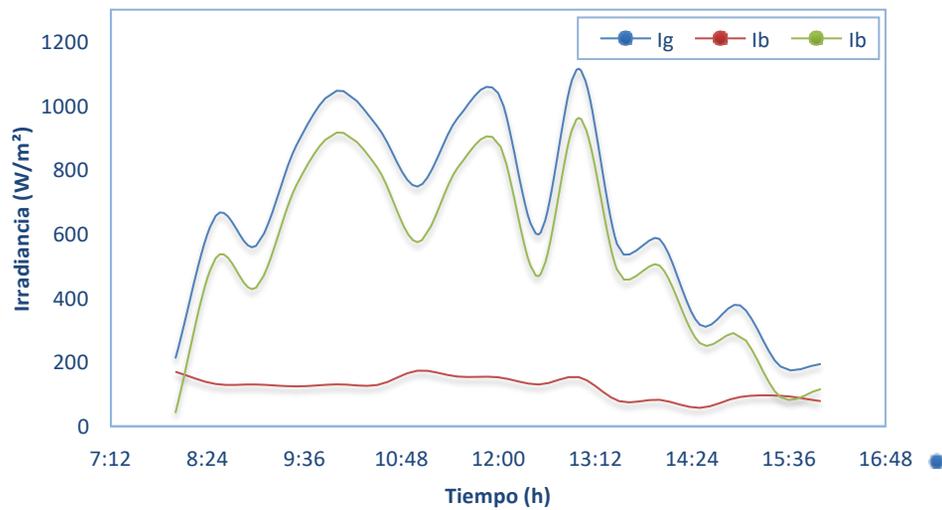


Fig. 38. Irradiancias: global (Ig), directa (Id) y difusa (Idif); Ensayo 10.

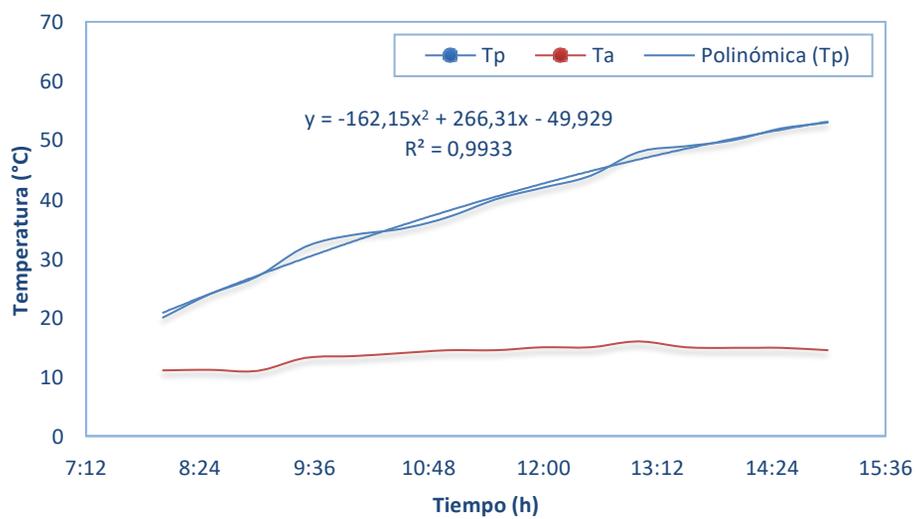


Fig. 39. Temperatura del ACS, Ensayo 10.

Tabla 20.

Cálculo de la eficiencia térmica, Ensayo 10

Tiempo (h)	Irradiancia directa Ib (W/m ²)	IT (W/m ²)	ΔT (°C)	$(\Delta T)^2$	no	n	$(T_p - T_a)/IT$ (°C/(W/m ²))
08:00	41.9	200.98	8.9	79.21	0.7865	0.7274	0.0443
08:30	525	595.29	12.8	163.84	0.7865	0.7566	0.0215
09:00	433	512.43	16	256	0.7865	0.7415	0.0312
09:30	752.4	790.89	18.8	353.44	0.7865	0.7513	0.0238
10:00	916.6	942.54	20.5	420.25	0.7865	0.7537	0.0217
10:30	808.7	843.64	21	441	0.7865	0.7488	0.0249
11:00	574.8	678.17	22.5	506.25	0.7865	0.7355	0.0332
11:30	807.3	867.11	25.5	650.25	0.7865	0.7400	0.0294
12:00	887.1	936.01	27	729	0.7865	0.7402	0.0288
12:30	468.6	541.97	29	841	0.7865	0.6990	0.0535
13:00	962.6	1004	32	1024	0.7865	0.7330	0.0319
13:30	472.9	496.54	34	1156	0.7865	0.6694	0.0685
14:00	502.4	527.03	35.1	1232.01	0.7865	0.6715	0.0666
14:30	259.8	287.11	37.1	1376.41	0.7865	0.5595	0.1292
15:00	285.9	343.4	38.5	1482.25	0.7865	0.5872	0.1121
15:30	91.6	173.67	41	1681	0.7865	0.3580	
16:00	116.6	180.2	42	1764	0.7865	0.3600	
Promedio	579.93	637.81	25.25	714.06	0.79	0.71	0.05

no=eficiencia óptica; n=eficiencia instantánea.

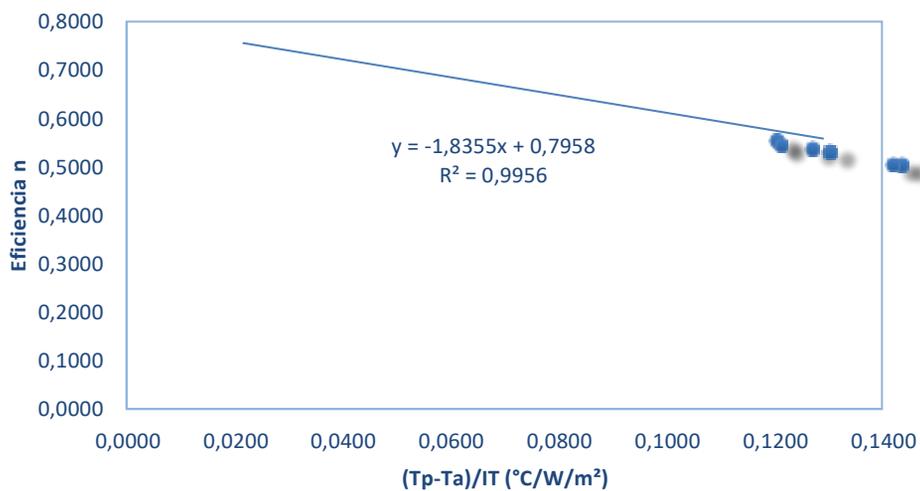


Fig. 40. Eficiencia térmica, Ensayo 10.

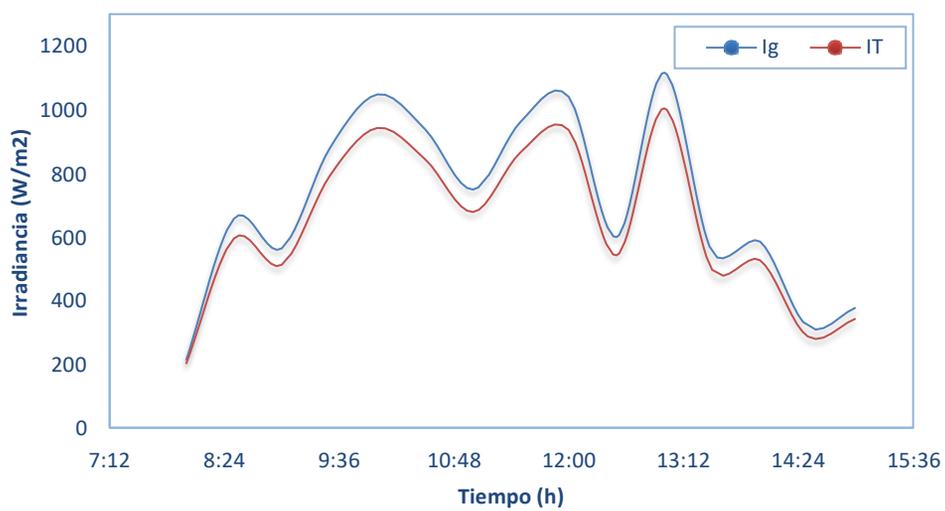


Fig. 41. Irradiancias global (I_g) y corregida (I_T), Ensayo 10.

Tabla 21.
Resumen de los datos analizados

	Ensayo	Eficiencia (n)	Irradiancia IT (W/m ²)	Velocidad viento (m/s)
Martes 9	1	0.63	144.42	0.58
Miércoles 10	2	0.72	409.16	0.51
Jueves 11	3	0.68	172.88	0.95
Viernes 12	4	0.7	462.48	0.95
Sábado 13	5	0.65	452.86	1.62
Domingo 14	6	0.72	725.61	1.58
Lunes 15	7	0.7	390.26	1.04
Martes 16	8	0.65	257.9	1.17
Miércoles 17	9	0.63	387.65	1.06
Viernes 19	10	0.71	637.81	1.31
	Promedio	0.68	404.10	1.08

Tabla 22.
Promedio de los parámetros característicos

Ensayo	Tentrada Te (°C)	Ttanque Tp (°C)	Tambiente Ta (°C)	Irradiancia global Ig (W/m ²)	Irradiancia difusa Id (W/m ²)	Velocidad viento (m/s)
1	14.29	25.59	13.85	151.98	78.23	0.58
2	14.06	31.24	15.41	363.49	228.55	0.51
3	13.46	25.18	12.49	183.23	93.80	0.95
4	13.92	32.76	14.21	495.99	137.79	0.95
5	14.64	40.76	14.35	488.38	124.43	1.62
6	14.65	39.43	14.90	784.24	207.95	1.58
7	14.05	32.35	13.84	420.51	145.52	1.04
8	13.98	30.47	13.21	280.05	88.39	1.17
9	14.11	35.07	14.13	423.40	83.77	1.06
10	14.11	39.13	13.89	706.10	126.17	1.31
Promedio	14.13	33.20	14.03	429.74	131.46	1.08

Tabla 23.

Eficiencias térmicas promedio

Ensayo	Irradiancia directa Ib (W/m ²)	IT (W/m ²)	ΔT	$(\Delta T)^2$	no	n	$(T_p - T_a)/IT$
1	73.75	144.42	11.74	154.16	0.79	0.63	0.11
2	159.34	409.16	13.72	232.06	0.79	0.72	0.04
3	89.43	172.88	12.68	178.70	0.79	0.68	0.08
4	358.20	462.42	18.55	395.45	0.79	0.70	0.06
5	363.95	452.86	26.41	813.61	0.79	0.65	0.08
6	576.29	725.61	24.53	694.87	0.79	0.72	0.04
7	274.99	390.26	18.51	373.87	0.79	0.70	0.06
8	191.66	257.90	17.25	320.01	0.79	0.65	0.07
9	339.63	387.65	20.94	483.84	0.79	0.63	0.10
10	579.93	637.81	25.25	714.06	0.79	0.71	0.05
Promedio	300.72	404.10	18.96	436.06	0.79	0.68	0.07

IT=irradiancia corregida; no=eficiencia óptica; n=eficiencia instantánea.

