



FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES

CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**“PROPUESTA DE UN CAPTADOR SOLAR TÉRMICO PLANO
MODIFICADO CON ABSORBENTE DE ACERO LAF PARA ZONAS
RURALES”**

Tesis para optar por el Título profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

Presentado por:

BACH. ARTURO JACINTO CAMA TORRES

Asesor:

MG. MIGUEL MEDINA

LIMA, PERÚ

2018

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Lima, 24 de noviembre del 2018

Los integrantes del Jurado de tesis:

Presidente: Dra. Susan Mery Medina Canzio
Integrante: Mg. Guillermo Gonzalo Lazo Alatriza
Integrante: Ing. Roxana Yanett Díaz Vega

Se reúnen para evaluar la tesis titulada:

Propuesta de un captador solar térmico plano modificado con absorbente de Acero LAF para zonas rurales

Presentada por el bachiller:

- **Arturo Jacinto Cama Torres**

Para optar el Título Profesional de **Ingeniero Ambiental**

Asesorada por:

- Ing. Miguel Medina Canzio

Luego de haber evaluado el informe final de tesis y evaluado el desempeño de los estudiantes en la sustentación, concluyen de manera unánime () por mayoría simple () calificar a:

Integrante 1: Arturo Jacinto Cama Torres			Nota (escrito): DIECIOCHO
Aprobado (<input type="checkbox"/>)	Aprobado - Muy buena (<input checked="" type="checkbox"/>)	Aprobado - Sobresaliente (<input type="checkbox"/>)	Desaprobado (<input type="checkbox"/>)

Los miembros del jurado firman en señal de conformidad.


Presidente del Jurado


Miembro del Jurado


Miembro del Jurado


Asesor

DEDICATORIA

A mi familia, que son mi guía y razón;
a mi yo de 12 años, quien creía que un mundo autosostenible era posible;
a quien lea estas líneas, el trabajo detrás de esta investigación
fue el inicio de un largo camino.
Nunca dejes de perseguir un sueño.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres: Jacinto y Rosa por su apoyo, no sólo en mi tesis, no sólo en mi carrera, sino en mi vida entera. Agradezco a mi hermano Alonso por sus ánimos y su calma inspiradora, recordándome que en este camino nada tiene por qué ser tan complicado.

Agradezco a mi maestro Enrique Chávez porque me enseñó a diseñar este sistema de evaluación de rendimiento, me acompañó durante todo el proceso de construcción del captador solar, su instalación y principales cálculos, pero sobre todo porque compartió conmigo sus objetivos, enseñándome a hacer lo que pocos logran hacer: Trabajar en lo que te gusta.

A Franco Canziani, por su apoyo, guía y valioso enfoque que dieron valor agregado a este trabajo de investigación.

A mi asesor Miguel Medina, por su apoyo y revisión dedicada de este documento hasta su culminación.

Agradezco al Ing. Samuel Samamé y a su hermano Raúl, dueños del taller en donde se construyó este captador solar, juntos dieron vida al prototipo utilizado en este estudio.

A Oswaldo, Armando y Juan, colaboradores de esta Institución Educativa, quienes estuvieron siempre prestos a colaborar con lo que se necesitara.

A Diana Tarazona, amiga y destacada profesional, quien me apoyó en la elaboración y el mejoramiento de planos, así como de todo el material gráfico.

Y desde luego, todo gracias a Dios.

ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN	16
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
1. Problema general.....	22
2. Problemas específicos	22
III. MARCO TEÓRICO.....	23
1. Antecedentes	23
1.1. Rendimiento térmico de captadores solares.....	23
1.2. Captadores solares térmicos no convencionales.....	26
1.3. Estudio de captadores solares térmicos en Perú.....	28
2. Marco conceptual.....	29
2.1. Energía del sol.....	29
2.2. Captador solar térmico.....	43
2.3. Captador solar térmico plano con cubierta	46
2.4. Evaluación de rendimiento térmico.....	53
3. Marco temporal	58
4. Marco normativo	59
4.1. Normas técnicas	59
III. OBJETIVOS	61
1. Objetivo general.....	61

2. Objetivos específicos	61
V. METODOLOGÍA	62
1. Métodos	62
1.1. Construcción del captador	62
1.2. Diseño experimental	69
1.3. Ubicación y Clima de la zona elegida para el ensayo	69
1.4. Configuración de ensayo	70
1.5. Determinación de la constante de tiempo	74
1.6. Ensayo de rendimiento térmico en estado estacionario	77
1.7. Determinación de la ecuación de rendimiento	80
1.8. Análisis estadístico	81
2. Materiales	82
2.1. Construcción del captador	82
2.2. Conexiones y equipos	82
2.3. Sistema de Medición	83
2.4. Software para procesamiento de datos	83
VI. RESULTADOS	84
1. Constante de tiempo	84
2. Variables medidas para cálculo de la eficiencia instantánea del CSTP	87
2.1. Irradiancia solar	87
2.2. Temperatura del aire circundante	88
2.3. Temperaturas a la entrada y salida del captador	89

3. Curva de eficiencia.....	90
3.1. Eficiencia instantánea del CSTP.....	90
3.2. Modelo lineal de eficiencia instantánea del CSTP	96
3.3. Modelo cuadrático de eficiencia instantánea del CSTP	98
4. Análisis estadístico.....	100
4.1. Prueba de Normalidad a los datos de temperatura	100
4.2. Regresión lineal aplicada al modelo de eficiencia instantánea	102
4.3. Análisis de Varianza al modelo lineal de eficiencia instantánea del CSTP	103
5. Costo estimado de producción del CSTP	104
VII. DISCUSIÓN	106
1. Constante de tiempo del CSTP	106
2. Variables medidas para cálculo de eficiencia instantánea del CSTP	107
3. Eficiencia instantánea	109
3.1. Ecuación de eficiencia instantánea del CSTP	109
3.2. Análisis breve del mercado de captadores solares.....	111
VIII. CONCLUSIONES	114
IX. RECOMENDACIONES.....	116
X. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	118
XI. GLOSARIO	127
XII. ANEXOS	133

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Aislantes térmicos más utilizados.....	50
Tabla 2. Especificaciones técnicas del captador solar	64
Tabla 3. Condiciones para ensayo de rendimiento térmico.....	80
Tabla 4. Desviación admisible de parámetros medidos durante el estado estacionario.....	80
Tabla 5. Resultado del ensayo para calcular la constante de tiempo.....	85
Tabla 6. Resultados del ensayo de rendimiento para el día 19/11/2015.....	92
Tabla 7. Datos globales obtenidos en la evaluación de eficiencia térmica	95
Tabla 8. Resultados de la prueba de normalidad a las variables T_e y T_s	101
Tabla 9. Estadísticas de la regresión lineal.....	102
Tabla 10. Cuadro de Análisis de Varianza (ANOVA)	104
Tabla 11. Rendimiento y precio de captadores solares térmicos	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Espectro electromagnético e influencia de la atmósfera en la radiación solar.	31
Figura 2. Constante solar y distancia Sol-Tierra.....	32
Figura 3. Variación anual de la radiación solar extraterrestre.	33
Figura 4. Radiación solar extraterrestre.	34
Figura 5. Flujo de energía entre el espacio y la atmósfera.....	36
Figura 6. Movimiento Tierra-Sol.	37
Figura 7. Esquema de ángulos solares.	39
Figura 8. Principales tipos de captadores solares térmicos.....	45
Figura 9. Efecto invernadero en un captador solar.....	48
Figura 10. Colectores con circuito hidráulico de tipo parrilla y de serpentín, en vertical y horizontal.....	52
Figura 11. Flujos de energía a través de un captador.	54
Figura 12. Curva de eficiencia.....	58
Figura 13. Parrilla de cobre y carcasa de aluminio.....	66
Figura 14. Carcasa de aluminio del captador.....	66
Figura 15. Colocación de aislante termoacústico.....	67
Figura 16. Unión de Parrilla, placa absorbente y aislante.....	67
Figura 17. Cierres herméticos entre los extremos de la parrilla y la carcasa ...	68
Figura 18. Captador solar térmico plano con absorbente de acero LAF	68
Figura 19. Configuración para ensayo de rendimiento del captador solar térmico plano (CSTP). Vista del CSTP y el tanque de almacenamiento.....	72

Figura 20. Configuración para ensayo de rendimiento del captador solar térmico plano (CSTP). Vista de mini estación meteorológica. 73

Figura 21. Configuración para ensayo de rendimiento. Vista lateral: Solarímetro y controlador de temperatura de entrada. 73

Figura 22. Configuración para ensayo de rendimiento. Vista de Reservorio y bomba para circulación asistida. 74

Figura 23. Constante de tiempo del captador..... 76

Figura 24. Diferencia entre la temperatura a la salida del captador solar y la temperatura del aire circundante en función del tiempo..... 85

Figura 25. Irradiancia solar (W/m^2) en el plano del captador..... 88

Figura 26. Temperatura del aire circundante ($^{\circ}C$). 89

Figura 27. Diferencia entre temperatura de salida y temperatura de entrada del captador ($^{\circ}C$)..... 90

Figura 28. Temperaturas medidas el día jueves 19/11/2015. 93

Figura 29. Irradiancia solar medida el día jueves 19/11/2015. 94

Figura 30. Modelo lineal de la eficiencia instantánea del captador solar térmico con absorbente de Acero LAF..... 96

Figura 31. Modelo cuadrático de la eficiencia instantánea del captador solar térmico con absorbente de Acero LAF. 98

Figura 32. Curva de Regresión ajustada..... 103

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. Certificado de Calibración del solarímetro.	133
ANEXO 2. Certificado de Calibración de los pirómetros.	134
ANEXO 3. Presupuesto de la Investigación.	135
ANEXO 4. Universo de datos medidos.	136
ANEXO 5. Planos del CSTP con absorbente de Acero LAF	141

RESUMEN

Esta investigación se realizó con el fin de diseñar y evaluar un captador solar térmico plano para flujo de agua, de bajo costo y rendimiento similar al de modelos existentes en el mercado nacional, para satisfacer las necesidades de agua caliente sanitaria (ACS) de poblaciones que residan en zonas rurales.

El prototipo propuesto se compone de una cubierta de vidrio templado, un circuito hidráulico de cobre y una placa absorbente de acero negro laminado en frío (LAF), material elegido por su bajo precio y fácil operatividad.

En este documento se detalla: el diseño y construcción del captador solar, la configuración del ensayo de rendimiento y los resultados obtenidos en términos de eficiencia y costo del equipo.

Para evaluar el rendimiento del captador se realizaron seis ensayos entre los meses de noviembre y diciembre de 2015, los resultados arrojaron para este prototipo una eficiencia pico (η_0) de 45.23 %, un factor de eficiencia (F_R) de 0.77 y un coeficiente global de pérdidas (U_L) de 4.33 W/m²/°C. El precio de este prototipo se estima en S/ 1190.00, siendo un 15 % más barato que el modelo comercial disponible en el mercado local.

Se concluyó que el prototipo evaluado posee una eficiencia pico menor al promedio, pero una mayor capacidad para conservar el calor. Asimismo, constituye una alternativa más económica que su competencia, aunque no de forma significativa, pudiéndose mejorar el diseño para hacerlo más accesible a la población que viva en zonas rurales con alta disponibilidad de energía solar y bajo poder adquisitivo.

Palabras clave: Energía solar térmica, eficiencia térmica, captadores solares, acero negro LAF

ABSTRACT

This research is aimed to build and test a flat plate solar collector prototype for water heating. It was designed to reach a similar performance to the offered solar collectors in national market with a lower production cost, in order to satisfy the hot water needs of population from rural areas.

This collector prototype includes tempered glass cover, copper hydraulic circuit and cold rolled mild steel as absorbent plate, chosen because its low cost and easy handling.

This document describes the design and construction of the solar collector, the efficiency test procedures and the results obtained for thermal efficiency and manufacturing cost of the prototype.

The efficiency assessment of this solar collector was carried out in six tests, performed between november and december 2015. The solar collector reached the following values for each measured parameter: optical efficiency (η_0) = 45.23 %; efficiency factor (F_R) = 0.77 and global loss factor (U_L) = 4.33 W/m²/°C. The estimated price for this prototype is S/ 1,194.00, which is 15 % cheaper than the available models in national market.

In conclusion, the mild steel plate solar collector has an optical efficiency lower than the average, although it is capable to conserve heat better. It is a cheaper alternative than competition but not in a significant way. It is possible to improve this design to make it more accessible for population from rural areas with high potential for solar energy use and low purchasing power.

Keywords: Solar thermal energy, thermal efficiency, solar collector, cold rolled mild steel

I. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es uno de los mayores retos a superar de este siglo, sus efectos ya se han dejado sentir en nuestro ambiente alterando los bienes y servicios que los ecosistemas proveen, manifestándose, por ejemplo, en la reducción en un 22 % de los glaciares tropicales de Sudamérica o la disminución en un 12 % del agua que llega a la costa (PNUD, PNUMA, UICN e IM, 2016).

Existe un amplio consenso científico que asegura que las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y otros gases de efecto invernadero (GEI) son la causa principal del calentamiento global (PNUMA, 2012), fenómeno estrechamente relacionado con el cambio climático. Estos gases son generados en el desarrollo de las actividades humanas, a través de procesos como la combustión y la aplicación de determinadas sustancias químicas.

A nivel mundial, la mayor parte de las emisiones de GEI provienen de la Producción de calor y electricidad, seguida muy de cerca por la Agricultura y el cambio de uso de suelo (IPCC, 2014). Ante esta situación, las Naciones Unidas implementaron estrategias y políticas para hacer frente las amenazas del Cambio Climático. En la 21^{era} Conferencia de las Partes (COP21) se aprobó el Acuerdo de París, suscrito por 195 Estados Parte y la Unión Europea. El Perú, suscrito a este Acuerdo, se comprometió a reducir en un 30 % sus emisiones de

GEI proyectadas para el año 2030. Para el Perú, cumplir con esta meta implica tomar medidas, principalmente, en los sectores Forestal y Energético.

Por consiguiente, a fines de reducir las emisiones proyectadas de GEI provenientes del sector energético, es indispensable desarrollar soluciones tecnológicas que permitan producir más energía con menos emisiones, a la vez que se promueve el consumo eficiente a nivel doméstico e industrial. En este contexto, las energías renovables aparecen como una importante alternativa para cumplir progresivamente con los compromisos suscritos.

Afortunadamente, Perú es un país que posee un alto potencial para el desarrollo de energías renovables, debido a su ubicación geográfica y características climáticas. En cuanto a la disponibilidad de energía solar diaria, la costa norte del Perú (entre las latitudes 3° y 8° S) y gran parte de la sierra sobre los 2500 msnm registran valores entre 5.5 y 6.0 kWh/m²/día (SENAMHI, 2003); esta cifra demuestra nuestro potencial de uso de la energía solar, pero también evidencia el limitado aprovechamiento de esta fuente si lo comparamos con otras regiones del mundo, como por ejemplo, Madrid, que con un valor menor (4.88 kWh/m²/día) ha difundido el uso de la tecnología solar con mayor éxito (Sancho et al., 2012).

La energía solar puede emplearse de dos maneras: energía solar fotovoltaica, para producir electricidad y energía solar térmica, para producir calor. Esta última, puede aplicarse de manera pasiva, en el

diseño arquitectónico de una edificación; o activa, utilizando captadores solares, equipos que reciben, almacenan y distribuyen la energía térmica sobre un fluido caloportador con el fin de generar agua caliente sanitaria (ACS) y/o conformar sistemas de climatización.

En Perú, especialmente en la zona sur del país, existe una amplia gama de empresas locales que comercializan estos equipos para su aplicación a nivel doméstico e industrial. Esta tecnología se extendió rápidamente a mediados de la última década en la zona sur de nuestro país. En 2006, existía en el Perú de 25000 a 30000 termas solares, en su mayoría ubicados en Arequipa (Horn, 2006). Lamentablemente, su crecimiento ha sido lento y esto podría deberse a su alto costo de inversión inicial y a la desconfianza que aún persiste en los consumidores ante la capacidad de los captadores solares térmicos para satisfacer sus necesidades de ACS, sobre todo en días nublados.

Por tal motivo, en esta investigación se diseñó y evaluó un captador solar térmico con el fin de proponer una alternativa tecnológica que sea funcional, competitiva y económica, en comparación a las opciones presentes en el mercado local.

El diseño de este prototipo de captador solar térmico plano (en adelante, CSTP) para calentamiento de agua consta de: un circuito de tuberías de cobre, una cubierta de vidrio templado y una placa absorbente de acero negro laminado en frío (en adelante, acero LAF), material elegido por su bajo costo.

La presente investigación tuvo como objetivo principal evaluar el rendimiento de un captador solar térmico con placa absorbente de acero LAF a través de la obtención de la ecuación de rendimiento, la cual permite hallar, entre otros valores, la eficiencia pico y el coeficiente de pérdidas globales del captador.

Esta evaluación es indispensable para poder calcular el rendimiento que alcanzará el prototipo propuesto de captador solar a diferentes niveles de radiación y temperatura. Además la ecuación de eficiencia obtenida permite identificar el coeficiente que más influye en el rendimiento del equipo, de este modo, se podrá mejorar el diseño del captador a futuro.

La metodología desarrollada en esta investigación está basada en el procedimiento presentado en la norma técnica peruana “NTP 399:400:2001 Colectores Solares. Método de ensayo para determinar la eficiencia de los colectores solares”. Asimismo, en el presente documento se opta por utilizar los términos y definiciones establecidos por la norma internacional “UNE-EN-ISO 9806:2013 Energía solar. Captadores solares térmicos. Métodos de ensayo”, con objeto de mantener el mismo lenguaje técnico que los artículos de investigación actuales sobre energía solar térmica utilizan.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Perú enfrenta grandes desafíos en lo que respecta al acceso a la energía y a los servicios básicos de saneamiento, especialmente en zonas rurales.

En cuanto a pobreza energética, un 40.5% de la población rural peruana no tiene acceso a electricidad (Escobar et al., 2016); dos millones y medio de hogares no tienen acceso a mecanismos de cocción moderna, de este grupo, más de un millón y medio (93.1%) se ubica en zonas rurales (IDB, 2013); asimismo, las personas que no viven en condiciones adecuadas de confort térmico y son consideradas en alto y muy alto riesgo de salud por la ocurrencia de heladas y friaje, ascendía en 2015 a más de cinco millones a nivel nacional (PCM, 2015).

Respecto al acceso a saneamiento básico, entre febrero 2017 y enero 2018 el 28.1% de la población rural del país no contaba con acceso a agua potable por red pública (INEI, 2018). Por otro lado, aunque no haya información oficial sobre el acceso a agua caliente sanitaria (ACS), se infiere que su acceso es aún más restringido.

En resumen, un porcentaje importante de la población rural no satisface sus necesidades energéticas y sanitarias básicas, siendo que ya se han planteado diversas alternativas tecnológicas para solucionar este problema, y buen número de estas propuestas incluyen el uso de energía renovable para hacer frente a esta problemática (Valverde, 2018).

Por otro lado, el sector de la población que puede acceder a una instalación de agua caliente tiene tres alternativas tecnológicas: las termas eléctricas, las termas a gas y las termas solares (para fines de esta investigación, el término utilizado es “captador solar térmico”). El primer tipo de dispositivo se caracteriza por un alto consumo de energía eléctrica; desde el enfoque ambiental, esto implica un nivel significativo de emisiones de dióxido de carbono (CO_2) y otros gases de efecto invernadero (GEI) durante su operación. En el segundo caso, ocurre algo similar, pero de manera directa; como producto de la combustión del gas natural se emite CO_2 y vapor de agua ($\text{H}_2\text{O}_{(g)}$) a la atmósfera. Como se ha indicado anteriormente, las emisiones de GEI son la causa principal del calentamiento global (PNUMA, 2012). Por el contrario, el uso de termas solares no implica emisiones de GEI durante su fase operativa, a excepción de los sistemas térmicos solares híbridos, que poseen un calentador eléctrico de respaldo para los momentos en que no se consiga la temperatura requerida con la energía solar captada; en todo caso, constituye la alternativa tecnológica para obtención de ACS menos contaminante, en términos de emisiones de GEI.

Por consiguiente, se propone una alternativa de captador solar térmico económicamente accesible para la población que viva en zonas con alta disponibilidad de energía solar, pero con bajo poder adquisitivo; adicionalmente, se pretende reducir las emisiones proyectadas de GEI provenientes de la obtención de ACS en zonas rurales.

Con el presente trabajo de investigación, y en atención al problema desarrollado previamente, se planteó resolver las siguientes preguntas:

1. Problema general

¿Se puede diseñar y producir un prototipo de captador solar térmico plano (CSTP) cuyo precio sea menor que lo ofertado actualmente en el mercado, sin perder significativamente su funcionalidad?

2. Problemas específicos

- a) ¿Cuál será el rendimiento del prototipo propuesto de CSTP a través de la determinación de la ecuación de eficiencia instantánea?
- b) ¿Cuál será el costo de producción y el precio de venta de este prototipo?
- c) En términos de rendimiento y precio, ¿Qué tan competitivo es el prototipo de CSTP propuesto?

III. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se detallan los antecedentes de esta investigación, así como los fundamentos teóricos de la misma.

1. Antecedentes

A continuación, se procede a detallar las principales investigaciones que anteceden a este trabajo.

1.1. *Rendimiento térmico de captadores solares*

El desarrollo de las energías renovables ha tomado impulso en los últimos años, ello gracias a la necesidad mundial de diversificar la matriz energética, cuyo fin es cubrir la demanda creciente de energía y reducir las consecuencias ambientales de nuestra dependencia a los combustibles fósiles.

Dentro de este grupo de energías renovables se encuentra la solar térmica, cuyo crecimiento a nivel mundial se ha mantenido constante en los últimos años. A fines de 2012 se contaba ya con 269 GW térmicos instalados en el mundo, la mayoría concentrados en China y la Unión Europea (Mathner & Weiss, 2014).

Las aplicaciones más extendidas de esta tecnología se encuentran en el ámbito doméstico, específicamente, en la generación de agua caliente sanitaria (ACS) y en los sistemas de climatización. Esta cualidad es la que ha favorecido su rápida difusión y es por ello que

se han realizado diversas investigaciones orientadas a optimizar el diseño de los captadores, tanto en rendimiento como en precio, y así satisfacer mejor las necesidades del usuario.

Brunold, Frey y Frei (1994) en su trabajo *“A comparison of three different collectors for process heat applications”* evaluaron las distintas tecnologías para el calentamiento de fluidos, compararon la eficiencia de: un captador de tubos al vacío, un captador con concentrador parabólico compuesto y un captador plano experimental con cubierta de capilares de vidrio, a fin de encontrar el mejor dispositivo para aplicaciones con procesos térmicos. Los resultados demostraron que los captadores de tubos al vacío son más eficientes en aplicaciones que requieren temperaturas mayores a 100 °C, mientras que el captador experimental sólo superó a los de tubos al vacío en rangos de baja temperatura, sin ser más eficiente que los captadores planos con cubierta de vidrio que ya se ofrecían en el mercado.

Es entonces que el modelo de captador solar térmico más utilizado hace referencia a los captadores solares de placa plana, compuestos mayormente por: un circuito de tuberías internas, una placa absorbente, aislamiento interno y una cubierta de vidrio (AVEN, 2008), siendo el cobre el material más utilizado para la tubería interna y el absorbente debido a su conductividad térmica y maleabilidad. Partiendo de esta configuración, variando los materiales y técnicas de construcción, se ha podido optimizar el rendimiento de estos equipos.

Optimizar el rendimiento de un captador, implica incrementar la ganancia de calor y reducir las pérdidas globales del sistema. Durante la última década, la tecnología ha permitido experimentar con distintos materiales y tratamientos que mejoren la captación de energía, principalmente, en la placa absorbente.

Billy, Tanti, Mohd y Rosli (2014), de la facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Malaysia, compararon la eficiencia térmica de placas absorbentes de cobre y aluminio en sistemas de captadores solares planos para agua. Sus resultados arrojaron una ganancia de calor del absorbente de aluminio de 1100.69 W frente a 1025.36 W del absorbente de cobre, concluyendo que el aluminio es capaz de absorber más calor y a su vez almacenarlo por más tiempo que el cobre. El uso de este material en estos sistemas aún se encuentra a nivel experimental.

Otros estudios, relacionados al material constituyente del absorbente del captador, se han llevado a cabo a nivel de cálculo y modelamiento. En Australia, Walsh y Lin (2015) diseñaron un modelo de captador solar sin cubierta, su placa absorbente era de acero con revestimiento de aleación de zinc y aluminio, tecnología patentada bajo el nombre de “Colorbond”, y que actualmente se aplica en la elaboración de tejados. Este captador funciona como el techo de una vivienda en cuyo interior circula el agua través del espacio formado entre el relieve del tejado y su base aislante. Calcularon la eficiencia térmica para un tejado trapezoidal y otro sinusoidal a partir del balance de energía de cada sistema. La aplicación de este material inusual demostró poder

alcanzar eficiencias altas (alrededor del 70 %) y obtener saltos de temperatura de 8 °C.

Por su parte; Rodríguez, López, Araiza, Olvera y Dorrbercker (2016) estimaron la eficiencia térmica que pueden alcanzar sistemas de captación con diferente configuración de elementos constructivos mediante un software de diseño mecánico y un algoritmo de simulación de operación de un captador solar de placa plana. De esta manera, calcularon que, en un día típico de cielo despejado en Cuba, estos sistemas podían alcanzar eficiencias entre 43 y 45 %. La mejor configuración constructiva fue para el caso de tuberías y placa de cobre con aislamiento de poliuretano, seguida por la configuración de tuberías de cobre, placa de aluminio y aislamiento de poliuretano. También concluyeron que el uso de celulosa como aislante constituye la configuración menos eficiente.

1.2. Captadores solares térmicos no convencionales

En el apartado anterior se expusieron los avances orientados a la búsqueda de un captador solar que alcance mayores niveles de rendimiento, sin embargo, existe una amplia variedad de prototipos de captadores no convencionales, diseñados con el fin de reducir, principalmente, su costo de producción a partir del uso de materiales de bajo precio e incluso, elementos reciclados.

Plazas, Moreno y Sánchez (2001) diseñaron y construyeron un captador solar que les permitiera variar la configuración y parámetros de operación, con fines educativos. Se determinó la eficiencia de

cuatro posibles configuraciones, con variaciones en el tipo de aislante y el número y espacio entre los tubos de circulación. Como resultado el captador con mayor número de tubos y con aislante de fibra de vidrio fue el que obtuvo mejor rendimiento. Este trabajo culminó en la elaboración de una guía de prácticas para la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, (Colombia).

Por su parte, Becerra, Barba-Ortega y Rodríguez (2010) construyeron un captador solar con tubos de vidrio provenientes de lámparas fluorescentes en la Universidad de Pamplona (Colombia), cada uno se componía de dos tubos concéntricos de vidrio y un tubo de calor de cobre en la parte interna, utilizando agua como fluido caloportador. La eficiencia térmica del captador fue evaluada con un tiempo de toma de datos de 15 días cada media hora, midiéndose temperatura, presión y radiación incidente, obteniendo eficiencias que oscilaron entre 8 % y 40 %.

Asimismo; López, Mantilla y Poveda (2012), junto al Grupo de Investigación en Energías Alternativas de la Universidad Distrital, desarrollaron un captador con materiales muy económicos: tubería de PVC, tanque de almacenamiento de plástico y cartón como aislante térmico. Este modelo fue comparado con otro, construido con materiales convencionales como vidrio templado y placa metálica. Los resultados mostraron una buena eficiencia para ambos captadores; sin embargo, la temperatura de salida del captador elaborado con material reciclado no superaba los 40 °C por lo que se recomendó

incrementar el área de captación cuando se opte por el uso de prototipos similares.

1.3. Estudio de captadores solares térmicos en Perú

Uno de los primeros estudios que evalúa el rendimiento de captadores solares en Perú estuvo a cargo del doctor Anibal Valera (2007). En su libro “Energía Solar II”, analiza los resultados de diversos ensayos comparativos entre captadores solares de placa plana con variantes en su diseño y construcción, a fin de evaluar el efecto de cada uno de estos parámetros en la eficiencia del sistema.

Valera (2007) comprueba el efecto sobre la eficiencia de: el material y espesor del absorbente, la técnica de adhesión entre el absorbente y las tuberías internas, la separación entre las tuberías internas, entre otros. En cuanto al material y espesor del absorbente, las mejores eficiencias fueron obtenidas con el uso de cobre y aluminio, también encontró que la eficiencia aumentaba con el espesor de la placa. Respecto a la técnica de adhesión, la mejor era la soldadura, ya que el entortolado reducía en un 9 % la eficiencia del primero y la adhesión mediante relleno metálico (pegamento) disminuía la eficiencia en un 3 %. También concluyó que se obtenía una mejor eficiencia con una menor separación entre las tuberías de la parrilla, recomendando una distancia de 8 cm. Finalmente, recomienda que, en ciudades como Lima (donde se llevó a cabo este estudio), se realice una limpieza de la superficie al menos con dos semanas de frecuencia; de lo contrario, el captador solo recibirá el 70 % de radiación disponible.

Por otro lado, en la región Arequipa, Montoya, Palo, Cabana y Soria (2011) realizaron la evaluación de un tipo de calentador solar comercializado en la zona (no se especifica marca y modelo) en base a las exigencias de la norma “NTP 399.400:2001 Colectores Solares. Método de ensayo para determinar la eficiencia de los colectores solares”. Se hicieron cinco pruebas en tres días de ensayo donde se obtuvo un factor de remoción de calor de 0.722; una eficiencia pico de 60.4 % y un coeficiente global de pérdidas de 19.92 W/m².°C. El estudio en mención es el principal antecedente de esta investigación.

2. Marco conceptual

En el presente subcapítulo se desarrolla la base teórica de este trabajo de investigación.

2.1. Energía del sol

El sol es un inmenso reactor nuclear de fusión que transforma 600 millones de toneladas de hidrógeno en 596 millones de toneladas de helio, cada segundo. En este proceso, se pierden 4 millones de toneladas de materia que se transforman en potencia irradiada al espacio, aproximadamente 3.7×10^{23} kW. De esta potencia, a nuestro planeta llegan aproximadamente 1.74×10^{14} kW, cantidad que equivale a 5000 veces el consumo energético de la población de la Tierra (Rufes M., 2012). El sol no actúa como un cuerpo negro radiante, sino

que la radiación solar emitida es resultado de las capas que lo componen, las cuales emiten y absorben radiación de diferentes longitudes de onda (Duffie y Beckman, 2013). A continuación, se detallan algunos conceptos que nos ayudan a estimar la radiación solar extraterrestre y su distribución espectral.

a. *El espectro solar*

La energía solar se transporta a través de ondas electromagnéticas con diferente frecuencia (número de veces que la onda se repite completamente por unidad de tiempo); esta se propaga en el vacío a una velocidad de 300 mil km/s.

La radiación solar incidente en la Tierra no llega únicamente bajo la forma de luz visible (47.3 %), también llega en forma de rayos infrarrojo (45.7 %) y ultravioleta (7 %). A esta distribución de la radiación emitida por el Sol, en función a su longitud y frecuencia de onda, se le conoce como espectro solar (Rufes M., 2012).

La zona visible abarca desde los 380 hasta los 780 nm de longitud de onda, la radiación infrarroja (IR) se extiende hasta longitudes de onda de 3000 nm aproximadamente, mientras que la radiación ultravioleta (UV) es aquella fracción con longitudes de onda por debajo de los 380 nm. La energía llega a la superficie terrestre casi en su totalidad como luz visible y radiación infrarroja.

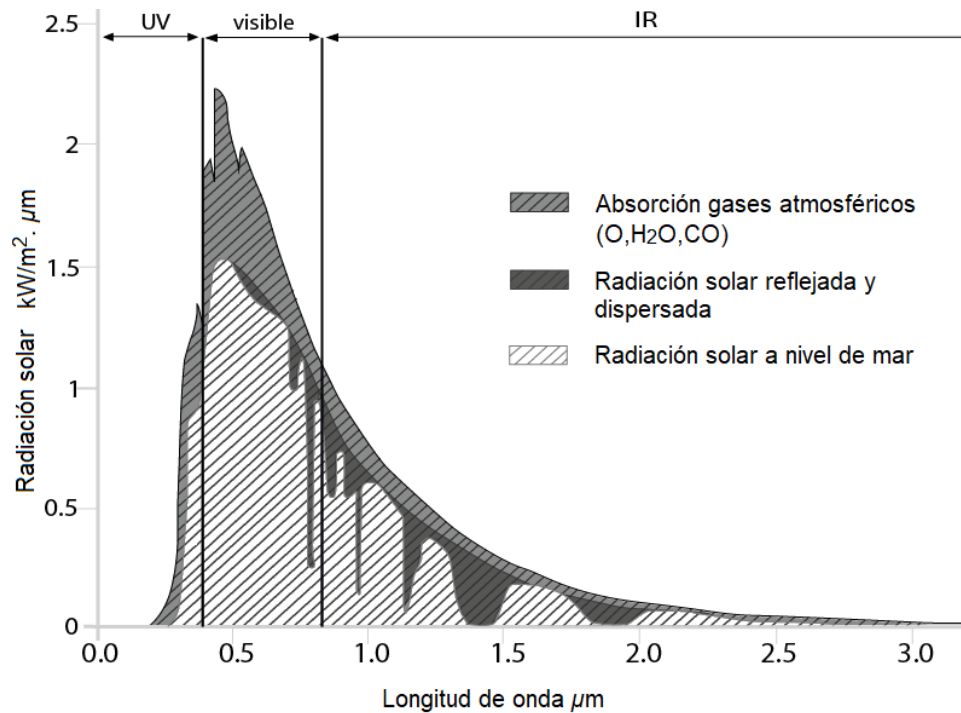


Figura 1. Espectro electromagnético e influencia de la atmósfera en la radiación solar.

Fuente: Rufes M. (2012). Energía Solar Térmica: Técnicas para su aprovechamiento.

b. *La Constante solar*

La constante solar es la potencia solar extraterrestre que incide de forma ortogonal sobre una unidad de superficie tangente a la capa externa de la atmósfera terrestre, cuando la Tierra está a una distancia media del Sol (Rufes M., 2012).

En la Figura 2 se representa de manera general las relaciones geométricas entre el Sol y la Tierra. La variación de la distancia entre el Sol y la Tierra es aproximadamente 1.7 % en el año, esto se debe a que la órbita terrestre tiene forma elíptica y no circular (Duffie y

Beckman, 2013). Se toma como distancia media Sol-Tierra el valor $1.495 \times 10^{11} \text{m}$.

En función del método de cálculo, sea por extrapolación o mediciones directas, se pueden obtener diferentes aproximaciones para la constante solar. El Centro Mundial de Radiación (WRC, por sus siglas en inglés) adopta un valor de 1367 W/m^2 (Duffie y Beckman, 2013), mientras que la NASA aceptó el valor standard para la constante solar propuesto por Thekaekara y Drummond (1971) de 1353 W/m^2 , equivalente a $5871 \text{ kJ/m}^2\text{h}$.

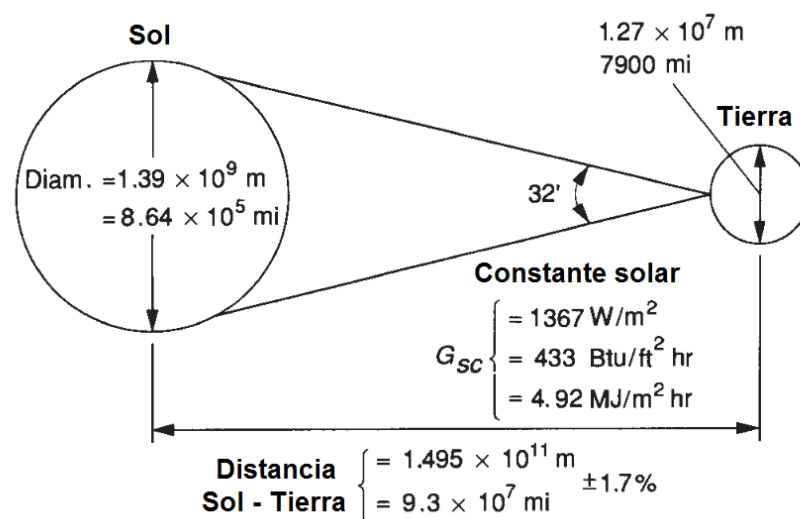


Figura 2. Constante solar y distancia Sol-Tierra.

Fuente: Duffie y Beckman (2013). Solar Engineering of Thermal Processes.

Desde luego, el valor real de la radiación solar extraterrestre es variable y viene dada por los siguientes factores: la variación en la radiación emitida por el Sol y la variación anual de la distancia entre Sol-Tierra. Se estima que radiación solar extraterrestre varía de 1321

a 1412 W/m^2 en promedio durante el año, tal y como se muestra en la Figura 3.

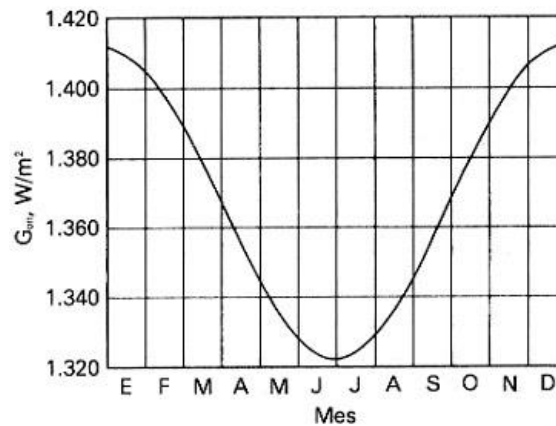


Figura 3. Variación anual de la radiación solar extraterrestre.

Fuente: Duffie y Beckman (2013). Solar Engineering of Thermal Processes.

Por otro lado, la radiación solar que incide en la superficie terrestre será siempre un valor menor a la radiación solar extraterrestre, ello debido a la dispersión y la absorción de las moléculas del aire, tales como el ozono y el vapor de agua; y a la dispersión y absorción de los aerosoles y otras sustancias emitidas por las actividades humanas (Valera P., 2007).

c. *Distribución de la energía solar en la Tierra*

La Tierra mantiene un rango de temperatura constante en su atmósfera y superficie, esto es posible gracias a una distribución compleja del flujo de energía que incide en nuestro planeta.

Para describir esta distribución partiremos del valor de la constante solar como la radiación solar extraterrestre recibida, el cual es de 1367

W/m^2 , este valor es el que incide en la superficie circular proyectada desde la cara terrestre que es irradiada, tal y como se aprecia en la Figura 4; por consiguiente, para calcular el flujo medio que incide por metro cuadrado de la superficie esférica exterior de la atmósfera se debe repartir el valor de la constante solar entre el área total de la envoltura terrestre. La potencia solar recibida es igual al valor de la constante solar multiplicado por el área circular ($\pi.R^2$), es decir, $1367.\pi.R^2$ vatios, donde “R” es el radio de la Tierra. Luego, este valor se divide entre la superficie esférica terrestre ($4.\pi.R^2$), obteniéndose como resultado un flujo medio aproximado de $342 W/m^2$, los cuales se distribuyen por el conjunto de la esfera, día y noche (Elías C. & Bordas A., 2012).

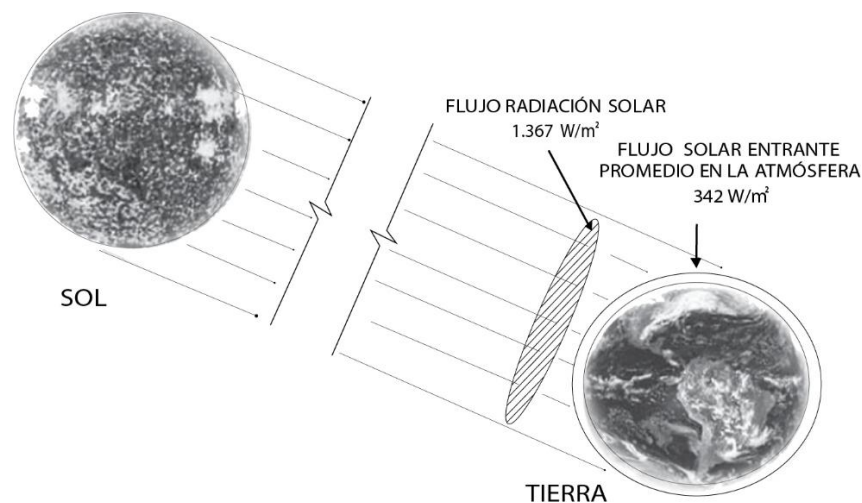


Figura 4. Radiación solar extraterrestre.

Fuente: Elías C. y Bordas A. (2012) . Energías renovables: Energía, Agua, Medioambiente, territorialidad y Sostenibilidad.

Del flujo solar distribuido (342 W/m^2), a la superficie terrestre llega directamente 98 W/m^2 y otros 100 W/m^2 provenientes de la dispersión causada por nubes y gases. De estos 198 W/m^2 , 30 W/m^2 son reflejados por la superficie terrestre hacia el espacio, quedando 168 W/m^2 absorbidos. La superficie terrestre emite radiación infrarroja, cuya longitud de onda es mayor que la de la radiación incidente por lo que una parte de esta radiación (324 W/m^2) queda retenida en la atmósfera gracias a la presencia de determinados gases, aumentando la temperatura media de la Tierra hasta los $14 \text{ }^\circ\text{C}$, a este fenómeno se conoce como efecto invernadero (Rufes M., 2012). En resumen, la superficie terrestre recibe 168 W/m^2 del Sol y 324 W/m^2 por efecto invernadero, un total de 492 W/m^2 , que es la misma cantidad que se emite por radiación, convección y evaporación a través del aire ($390+78+24 \text{ W/m}^2$) tal y como se puede apreciar en la Figura 5, manteniéndose un balance de energía y temperatura en la superficie y la atmósfera.

d. *El movimiento Tierra-Sol*

La cantidad de radiación solar que incide en un punto varía constantemente en función de su posición respecto al Sol. Para que una instalación pueda captar la máxima radiación solar posible, se debe tener en cuenta las dinámicas de movimiento entre el Sol y la Tierra.

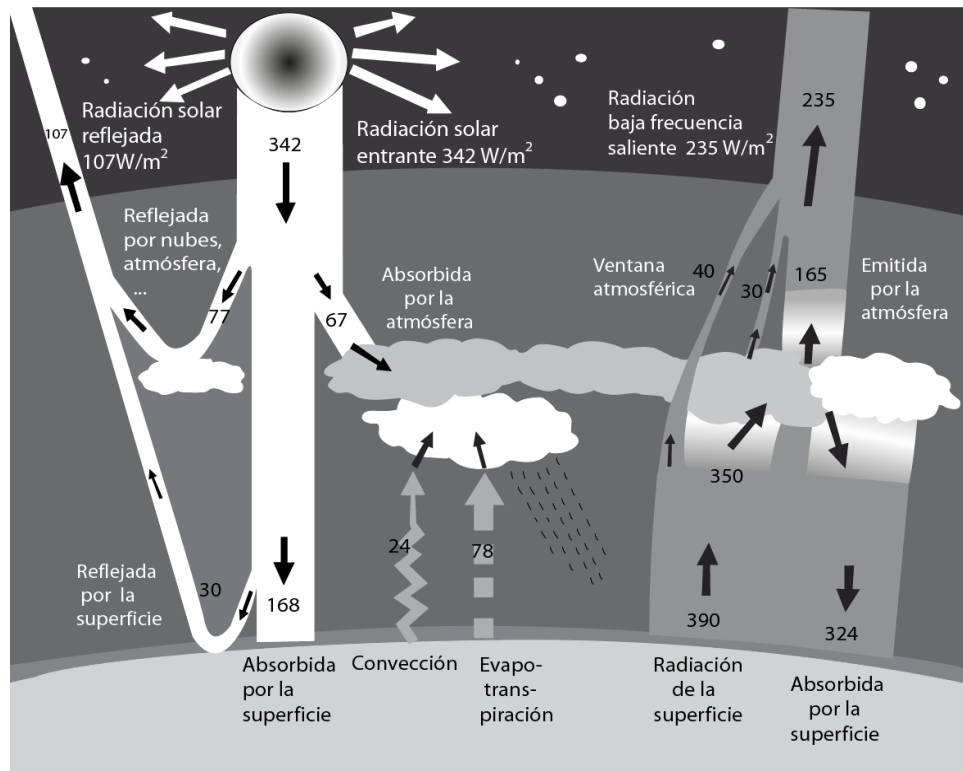


Figura 5. Flujo de energía entre el espacio y la atmósfera.

Fuente: Elías C. y Bordas A. (2012) . Energías renovables: Energía, Agua, Medioambiente, territorialidad y Sostenibilidad.

La Tierra se traslada siguiendo una órbita elíptica y ligeramente excéntrica alrededor del Sol, tardando un año en recorrerla.

Simultáneamente, la Tierra rota sobre su propio eje, formando un ángulo de $23^\circ 27'$ con la normal al plano de la eclíptica, tardando 24 horas en dar una vuelta.

Las posiciones relativas del Sol y la Tierra determinan las cuatro estaciones del año. En el mes de diciembre, el sol se encuentra por debajo del plano ecuatorial terrestre, iluminando preferentemente el hemisferio sur, alcanzando su distancia más cercana a esta parte del mundo el 22 de diciembre (solsticio de verano) mientras que el Polo

Norte queda ubicado en su posición más alejada de los rayos solares; en ese momento, todos los puntos de la superficie terrestre con latitudes superiores a 66.5° S tienen días de 24 horas, mientras que los puntos con latitudes superiores a 66.5° N tienen noches de 24 horas. En el solsticio de invierno (21 de junio), la situación es inversa. Asimismo, durante los equinoccios de primavera (21 de marzo) y otoño (22 de septiembre), los dos polos terrestres están a la misma distancia del sol y, por tanto, los días y las noches tienen igual duración (Rufes M., 2012).

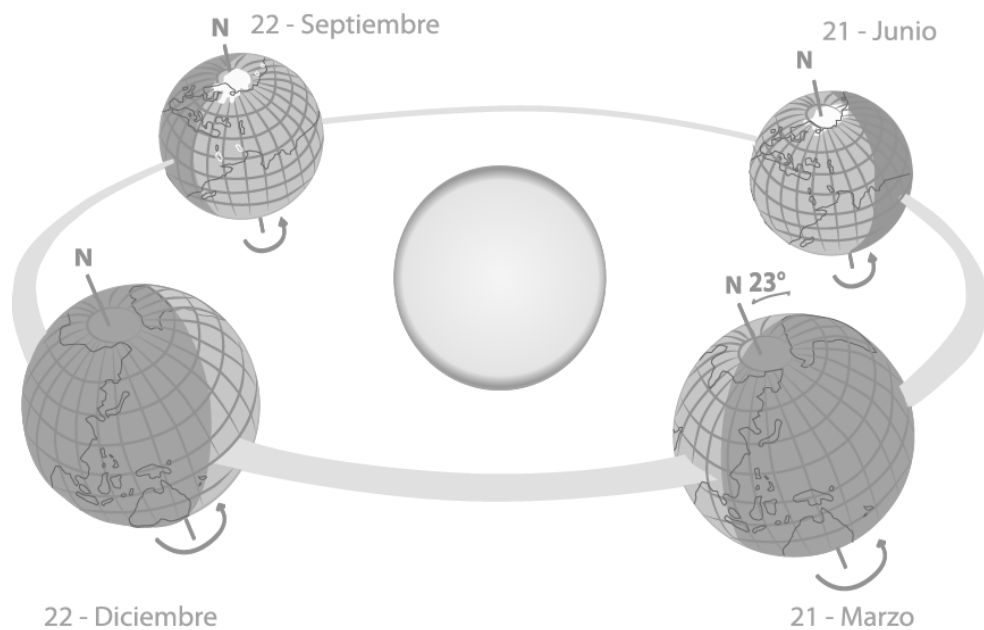


Figura 6. Movimiento Tierra-Sol.

Fuente: Rufes M. (2012) .Energía SolarTérmica: Técnicas para su Aprovechamiento.

e. *Geometría Solar*

Para la determinación de la radiación solar que incide en un captador, es necesario conocer las relaciones geométricas entre un punto de la superficie terrestre y la posición relativa del sol respecto a este plano.

- **Altura solar:** Es el ángulo formado por la línea Tierra - Sol y el plano horizontal que pasa por este punto.
- **Ángulo cenital:** Es el ángulo comprendido entre la vertical sobre un punto y la línea del sol.
- **Ángulo de inclinación:** Es el ángulo que forman el plano de la superficie captadora y la horizontal del punto considerado. La inclinación óptima de los captadores está relacionada con la latitud de la zona donde se instala el captador.
- **Ángulo de incidencia:** Es el ángulo formado por la radiación solar directa, es decir, la línea Sol - captador y la normal al plano de abertura.
- **Azimut solar:** Ángulo formado por la proyección de la perpendicular del plano del captador sobre el plano horizontal terrestre, respecto del sur geográfico (γ). Si el azimut es igual a 0° , implica que el sol se encuentra exactamente sobre el sur geográfico (coincidiendo con el mediodía solar). Se mide en sentido horario, es decir, su valor es positivo hacia el Oeste y negativo hacia el Este.
- **Declinación solar:** Ángulo variable que forman la línea recta entre el Sol y la Tierra con el plano del Ecuador, al mediodía solar (δ). Se representa mediante la ecuación:

$$\delta = 23.45 \times \sin\left(360 \times \frac{284 + n}{365}\right)$$

Donde "n" es el número de día en el año, por lo que su valor varía entre uno (día 01 de enero) y 365 (día 31 de diciembre).

- Latitud: Ángulo que forman la línea vertical proyectada desde el punto referenciado y el plano del Ecuador (ϕ). Su rango de valores se encuentra entre -90° (latitud sur) y $+90^\circ$ (latitud norte).
- Longitud: Arco del ecuador delimitado por el meridiano de un punto geográfico y el meridiano de Greenwich.

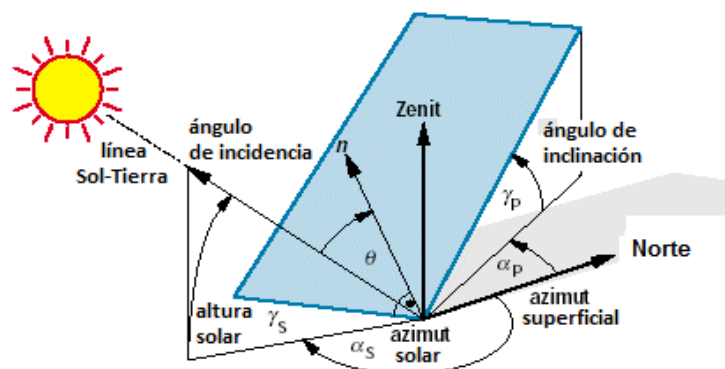


Figura 7. Esquema de ángulos solares.

Fuente: Volker Quaschnig (2003). Renewable Energy World. Obtenido de: <http://www.volker-quaschnig.de/articles/fundamentals1>

f. Componentes de la radiación solar

La radiación solar experimenta distintos fenómenos físicos en su recorrido hacia la superficie terrestre, debido a la composición y contenido de la atmósfera. En función a los fenómenos mencionados,

un objeto situado en la superficie terrestre recibe tres tipos de radiación:

- Radiación directa: Aquella fracción de la radiación que alcanza la superficie terrestre sin ser desviada por ningún elemento en su trayectoria.
- Radiación difusa: Aquella que llega a la superficie luego de haber cambiado su dirección varias veces gracias a la presencia de partículas en la atmósfera, por lo que se hace más relevante en condiciones de alta nubosidad.
- Radiación reflejada: Parte de la radiación que es reflejada por la superficie terrestre y que puede ser reabsorbida por otros objetos. El cociente entre la radiación reflejada y la radiación incidente es denominado “albedo”.

En días despejados, la fracción de radiación directa será mucho mayor que la difusa, por ello es importante conocer el clima de la zona. La radiación difusa puede constituir hasta el 15% de la radiación total en días con cielo despejado, como es frecuente en el distrito Omas, donde se llevó a cabo esta investigación; por el contrario; en días nublados, la radiación difusa puede representar hasta el 95%, caso recurrente en Lima (AVEN, 2008).

g. *Uso de la energía solar*

En función a la forma de aprovechamiento de la energía solar, esta se clasifica como:

- Energía Solar pasiva: El principio de la energía solar pasiva es utilizar la energía sin necesidad de mover ningún elemento, solo aprovechando el proceso natural, es así que en esta aplicación se consideran los diseños de arquitectura bioclimática, teniéndose en cuenta factores como ganancia solar, distribución del calor e iluminación natural (Elías C. & Bordas A., 2012).
- Energía Solar activa: Con el objetivo de aprovechar al máximo la radiación solar para producir energía térmica y calentar el fluido requerido (aire o agua), los sistemas activos recurren al uso de equipos especializados para captar y distribuir el calor, llamados captadores solares térmicos; a su vez disponen de equipos eléctricos, electrónicos y mecánicos para trasladar correctamente el fluido caloportador desde los captadores solares hasta los puntos de acumulación y consumo (Díaz V., 2015).

h. *Energía Solar térmica y sus aplicaciones*

La energía solar térmica, también consiste en el aprovechamiento del calor obtenido por la energía del sol a través de módulos captadores o concentradores de la radiación, para ser utilizado en procesos de calefacción, refrigeración o calentamiento de agua, a nivel doméstico o industrial.

Las aplicaciones de la energía solar térmicas se pueden clasificar en función de la temperatura de fluido que se pretenda conseguir:

- Energía solar de baja temperatura (35 - 150 °C): Destinada a aquellas aplicaciones domésticas tales como calefacción de viviendas, producción de Agua Caliente Sanitaria (ACS), climatización de piscinas y refrigeración por absorción. Los captadores solares planos son los más usados para esta aplicación.
- Energía solar de media temperatura (150 - 400 °C): En este nivel de trabajo las aplicaciones tienen un fin principalmente industrial, para el sector alimentación, sector papelerero, sector automotriz o bien para la generación de energía eléctrica, precisando para ello una ratio de concentración baja-media. Este intervalo de temperatura se alcanza con captadores de tubos de vacío o cilindro parabólicos y reflectores lineales de Fresnel (Díaz V., 2015).
- Energía solar de alta temperatura (400 - 2000 °C): Se busca llegar a estas temperaturas mayormente para la producción de energía eléctrica (solar termoeléctrica). Su mecanismo consiste en concentrar la radiación solar sobre el foco de un receptor por el cual trasiega un fluido caloportador, que puede ser agua, aire o fluidos orgánicos sintéticos (Díaz V., 2015). El calor ganado por el fluido caloportador se almacena luego en un tanque que contiene una mezcla inorgánica de sales fundidas a base de nitrato sódico y nitrato potásico, considerada esta como la alternativa tecnológica

más madura para este fin (García, 2012). Otros usos posibles comprenden necesidades muy específicas de calor, como producción de hidrógeno o fundición de materiales.

2.2. Captador solar térmico

a. Definición

Es un dispositivo que transforma la radiación solar captada en energía calorífica. El calor ganado se transfiere a través de un fluido líquido o gaseoso, actuando como un intercambiador de calor (Barriga et al., 2014).

La característica principal que identifica la calidad de un captador solar es su eficiencia, entendida como la capacidad de conversión de la energía solar incidente en energía térmica útil (Roldán, 2013).

b. Tipos de captadores solares térmicos según su diseño

Los captadores pueden agruparse en tres grupos: planos, tubulares de vacío y de concentración, a su vez los planos pueden dividirse en planos con cubierta y sin cubierta. A continuación, se describe cada tipo de captador.

- Captador plano con cubierta: Su funcionamiento está basado principalmente en el efecto invernadero. Están formados por

un conjunto de tubos soldados a una superficie metálica recubierta de una placa absorbente de la luz solar, al interior de estos tubos circula el agua que va a calentarse. El conjunto está dentro de una caja metálica que contiene un aislante térmico y está cubierto en la cara que da al sol por una lámina de vidrio. En funcionamiento normal puede alcanzar temperaturas alrededor de los 50 °C (Jutglar y Galán, 2012).

- Captador plano sin cubierta: Este tipo de captador se caracteriza por tener como único componente a la placa absorbente, en consecuencia, su precio se reduce frente a las otras opciones tecnológicas y así como su dificultad de montaje. Debido a la falta de aislamiento, este captador presenta un rendimiento global inferior a otros tipos de captadores. Cabe señalar, respecto a su aplicación, que “estos sistemas proporcionan saltos térmicos pequeños por lo que su uso más extendido es el calentamiento de piscinas al aire libre” (AVEN, 2008, p.31).
- Captadores tubulares de vacío: Este tipo de captador se compone de varios tubos de vidrio conectados en paralelo, en este sistema el elemento absorbente se encuentra al interior de dichos tubos. La función aislante la cumple el espacio entre el absorbente y el vidrio, donde se ha aplicado el vacío del aire, reduciendo así la pérdida de calor por convección, considerada nula cuando la presión al interior del captador es menor que 10^{-2} bares; por otro lado, “las pérdidas por radiación

no disminuyen ya que éstas no dependen de un medio físico para su propagación” (AVEN, 2008, p.32). Estos sistemas alcanzan rendimientos superiores a los que presentan los captadores planos, especialmente con temperaturas de trabajo elevadas, presentando valores de coeficiente óptico normalmente entre 0.6 y 0.8.

- Captador cilindro parabólico: Al igual que en el caso anterior, el tubo metálico que conduce el agua está al interior de un tubo de cristal al que se le ha practicado el vacío sólo que este se encuentra situado en el eje óptico de un espejo cilindro parabólico orientable de grandes dimensiones. Dado que la concentración es muy elevada y el aislamiento térmico también pueden alcanzarse temperaturas alrededor de los 350 °C que permite obtener vapor de agua (Jutglar & Galán, 2012).
- Captador parabólico: El espejo concentrador es un elipsoide de revolución y el receptor de calor se sitúa en su foco. El conjunto se orienta hacia el Sol según dos ejes de giro, el grado de concentración es muy elevado y permite alcanzar temperaturas mayores a los 400 °C (Jutglar & Galán, 2012).

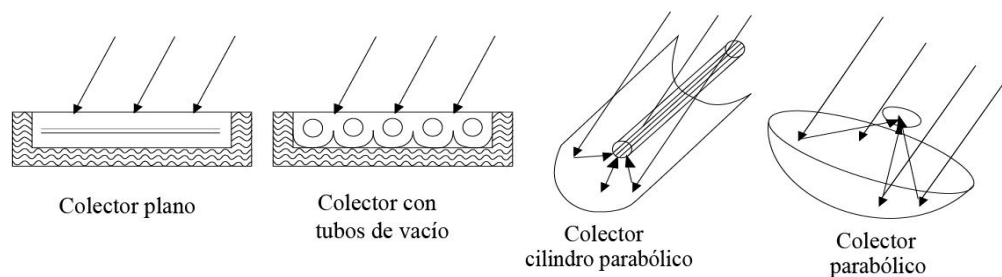


Figura 8. Principales tipos de captadores solares térmicos.

Fuente: Jutglar y Galán (2012). Termotecnia.

2.3. Captador solar térmico plano con cubierta

a. Definición

El captador solar térmico plano convierte la energía luminosa recibida en calor, transfiriéndola hacia el fluido caloportador, en este caso agua. El líquido lleva el calor hacia un tanque de almacenamiento o a un intercambiador, aplicándose más adelante en el proceso donde se requiera esta energía térmica (Paz, 2006). En el siguiente apartado se detallan los aspectos más importantes sobre este tipo de captadores.

b. Principios físicos del captador solar térmico plano

El captador solar plano funciona a partir de los siguientes principios físicos:

- Efecto Invernadero: La radiación solar incidente es parcialmente absorbida por los cuerpos, el resto es reflejada o los atraviesa. Una vez que la radiación incidente atraviesa la cubierta del captador, que constituye un cuerpo transparente, los fotones impactan en la placa absorbente y esta se calienta. Como la temperatura alcanzada es baja, la placa emite radiaciones entre 4.5 y 7.2 μm de longitud de onda, en este rango dicha radiación no puede atravesar el vidrio y es reflejada hacia el interior, creando lo que se denomina el

efecto invernadero. Algunos plásticos como el policarbonato tienen un comportamiento similar al cristal, pero no se utilizan por ser poco resistentes a la radiación ultravioleta y la erosión. El material más utilizado es el vidrio de bajo contenido en hierro (mejor transmitancia); además, debe estar templado para dotarle de una mayor resistencia y capacidad de soportar elevadas temperaturas (Visiedo, 2010).

- **Cuerpo transparente:** Los cuerpos transparentes, como el vidrio y los plásticos, son aquellos que dejan pasar la mayor parte de la radiación. El vidrio y el plástico son cuerpos transparentes para radiaciones entre 0.3 y 3 μm de longitud de onda y dado que la mayoría de la radiación solar está comprendida entre los 0.3 y 2.4 μm , estos materiales dejan pasar muy bien la luz solar, por tal razón la cubierta de un captador debe ser siempre un cuerpo transparente.
- **Cuerpo negro (absorbente):** El concepto de cuerpo negro describe una superficie ideal que es capaz de absorber toda la radiación que incide sobre él (Incropera & DeWitt, 1999). En el contexto de un CSTP, la función de cuerpo negro recae sobre la placa absorbente, que recibe la radiación que atravesó la cubierta transparente y es capaz de transformarla en calor, para luego transferirla hacia el fluido caloportador de inmediato. Si la superficie del absorbente es negra y de textura mate captará mejor la energía que si fuera cualquier otro color. Para aprovechar este principio, los fabricantes de captadores

oscurecen la placa absorbente de sus modelos aplicando tratamientos selectivos o pinturas calóricas; sin embargo, este proceso tiene un coste elevado y el incremento del rendimiento anual gracias a este tratamiento no siempre lo compensa (Visiedo, 2010).

- Aislamiento: Componente utilizado para reducir las pérdidas térmicas del equipo hacia el exterior. Está formado por un revestimiento interno de la caja contenedora o carcasa y se emplean normalmente espumas sintéticas (poliuretano, poliestireno, etc.) o fibra de vidrio. Respecto a la ubicación del aislamiento, este “se coloca en las caras laterales y en el fondo de la carcasa disminuyendo así las pérdidas de calor por conducción” (AVEN, 2008, p.31).

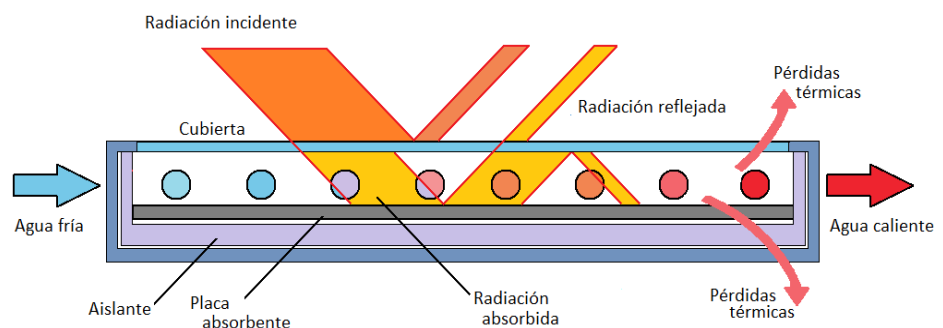


Figura 9. Efecto invernadero en un captador solar.

c. Componentes de un captador solar plano

- Absorbente: Consta de una placa adherida a un circuito hidráulico, a través del cual se movilizará el fluido caloportador. Es el elemento principal del captador solar, puesto que en él se lleva a cabo la conversión de la energía

radiante en energía térmica. Las características ópticas del elemento absorbente, “vienen definidas tanto por el tipo, forma y materiales del absorbente como por el tratamiento exterior” (AVEN, 2008, p.30).

- Cubierta transparente: Este componente permite el ingreso de la radiación incidente al sistema, retiene el calor y protege al captador de su entorno. La Agencia Valenciana de la Energía - AVEN (2008) indica que:

El material que conforma la cubierta tiene que cumplir las siguientes características:

- o Buena transmisión solar en la banda de radiación de onda corta y opacidad a la radiación térmica de onda larga para evitar las pérdidas de calor.
- o Estabilidad en el tiempo.
- o Coeficiente bajo de conductividad térmica para disminuir las pérdidas térmicas.
- o Baja adherencia a la suciedad.
- o Coeficiente bajo de dilatación en el rango de temperaturas de trabajo del colector (p. 30).

El material preferido para la cubierta de un captador es el vidrio templado por los aspectos mencionados y por su resistencia, necesaria por encontrarse expuesto al ambiente.

- Aislante térmico: Cumple la función de minimizar las pérdidas de calor del sistema. Sobre las características de los aislantes, Incropera y DeWitt (1999) indican que estos “se componen de

materiales de baja conductividad térmica combinados para lograr un sistema de conductividad térmica aún más baja”, de este modo, la conductividad térmica efectiva del sistema dependerá de la conductividad de los materiales y de la fracción volumétrica del aire o vacío. En la Tabla 1 se describe los materiales aislantes más usados en la construcción de captadores.

Tabla 1: Aislantes térmicos más utilizados

Material aislante	Conductividad térmica (W/m.°K)	Temperatura máxima de utilización (°C)	Observaciones
Lana de vidrio	0.05	150	Pierde propiedades con la humedad
Lana de roca	0.05	150	Pierde propiedades con la humedad
Espuma de vidrio	0.057	150	No le afecta la humedad
Corcho prensado	0.052	110	Material orgánico estabilizado
Poliestireno	0.042	85	Disponible en planchas modeladas
Poliuretano	0.027	110	Disponible en espumas expansivas

Fuente: Visiedo (2010). Diseño y construcción de un equipo de experimentación en energía solar térmica.

- Caja o carcasa: Es el elemento que contiene todos los componentes del captador solar térmico. En su diseño “se debe tener en cuenta la resistencia mecánica necesaria para las condiciones de uso y de montaje” (AVEN, 2008, p. 31). Asimismo, debe mostrarse hermética y resistente a los efectos de intemperie y la corrosión. Algunos materiales usados para

su construcción son: acero galvanizado o inoxidable, aluminio, plástico y fibra de vidrio (FUNIBER, 2012).

- Circuito hidráulico del captador: Pueden ser de dos tipos:
 - o Circuito en forma de parrilla: El circuito hidráulico está constituido por tuberías paralelas y dos tubos colectores, suelen presentar pérdidas de carga pequeña y por ello son los más utilizados en sistemas termosifón. En esta distribución existe la posibilidad de montar los captadores de forma longitudinal o transversal, como se observa en la Figura 10.
 - o Circuito en serpentin: Está constituido por una sola tubería que recorre el captador, su ventaja es que no hay problemas de desequilibrio hidráulico (que suelen darse cuando hay conexiones de tuberías con diferente tamaño) ya que el fluido de trabajo recorre un solo conducto, sin embargo, la pérdida de carga es mayor que en la distribución en parrilla para un mismo régimen de caudal (Martínez, Noceto, & Suárez, 2013).

La distancia de separación entre tuberías paralelas resulta del cálculo de la optimización de transmisión del calor a la placa absorbente, y suele ser de 10 a 12 cm (ECA Instituto de Tecnología y Formación, 2008).

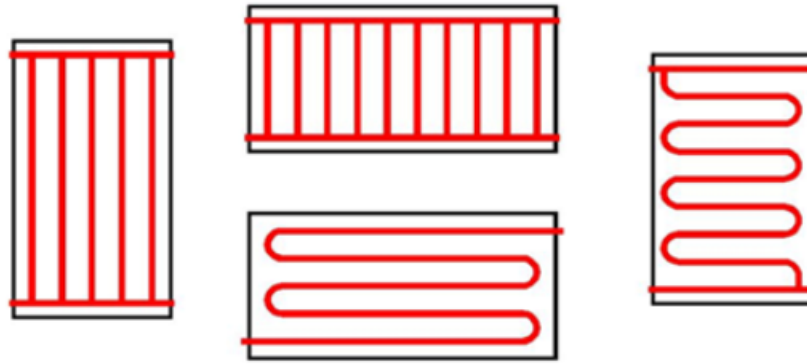


Figura 10. Colectores con circuito hidráulico de tipo parrilla y de serpiente, en vertical y horizontal.

Fuente: Martínez, Noceto y Rodríguez (2013). Manual Técnico de Energía Solar Térmica. Volumen II: Aspectos técnicos y normativos

d. Instalaciones solares térmicas según su circulación

- Instalaciones con circulación natural o termosifón: La circulación en este sistema se basa en el cambio de la densidad del agua en función de su temperatura. El agua caliente pesa menos que el agua fría lo que permite transportar de una manera natural cierto volumen de agua desde un recipiente caliente (colector) hacia un reservorio apropiado (Valera P., 2007). El agua ingresa al captador por la zona inferior, luego se calienta debido a la incidencia de la radiación solar en el sistema, hecho que disminuye la densidad del fluido y provoca su movimiento ascendente hacia la salida superior del captador y al interior del acumulador, donde entrega el calor absorbido. De esta manera, la diferencia de temperatura entre acumulador y

captador influye directamente en la velocidad de circulación (Rufes, 2012).

- Instalaciones con circulación forzada: En este tipo de sistemas el fluido caloportador es movilizado por la fuerza de empuje de una bomba, la cual se ubica normalmente en el tramo frío del circuito, entre el acumulador y los captadores. Su uso es recomendado para aplicaciones que requieren generar volúmenes grandes de agua caliente y/o temperaturas más altas (Rufes, 2012).

2.4. Evaluación de rendimiento térmico

a. Balance Energético de un captador solar térmico plano

La radiación solar incidente en la superficie del captador (G_0) no ingresa en su totalidad al sistema, pues parte de ella es reflejada por la cubierta transparente (G_1); de igual manera, la superficie selectiva de la placa absorbente refleja una pequeña parte de la luz (G_2) en forma de calor disperso, fracción de energía que no es absorbida.

Parte del calor absorbido se pierde por efecto de la conductividad térmica de los materiales del captador (Q_1), sin embargo, esta puede minimizarse en función de los materiales aislantes que se utilicen. Otra parte se pierde por radiación y convección propia de la cara interna de la cubierta transparente (Q_2).

Finalmente, de la irradiancia solar (G_0), debido a las pérdidas ópticas (G_1 y G_2) y térmicas (Q_1 y Q_2), sólo la fracción remanente (Q) es el

calor útil (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2010). Los flujos de energía que tienen lugar en el captador se muestran en la Figura 11.

Teniendo en cuenta lo ya mencionado, el balance energético puede resumirse en la siguiente fórmula:

$$G_0 = G_1 + G_2 + Q_1 + Q_2 + Q \quad (1)$$

Por lo tanto, si queremos saber la eficiencia (η) de un captador solar, esta será la fracción útil (Q) de la irradiancia solar total.

$$\eta = Q/G_0 \quad (2)$$

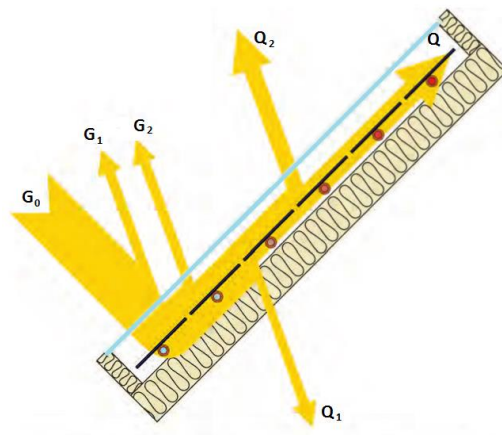


Figura 11. Flujos de energía a través de un captador.

Fuente: Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie (2010).

b. Eficiencia instantánea de un captador solar plano con cubierta

Como se ha mencionado la eficiencia térmica es el cociente entre el calor útil y la irradiancia solar incidente. El calor útil se puede definir

como la diferencia entre la irradiancia solar total y las pérdidas ópticas y térmicas:

$$G_0 - (G_1 + G_2) - (Q_1 + Q_2) = Q \quad (3)$$

La irradiancia solar disponible (G_A) se define como la diferencia entre la irradiancia solar incidente (G_0) y las pérdidas ópticas ($G_1 + G_2$). Este valor está en función de las propiedades de transmitancia (τ) de la cubierta del captador y la absortancia (α) de su placa absorbente:

$$G_0 - (G_1 + G_2) = G_A = G_0 \times \tau \times \alpha \quad (4)$$

El valor de la irradiancia solar incidente viene dado en la práctica por el área bruta del colector (A) y la irradiancia solar hemisférica (G):

$$G_0 = G \times A \quad (5)$$

Por lo tanto, reemplazando la ecuación (5) en la ecuación (4), tenemos:

$$G_0 - (G_1 + G_2) = G_A = G \times A \times \tau \times \alpha \quad (6)$$

Las pérdidas térmicas (Q_1 y Q_2) se encuentran en función de la temperatura de la placa (T_p), la temperatura ambiental o temperatura del aire circundante (T_a) y el factor de pérdidas (U_L) del captador:

$$Q_1 + Q_2 = A \times U_L(T_p - T_a) \quad (7)$$

Reemplazando las ecuaciones (6) y (7) en la ecuación (3) se obtiene:

$$(G \times A \times \tau \times \alpha) - A \times U_L(T_p - T_a) = Q \quad (8)$$

Debido a que la temperatura de la placa es difícil de medir, se suele tomar la temperatura de entrada del fluido caloportador (T_e), al hacer

esto se debe añadir otro coeficiente a la fórmula: el factor de rendimiento (F_R), que corrige la diferencia entre T_p y T_e para disminuir el error:

$$Q = (F_R \times G \times A \times \tau \times \alpha) - F_R \times A \times U_L(T_e - T_a) \quad (9)$$

Simplificando la ecuación (9) se obtiene la ecuación del calor útil del captador:

$$Q = F_R \cdot A \cdot [G(\tau \cdot \alpha) - U_L(T_e - T_a)] \quad (10)$$

Para obtener la eficiencia térmica del captador solar, reemplazamos la ecuación (10) y (5) en la ecuación (2):

$$\eta = \frac{F_R \cdot A \cdot [G(\tau \cdot \alpha) - U_L(T_e - T_a)]}{G \times A} \quad (11)$$

Finalmente, resolviendo la ecuación (11), se obtiene la denominada ecuación de rendimiento térmico:

$$\eta = F_R(\tau \cdot \alpha) - F_R \cdot U_L \left(\frac{T_e - T_a}{G} \right) \quad (12)$$

c. Curva de eficiencia y modelos de ajuste

Se conoce como curva de eficiencia a la gráfica que representa los valores de eficiencia térmica instantánea que alcanza el captador solar, para fines de esta investigación se le denominará por el término "eficiencia instantánea". Este valor es representado por el símbolo (η) como una función de $[(T_e - T_a)/G]$. Los valores que conforman la curva de eficiencia son obtenidos a través de un ensayo conforme a la normativa técnica aplicable, bajo condiciones estables de radiación

solar, velocidad de viento, caudal de fluido, temperatura del aire circundante y temperaturas del fluido a la entrada y salida.

Las curvas de eficiencia constituyen una herramienta para comparar distintos captadores y “han de ser facilitadas por el fabricante y de su estudio puede deducirse la calidad de un captador desde el punto de vista térmico” (De Felipe y López, 1999, p.21). El desempeño de un captador se considera mejor cuanto mayor sea el valor de su eficiencia pico y menor sea su pendiente. Según las variables consideradas, la ecuación que describe la curva de eficiencia puede ser representada en forma lineal o cuadrática.

- Modelo lineal: Para un caudal determinado, suponiendo valores constantes de $(\tau. \alpha)$ y de (U_L) , la ecuación (12) representa una recta en la que $F_R(\tau. \alpha)$ es la ordenada en el origen (eficiencia óptica o pico) y $(F_R. U_L)$ es la pendiente (m_1) de la recta (De Felipe & López, 1999).

$$\eta = F_R(\tau. \alpha) - m_1 \left(\frac{T_e - T_a}{G} \right) \quad (13)$$

- Modelo cuadrático: Para las ecuaciones (12) y (13), se asume que el producto $(F_R. U_L)$ es constante (m_1); pero en realidad, el factor de pérdidas constituye una función de la temperatura del captador y la temperatura del aire circundante (Brunold, Frey, & Frei, 1994). Si se introduce el coeficiente de pérdidas como una función variable y añadimos el error experimental en el modelo, la ecuación de rendimiento tomaría la siguiente forma cuadrática:

$$\eta = F_R(\tau \cdot \alpha) - C_1 \left(\frac{T_e - T_a}{G} \right) - C_2 \cdot G \cdot \left(\frac{T_e - T_a}{G} \right)^2 + \varepsilon \quad (14)$$

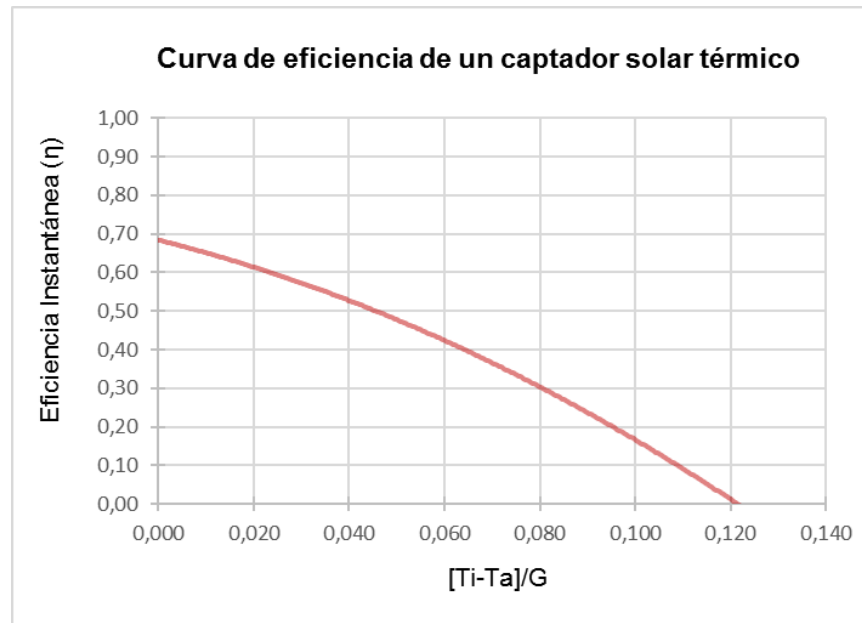


Figura 12. Curva de eficiencia.

3. Marco temporal

La presente investigación se desarrolló de enero del 2015 a diciembre del 2015, en cuatro fases:

- i) Elaboración del proyecto (enero – marzo),
- ii) Construcción del captador (mayo - junio),
- iii) Implementación del diseño experimental con ensayos preliminares (julio - octubre).
- iv) Evaluación del rendimiento (noviembre - diciembre).

4. Marco normativo

La normativa nacional referente a energía solar está dirigida, básicamente, al uso de la energía solar fotovoltaica para electrificación; sin embargo, sí existen normas técnicas que validan algunos procedimientos para evaluar la eficiencia de un captador solar térmico.

4.1. Normas técnicas

a. *Norma Técnica Peruana NTP 399.400:2001 Colectores*

Solares. Método de ensayo para determinar la eficiencia de los colectores solares

Esta Norma fue elaborada por el Comité Técnico de Normalización de Uso Racional de Energía y Eficiencia Energética y establece los métodos de prueba para determinar el comportamiento térmico de captadores de energía solar que usan fluidos de una sola fase y no tienen almacenamiento de energía interior significativo. Tiene como antecedente a la norma ANSI/ASHRAE 109:1986 (RA 91) y presenta cambios editoriales, referidos principalmente a terminología empleada propia del idioma español (INDECOPI, 2001). Es la norma técnica vigente en el Perú, y sobre la cual se ha elaborado la metodología de esta investigación.

b. Norma UNE-EN ISO 9806:2013 Energía solar. Captadores solares térmicos. Métodos de ensayo

La Norma UNE-EN ISO 9806:2013 es la versión española de la Norma ISO 9806:2013, elaborada por el Comité Técnico ISO/TC Energía Solar y adoptada como Norma Europea EN ISO 9806 por el Comité Técnico CEN/TC 312 Sistemas solares térmicos y sus componentes. Esta norma define los procedimientos para ensayar captadores solares para calentamiento de fluidos, evaluar su rendimiento, fiabilidad, durabilidad y seguridad en condiciones bien definidas. Esta norma incluye los ensayos que deben ser aplicados para los siguientes tipos de captadores: captadores de concentración con seguimiento, captadores de placa plana con cubierta y sin cubierta, captadores tubulares de vacío y captadores de calentamiento de aire. La terminología utilizada en este documento respeta en su totalidad la establecida por esta norma.

III. OBJETIVOS

A continuación, se formulan los objetivos de esta investigación.

1. Objetivo general

- Diseñar y evaluar un prototipo de captador solar térmico plano con absorbente de acero laminado en frío (CSTP de acero LAF).

2. Objetivos específicos

- Evaluar el rendimiento del prototipo propuesto de CSTP a través de la determinación de la ecuación de eficiencia instantánea.
- Calcular el costo de producción y estimar el precio de venta de este prototipo.
- Comparar el prototipo de CSTP propuesto con la oferta local en términos de rendimiento y precio.

V. METODOLOGÍA

En este capítulo, se describe la metodología establecida, en términos de métodos y materiales, que permitieron alcanzar los objetivos de este trabajo de investigación.

1. Métodos

En el presente apartado, se detalla la secuencia de procedimientos que se definieron para alcanzar los objetivos que esta investigación se planteó.

1.1. *Construcción del captador*

El diseño del prototipo propuesto de captador solar térmico plano (CSTP) mantuvo la mayoría de las especificaciones técnicas propias de un modelo comercial. En cuanto al área total, los captadores solares existentes en el mercado nacional, tal y como en los modelos MAGNUM y BLUE de la empresa Termoinox, vienen en presentaciones de 1.5; 1.8 y 2.0 m² de superficie (Termoinox, 2018); asimismo, Montoya et al. (2011), en la investigación que se mencionó anteriormente en el subcapítulo *Antecedentes*, indican que han aplicado el ensayo de eficiencia a un “*tipo de calentador solar comercializado en la región Arequipa*”, cuya valor de área total es de 1.8 m². Por lo expuesto y a fin de comparar adecuadamente el prototipo de CSTP de acero LAF con modelos investigados y

comercializados en Perú, se decidió construir en base a las dimensiones de la presentación de 1.8 m² de área total. (El prototipo, además, consta de una cubierta de vidrio templado, tubería interna de cobre y absorbente de acero LAF (El detalle de las especificaciones se muestran en la Tabla 2). A continuación, se procede a describir el proceso de construcción del captador:

- En primer lugar, se consolidó la estructura en parrilla de la tubería hidráulica de cobre. Para ello, se soldó 9 tubos de 3/8", de forma paralela, en dos tubos colectores de 1/2", de forma perpendicular a los tubos de 3/8", tal y como se aprecia en la Figura 13.
- La carcasa del captador se elaboró a base de perfiles de aluminio y una cara posterior de acero galvanizado de 0.98 x 1.78 m. (ver figura 14). Además, en cada uno de los 4 perfiles laterales, se insertó un perfil interior a 6 mm debajo del borde superior, el cual funge como riel de soporte para el vidrio templado.
- Se tornaron los enlaces reductores de cobre, para luego ser soldados a la entrada y salida de la parrilla. Se sellaron los extremos sin conexión con tapones termoresistentes y silicona líquida, para luego, dar paso a una prueba de presión, a fin de prevenir fugas en la estructura.
- Se añadió una capa de aislante termoacústico a las paredes internas de la carcasa con silicona líquida, el espesor de esta capa debe ser de 4 cm en la cara posterior y de 2 cm en las paredes laterales (ver Figura 15).

- Se pintó de color negro mate la estructura de parrilla, las capas de aislante y la plancha de acero LAF de 0.95 x 1.75 m, cada una por separado. Luego, se unieron la parrilla de cobre y el absorbente mediante amarres, utilizando alambres de acero (ver Figura 16).
- Se perforaron orificios en la carcasa para la inserción de las conexiones de entrada y salida, luego se insertó la estructura parrilla - absorbente en el interior de la carcasa, una vez colocada, se añadió una capa de pintura final al interior del captador. El espacio vacío entre los orificios de la carcasa y la tubería de cobre fueron cubiertos con jebes herméticos adheridos con silicona, para evitar la condensación interna por humedad (ver Figura 17).
- Finalmente, se colocó el vidrio templado de 1.8 m², cubriendo los bordes con silicona, para que se adhieran a los perfiles y rieles internos de la carcasa. se cerró el captador con el perfil lateral restante y se instaló sobre un soporte de fierro con inclinación de 23° (ver Figura 18).

Tabla 2. Especificaciones técnicas del captador solar

Especificaciones del captador	
Área Bruta del captador (m ²)	1.80

Especificaciones del captador	
Largo de captador (m)	1.80
Ancho de captador (m)	1.00
Material de caja o carcasa	Aluminio
Material de cubierta transparente	Vidrio templado
Espesor de vidrio (mm)	6.00
Material de circuito hidráulico del captador	Cobre (tipo M)
Distribución del circuito hidráulico	Parrilla vertical
Diámetro de tubos ascendentes(pulgadas)	3/8
Diámetro de tubos colectores (pulgadas)	1/2
Espesor de tubos ascendentes(mm)	3.2
Cantidad de tubos ascendentes en el captador	9
Distancia entre tubos ascendentes(mm)	100.00
Material de placa absorbente	Acero negro LAF
Espesor de placa absorbente (mm)	0.6
Tipo de unión tubos colectores – placa absorbente	Amarres, con alambre de cobre
Material del aislante térmico	Lana de Poliester
Espesor lateral de aislante (mm)	20.00
Espesor vertical de aislante (mm)	40.00
Distancia entre cubierta y placa absorbente (mm)	32.2



Figura 13. Parrilla de cobre y carcasa de aluminio



Figura 14. Carcasa de aluminio del captador



Figura 15. Colocación de aislante termoacústico

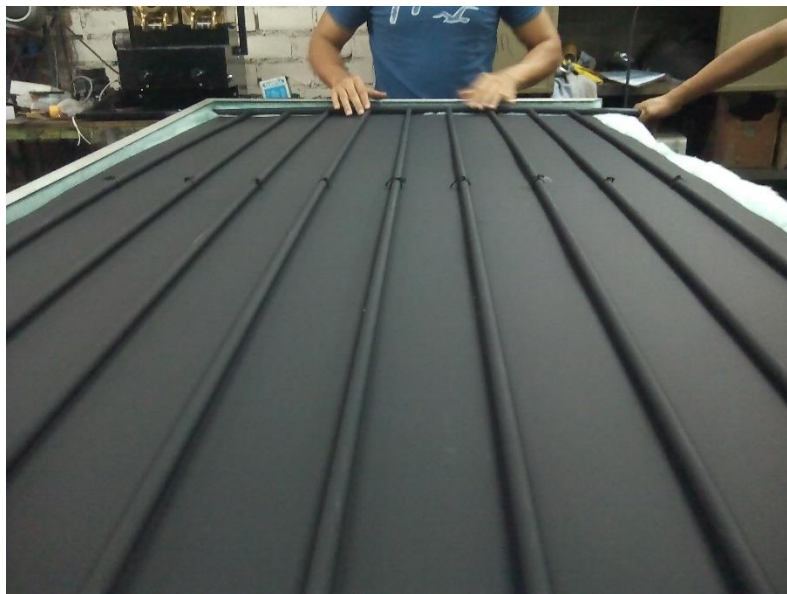


Figura 16. Unión de Parrilla, placa absorbente y aislante



Figura 17. Cierres herméticos entre los extremos de la parrilla y la carcasa

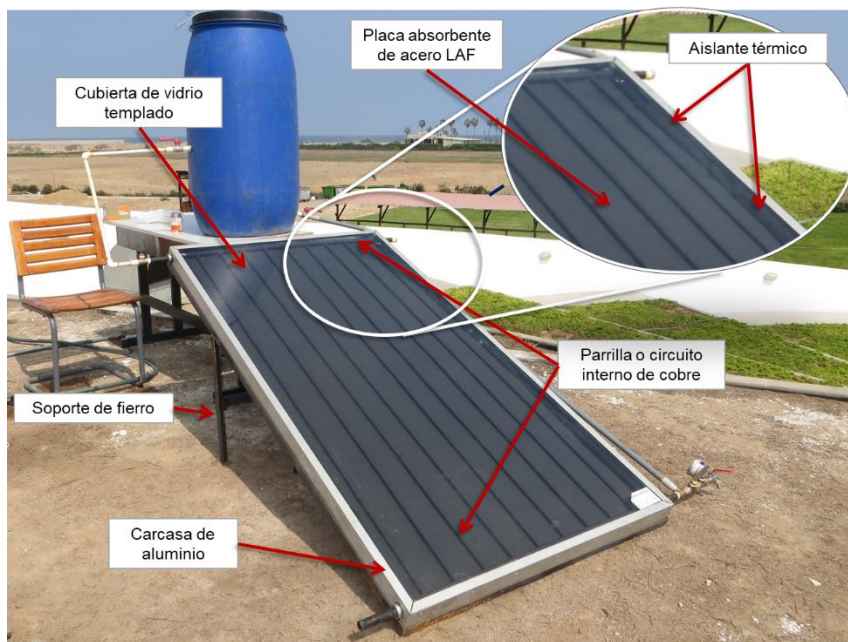


Figura 18. Captador solar térmico plano con absorbente de acero LAF

1.2. *Diseño experimental*

Para esta investigación se utilizó un diseño experimental de caso único. El ensayo de rendimiento se realizó en la segunda planta de la Municipalidad Distrital de Omas.

1.3. *Ubicación y Clima de la zona elegida para el ensayo*

El lugar elegido para implementar el sistema de medición y realizar los ensayos de eficiencia fue el distrito llamado “Omas”, ubicado en Yauyos, provincia perteneciente a la Región Lima. Está ubicado a 1549 msnm y tiene una superficie de 295,35 km². Su capital es el poblado de Omas. Este distrito cuenta apenas con 174 viviendas y una población de 656 habitante (Instituto Nacional de Estadística e Informática - INEI, 2007).

Se eligió este distrito porque sus condiciones climáticas eran las recomendadas por la metodología de evaluación de rendimiento del CSTP (cielo despejado). Omas se caracteriza por un clima costeño templado todo el año y con precipitaciones de lluvias en los meses de diciembre hasta marzo (Presidencia del Consejo de Ministros - PCM, 2018). Según el portal del SENAMHI (2018), el clima de esta zona se define como Clima Semiseco Frío, en base al trazado de zonas de acuerdo a la clasificación de climas de Werren Thornwaite, este se define en temperaturas que sobrepasan los 20 °C y una precipitación anual menor de 500 mm.

En cuanto a la energía solar disponible, se señala a modo referencial que, en Yauyos (provincia a la que Omas pertenece), el tiempo de iluminación natural es aproximadamente 12 horas durante el año, con una variación de 51 minutos entre el día más corto y el más largo. Del mismo modo, se presentan variaciones estacionales mínimas de energía solar incidente de onda corta a lo largo del año. En la zona, el período de mayor radiación incidente ocurre entre los días 26 de agosto y 23 de noviembre, donde la energía de onda corta incidente diaria promedio supera los 6.7 kWh/m² (Weather Spark, 2018).

1.4. Configuración de ensayo

El ensayo de rendimiento de un captador solar térmico comprende al menos dos pruebas; la primera, es la determinación de la constante de tiempo y la segunda, la determinación del rendimiento térmico. En este apartado se describe cómo se configuró el banco de ensayos para la aplicación de las pruebas correspondientes.

- Captador solar: El captador fue montado sobre un soporte de fierro, en un ángulo de inclinación de 23° y orientado al Norte, hacia donde se ubica el ecuador, tal y como sugiere Duffie (2013). Se ubicó de tal manera que facilite el flujo de aire irrestricto alrededor de toda su superficie y que en ningún momento fuera parcial o totalmente cubierto por sombras.

- Temperatura del aire circundante: El sensor de temperatura ambiental se colocó a 150 mm (6 pulgadas) aproximadamente, detrás del captador y protegido de la radiación solar directa.
- Irradiancia solar: El solarímetro de campo se montó adyacente al soporte del captador, a la altura media del mismo, de forma tal que su sensor estuviese en el mismo plano de apertura del captador sin causar en ningún momento sombras sobre el mismo y sin recibir la radiación reflejada del captador solar y la superficie terrestre.
- Medición de la diferencia de las temperaturas a la entrada y salida del captador solar: La diferencia de temperatura del fluido de transferencia entre la entrada y la salida del captador solar se midió mediante termocuplas tipo J, que se ubicaron lo más cerca posible del ingreso y salida del captador.
- Sistema de calentamiento: Para este ensayo, se utilizaron dos hervidores eléctricos y un tanque para mezcla y calentamiento de agua. El agua es bombeada a partir de este tanque y transportada hacia el ingreso del captador solar. El agua fue calentada en los hervidores y luego mezclada en el tanque para alcanzar las temperaturas requeridas al ingreso del captador.
- Equipo adicional. Se utilizó una bomba de 0.5 HP y dos válvulas reguladoras adicionales en la línea que precede al captador solar para ajustar el flujo del fluido caloportador a 0.02 l/s. Asimismo, se instaló un medidor de volumen de agua en el que se registraba el

volumen (en litros) que ingresaba al captador y mediante un cronómetro se estimaba el caudal de entrada. Adicionalmente, se instaló un tanque de almacenamiento a la misma altura del captador y a 30 cm. de distancia.

- Medición del viento: El anemómetro debe colocarse a 1 m. de distancia del captador, a la altura media del mismo, en una ubicación sin obstáculos al viento y de modo que no produzca una sombra sobre el captador durante las pruebas.

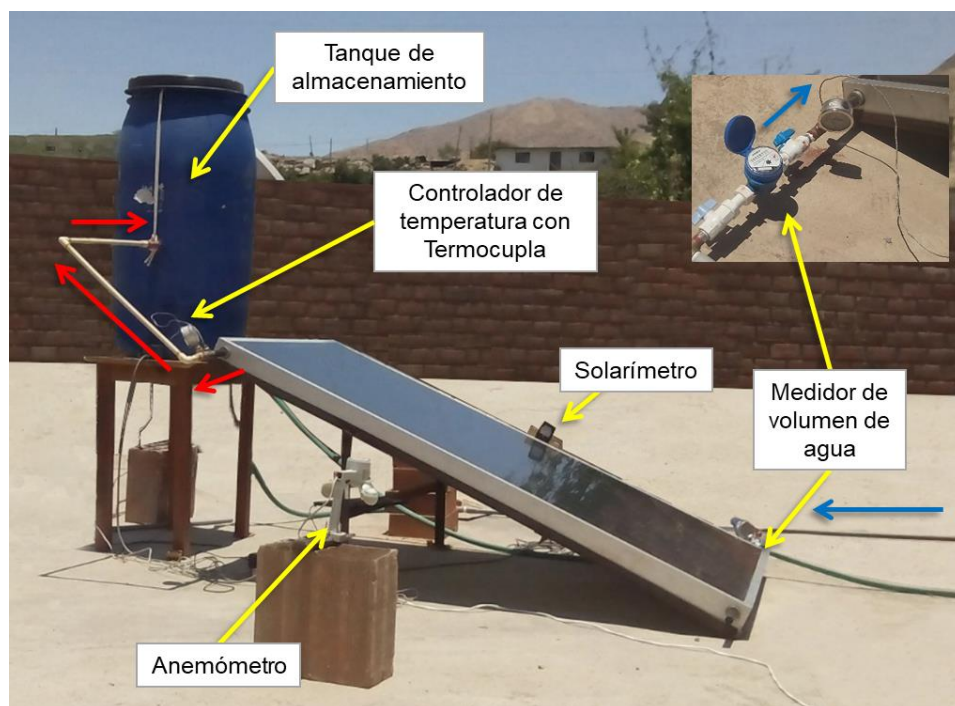


Figura 19. Configuración para ensayo de rendimiento del captador solar térmico plano (CSTP). Vista del CSTP y el tanque de almacenamiento.

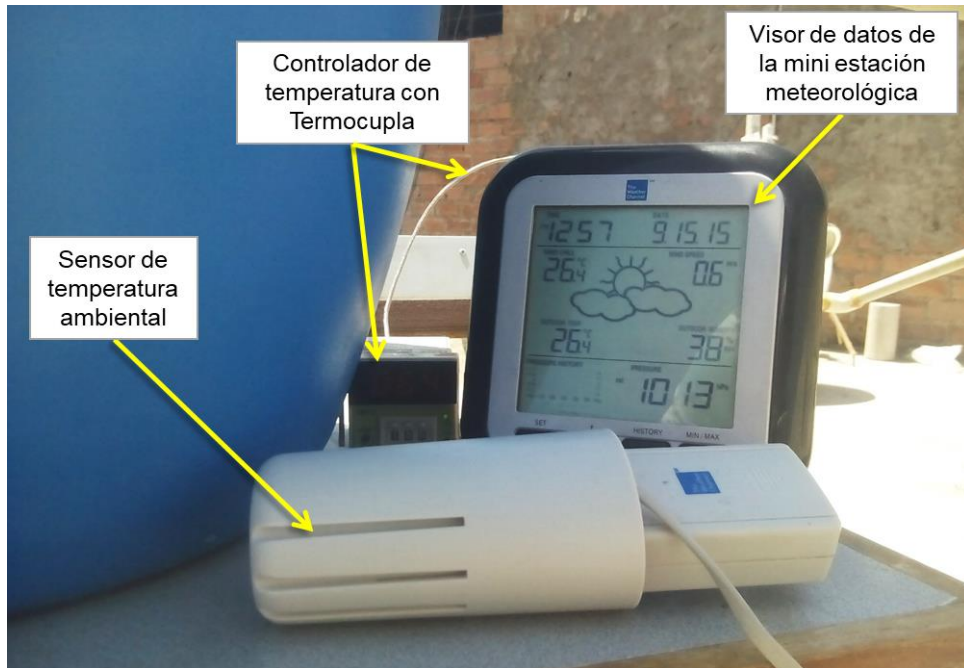


Figura 20. Configuración para ensayo de rendimiento del captador solar térmico plano (CSTP). Vista de mini estación meteorológica.

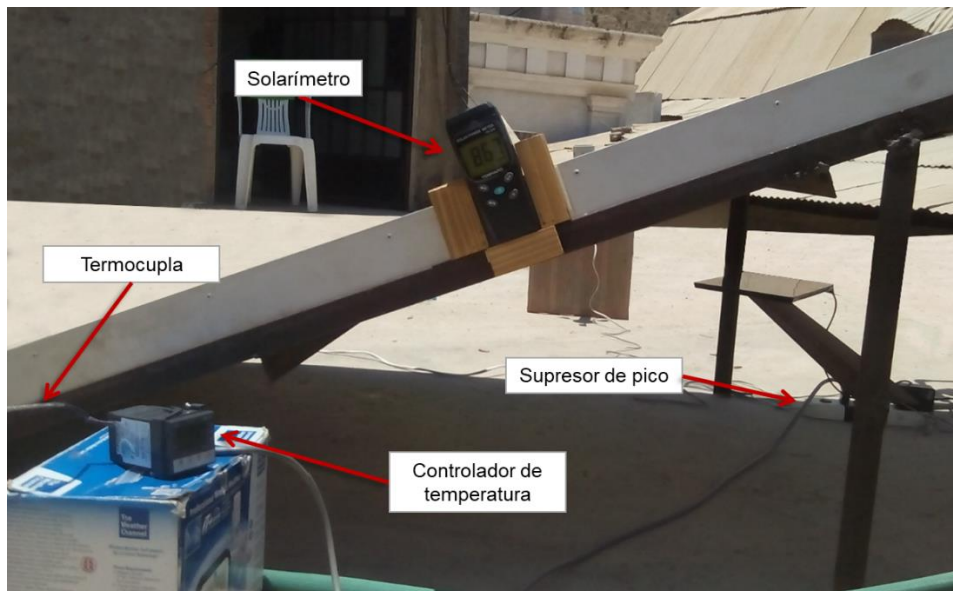


Figura 21. Configuración para ensayo de rendimiento. Vista lateral: Solarímetro y controlador de temperatura de entrada.

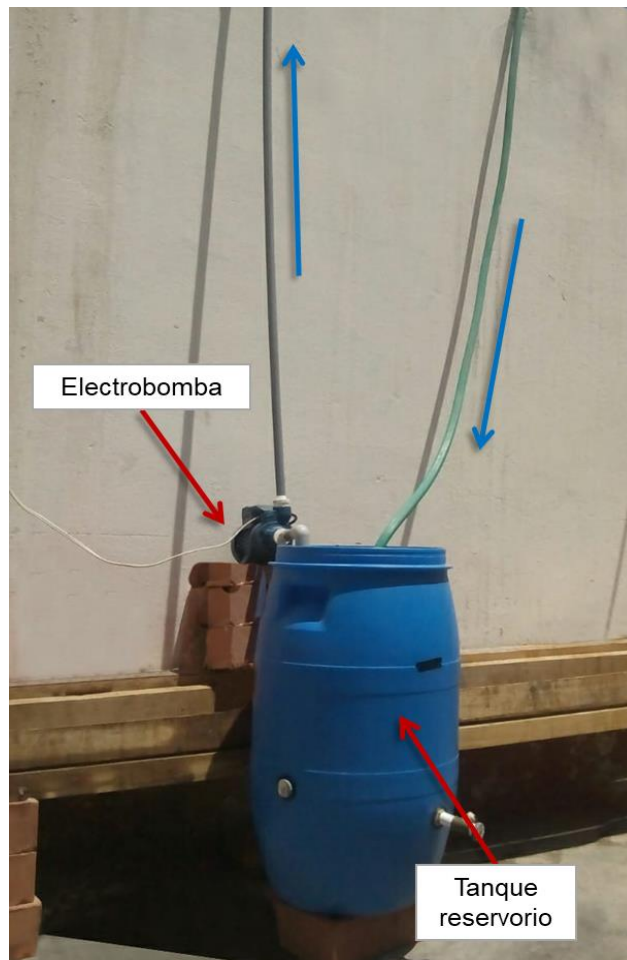


Figura 22. Configuración para ensayo de rendimiento. Vista de Reservorio y bomba para circulación asistida.

1.5. *Determinación de la constante de tiempo*

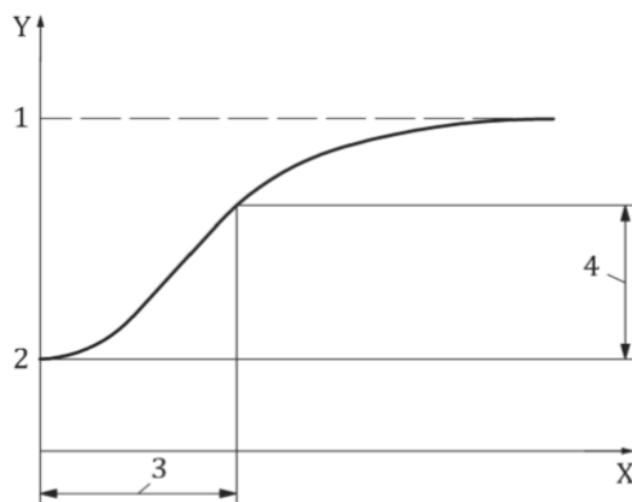
La constante de tiempo fue determinada previamente al ensayo de evaluación de rendimiento térmico del captador solar, tal y como indica la norma *UNE-EN ISO 9806:2013 Energía solar. Captadores solares térmicos. Métodos de ensayo*. El ensayo se realizó en exteriores, respetando las mismas condiciones para la evaluación del rendimiento térmico:

- La irradiancia solar en el plano del captador debe ser mayor a 700 W/m²
- El fluido caloportador debe circular a través del captador utilizando el caudal más bajo usado durante los ensayos de eficiencia térmica, en este caso es 0.02 l/s.

Previo al ensayo, el captador debe estar protegido de la radiación solar mediante una cubierta reflectante y la temperatura de entrada del fluido caloportador debe haber sido ajustada lo más cercana posible a la temperatura del aire circundante.

- Una vez verificadas las condiciones mencionadas, se miden las variables: Temperatura del fluido a la entrada del captador (T_e), temperatura del fluido a la salida del captador (T_s) y temperatura del aire circundante (T_a). La toma de datos se realiza cada minuto.
- En función a las variables medidas se esperó a alcanzar el estado estacionario inicial del sistema, que, para fines de este ensayo, es alcanzado cuando la temperatura de salida varía en menos de 0.5 °C por minuto.
- Con el sistema en estado estacionario inicial, se procedió a retirar la cubierta y se continuó midiendo hasta que el sistema alcanzó nuevamente las condiciones de estado estacionario.
- Para el cálculo de la constante de tiempo, se graficó la diferencia de temperatura a la salida del captador y la del aire circundante ($T_s - T_a$) vs el tiempo, comenzando con la condición inicial de

estado estacionario $(T_s - T_a)_0$ y continuando hasta el segundo estado estacionario a mayor temperatura $(T_s - T_a)_2$. La gráfica resultante debe formar una curva, similar a la descrita en la Figura 23. A esta gráfica se le añadió una línea de tendencia y su ecuación representativa con el programa Microsoft Excel 2016, de esta ecuación la variable dependiente es la diferencia de temperatura y la variable independiente es el tiempo.



Leyenda

- X Tiempo
- Y $T_s - T_a$
- 1 $(T_s - T_a)_2$
- 2 $(T_s - T_a)_0$
- 3 t_c
- 4 $0,632 ((T_s - T_a)_2 - (T_s - T_a)_0)$

Figura 23. Constante de tiempo del captador

Fuente: UNE-EN-ISO 9806:2013 Energía solar. Captadores solares térmicos. Métodos de ensayo

- La constante de tiempo (t_c) se define como el tiempo transcurrido entre el retiro de la cubierta y el punto en donde la temperatura de salida del captador (T_s) alcanza el 63,2% del incremento total

desde $(T_s - T_a)_0$ a $(T_s - T_a)_2$. La constante de tiempo sería, por tanto, una función de $(T_s - T_a)$, o acorde a la Figura 23, una función de “y” para cuándo este sea igual a:

$$Y = 0.632 \times ((T_s - T_a)_2 - (T_s - T_a)_0) \quad (14)$$

- Si el tiempo de respuesta de los sensores es significativo en comparación con el medido para el captador, entonces debe tenerse en cuenta para el cálculo de los resultados de ensayo.

1.6. Ensayo de rendimiento térmico en estado estacionario

Para determinar la curva de eficiencia se utilizó como referencia la metodología descrita en la *NTP 399.400:2001 Colectores Solares. Método de ensayo para determinar la eficiencia de los colectores solares*. Esta norma técnica establece las condiciones que deben cumplirse durante el ensayo, las cuales se detallan en la Tabla 3.

Todas las mediciones se realizaron con cielo despejado y en las horas de mayor intensidad de radiación solar (entre las 11:00 am y 2:00 pm).

- Se realizaron seis pruebas en seis días de ensayo. Las pruebas se iniciaron a las 10:30 am con el captador solar tapado con una cubierta reflectante externa.
- Manteniendo todos los sensores conectados según la norma técnica y el captador solar con un ángulo de inclinación de 23° , orientado hacia el norte.

- Se ingresó agua caliente hasta alcanzar la temperatura de entrada deseada en cada ensayo (30.0; 33.3 y 36.0 °C), con dos repeticiones para cada una. El sistema debe alcanzar el equilibrio térmico (la temperatura de entrada y salida se mantiene al mismo nivel durante al menos 10 minutos)
- Se regula el flujo a 0.02 l/s y se espera aproximadamente 20 minutos para que la temperatura en el sistema se estabilice.
- Pasado los 20 minutos, se procedió a retirar el cobertor para permitir la incidencia de la radiación solar sobre el captador, de manera que contribuya directamente en el aumento de temperatura del agua.
- Se tomaron los datos de las variables: Temperatura del fluido a la entrada del captador (T_e), temperatura del fluido a la salida del captador (T_s), temperatura del aire circundante (T_a) y Radiación Solar. Adicionalmente, se registran: velocidad de viento, Humedad relativa, Presión atmosférica y Presión manométrica inicial y final.
- La toma de datos se realizó cada minuto hasta que el sistema alcanzara condiciones estacionarias, por un período mínimo de 5 minutos, que para este caso fue mayor que el valor de la constante de tiempo.

- Del mismo modo, a partir de las variables medidas, se calculó la eficiencia instantánea en condiciones estacionarias para todos los casos, según la ecuación (14).

$$\eta = m \cdot C_p (T_s - T_e) / (A \cdot G) \quad (14)$$

Donde:

η : eficiencia instantánea

m : flujo másico (kg/s.m²)

C_p : calor específico a presión constante del fluido (J/Kg.°C)

T_s : temperatura del fluido a la salida del captador (°C)

T_e : temperatura del fluido a la entrada del captador (°C)

A : área bruta del captador (m²)

G : irradiancia solar en el plano del captador (W/m²)

- Para este ensayo, se consideró que el captador opera en condiciones de estado estacionario cuando en un período de medida de cinco minutos, ninguno de los parámetros medidos se desvía de sus valores medios en más de los límites dados en la Tabla 4.
- Los datos medidos para cada variable, durante el estado estacionario, fueron promediados y graficados según la Figura 12 (Curva de eficiencia), es decir, con la variable η en el eje de las abscisas y la variable $[(T_e - T_a)/G]$ en el eje de las coordenadas.

Tabla 3. Condiciones para ensayo de rendimiento térmico

Parámetro	Condición
Valor mínimo de la Irradiancia solar	790 W/m ²
Variación máxima de la Irradiancia solar en períodos de 10 minutos	±32 W/m ²
Flujo másico del fluido	0.02 kg/s
Temperatura del aire circundante para todos los puntos de la prueba	<30 °C
Velocidad media del viento en períodos de 10 minutos	Entre 2.2 y 4.5 m/s

Fuente: NTP 399.400:2001 Colectores Solares. Método de ensayo para determinar la eficiencia de los colectores solares.

Tabla 4. Desviación admisible de parámetros medidos durante el estado estacionario.

Parámetro	Desviación admisible del valor medio
Irradiancia solar de ensayo	± 50 W/m ²
Temperatura del aire circundante	± 1.5 °C
Caudal másico del fluido	± 2%
Temperatura del fluido a la entrada del captador	± 0.1 °C
Temperatura del fluido a la salida del captador	± 0.5 °C

Fuente: UNE-EN ISO 9806:2013 Energía solar. Captadores solares térmicos. Métodos de ensayo.

1.7. Determinación de la ecuación de rendimiento

- Para la determinación del modelo de rendimiento lineal, se añadió a la gráfica de rendimiento, una línea de tendencia lineal,

generada automáticamente por el programa Microsoft Excel 2016 a través del método de regresión lineal de mínimos cuadrados. De igual modo, se habilitó la opción para mostrar la ecuación de la línea.

- Asimismo, para el modelo de rendimiento cuadrático, se añadió una línea de tendencia cuadrática y su ecuación correspondiente con el programa Microsoft Excel 2016.
- A partir de los modelos propuestos, se calcularon el factor de eficiencia y el coeficiente de pérdidas de calor del captador.

1.8. Análisis estadístico

- Para evaluar la validez de los datos de temperatura tomados se ha realizado una prueba de normalidad mediante el método Shapiro Wilk. Se utilizó el software SPSS Statistics 22. La prueba W de Shapiro-Wilk se utiliza para determinar la normalidad del set de datos, tanto para muestras pequeñas (<50 observaciones) como para muestras grandes (1000 observaciones o más). Se le considera como una de las pruebas más poderosas para probar por la normalidad de un set de datos (Fallas, 2012).
- Para comprobar la validez del modelo lineal propuesto, se realizó un Análisis de Regresión lineal y un Análisis de Varianza con el programa Microsoft Excel 2016.

2. Materiales

En el presente subcapítulo, se listan los materiales e instrumentos utilizados en esta investigación.

2.1. Construcción del captador

- Vidrio templado de 100 x 180 x 0.6 cm. (superficie = 1.80 m²)
- Plancha de acero LAF (laminado en frío) de 120 x 240 x 0.06 cm.
- Plancha de acero galvanizado de 100 x 200 x 0.1 cm.
- Perfiles de aluminio 2.5" x 2.44 m.
- Aislante termo acústico (Lana de Poliéster) de 50 mm. de espesor
- 2 frascos de Silicona líquida
- 3 tuberías de cobre 3/8" (DN 10mm) x 6m.
- 1 tubería de cobre 1/2" (DN 20mm) x 6m.
- 1 envase de pintura óleo negro mate en spray
- 1 frasco de disolvente ("Thinner")
- 2 ángulos de aluminio de 1" x 1.5" x 1.5 m.

2.2. Conexiones y equipos

- 1 Tubo de CPVC 1/2" (DN 15.87mm) x 5m.
- 4 Tubos de PVC 1/2" (DN 21mm) x 5m.
- 6 Codos PVC 1/2" de 90°
- 2 Válvula de bola pesada 1/2"
- 1 Llave esférica para purga 1/2"

- 2 Tapones hembra
- 2 Tapones de bronce de ½" con orificios perforados de 4.5 mm. de diámetro, para termocuplas
- 1 frasco de pegamento PVC Naranja
- 2 perfiles de fierro de 0.12 x 0.15 x 6 m., para soporte del captador
- Electrobomba con las siguientes características: 0.5 HP de potencia; Presión máxima: 6 bar; Alimentación de corriente: monofásica 220 V – 60 Hz AC; Caudal máximo: 40 litros/min
- Tanque para almacenamiento de agua de 150 litros
- Tanque para calentamiento de agua de 50 litros

2.3. Sistema de Medición

- 1 Solarímetro de campo
- 2 Termocuplas tipo J
- 2 Controladores de temperatura
- 1 Medidor de volumen de agua
- 2 Extensiones eléctricas industriales de 10 m.
- 1 Supresor de picos con extensión de 3 m.

2.4. Software para procesamiento de datos

- Microsoft Excel 2016
- IBM SPSS Statistics 22.0

VI. RESULTADOS

En este capítulo se describen los principales hallazgos de esta investigación.

1. Constante de tiempo

Antes de realizar la evaluación de la eficiencia instantánea del captador solar térmico se recomienda realizar una prueba para determinar la constante de tiempo, valor que será útil para distinguir el momento en el que el sistema alcanza el estado estacionario, así como la duración de este período. En la Tabla 4 podemos observar los datos tomados para la determinación de la constante de tiempo.

Los resultados del ensayo son representados en la Figura 24, graficando la diferencia entre la temperatura del agua a la salida del captador y la temperatura del aire circundante ($T_s - T_a$) en función del tiempo.

Tabla 5. Resultado del ensayo para calcular la constante de tiempo

Fecha	Hora	Tiempo (minuto)	Temperatura de Entrada (°C)	Temperatura del aire circundante (°C)	Temperatura de Salida (°C)	Ts - Ta
11-nov-15	12:11	1	27.3	27.8	28.3	0.5
11-nov-15	12:12	2	27.7	27.8	30.1	2.3
11-nov-15	12:13	3	27.8	27.8	32.6	4.8
11-nov-15	12:14	4	28	27.8	33.2	5.4
11-nov-15	12:15	5	28.2	27.8	33.9	6.1
11-nov-15	12:16	6	28.2	27.8	34.5	6.7
11-nov-15	12:17	7	28.3	27.9	34.8	6.9
11-nov-15	12:18	8	28.3	28	34.9	6.9
11-nov-15	12:19	9	28.7	28	35.2	7.2
11-nov-15	12:20	10	29	28.1	35.4	7.3
11-nov-15	12:21	11	29.1	28.1	36	7.9
11-nov-15	12:22	12	29.2	28.1	36.3	8.2
11-nov-15	12:23	13	29.3	28.2	36.6	8.4
11-nov-15	12:24	14	29.8	28.2	37	8.8
11-nov-15	12:25	15	29.6	28.1	37.1	9.0
11-nov-15	12:26	16	29.9	28.1	37.1	9.0
11-nov-15	12:27	17	29.9	28.1	37.2	9.1
11-nov-15	12:28	18	29.9	28.1	37.2	9.1
11-nov-15	12:29	19	30	28.1	37.2	9.1
11-nov-15	12:30	20	30	28.2	37.3	9.1

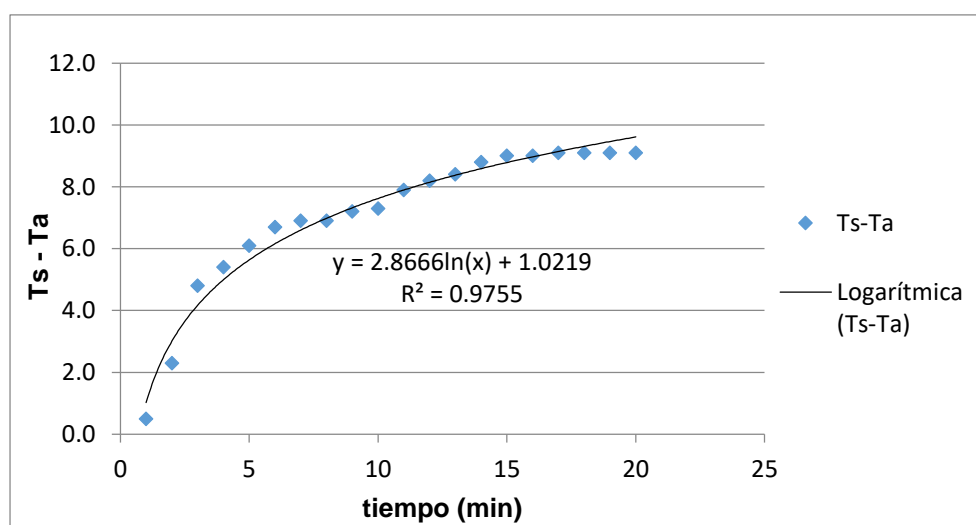


Figura 24. Diferencia entre la temperatura a la salida del captador solar y la temperatura del aire circundante en función del tiempo.

Mediante el programa Microsoft Excel 2016, se obtuvo una función logarítmica que representa el comportamiento del salto de temperatura $T_s - T_a$ (y) en función del tiempo (x) con un coeficiente de determinación de 0.976. La constante de tiempo es el tiempo transcurrido entre la eliminación de la cubierta y el momento en donde $(T_s - T_a)$ captador alcanza el 63.2 % del incremento total desde $(T_s - T_a)_0$ a $(T_s - T_a)_2$. Para hallar este valor, utilizamos la ecuación obtenida:

$$Y = 2.8666 \times \ln(X) + 1.0219 \quad (8)$$

El 63.2 % del incremento total desde $(T_s - T_a)_0$ a $(T_s - T_a)_2$ se calculó a partir de la ecuación (14):

$$Y = 0.632 \times ((T_s - T_a)_2 - (T_s - T_a)_0)$$

$$Y' = 0.632 \times (9.1 - 0.5)$$

$$Y' = 5.4352$$

De este valor sería $Y' = 5.4352$. Con la definición previa, la constante de tiempo t_c sería el valor de X cuando Y sea Y' . Invirtiendo la ecuación (8) se obtiene:

$$Y = 2.8666 \times \ln(X) + 1.0219$$

$$Y - 1.0219 = 2.8666 \times \ln(X)$$

$$\frac{Y - 1.0219}{2.8666} = \ln(X)$$

$$X = e^{\frac{Y - 1.0219}{2.8666}} \quad (9)$$

Finalmente, se reemplaza el valor $Y'=5.4352$ en la ecuación (9):

$$X = e^{\frac{5.4352-1.0219}{2.8666}}$$

$$X = e^{\frac{5.4352-1.0219}{2.8666}}$$

$$X = 4.6625$$

De este modo, la constante de tiempo obtenida fue $t_c = 4.66$ minutos. Dado que el valor es ampliamente mayor al tiempo de respuesta de los sensores de temperatura no se consideró a este último como un factor de error significativo. Asimismo, se consideró para el estado estacionario una duración mínima de cinco minutos, pues, como indica la *NTP 300.400:2001 Colectores Solares. Método de ensayo para determinar la eficiencia de los colectores solares*, la constante de tiempo calculada en este ensayo resultó menor que el tiempo recomendado.

2. Variables medidas para cálculo de la eficiencia instantánea del CSTP

2.1. Irradiancia solar

La irradiancia solar durante los períodos de ensayo fue mayor a 790 W/m^2 , en todo momento, registrándose un mínimo de 795 W/m^2 para el día 22/12/2015 y un máximo de 949 W/m^2 para el día 13/11/2015. Los resultados de irradiancia solar durante los seis días de ensayo se pueden ver en la Figura 25. El detalle de los valores obtenidos de irradiancia solar se encuentra en el Anexo 4.

La variación de Irradiancia solar en los 10 minutos previos al término de cada período estacionario fue de un mínimo de +3.5 W/m² para el día 22/12/2015 y de un máximo de 32 W/m² para el día 24/11/2015.

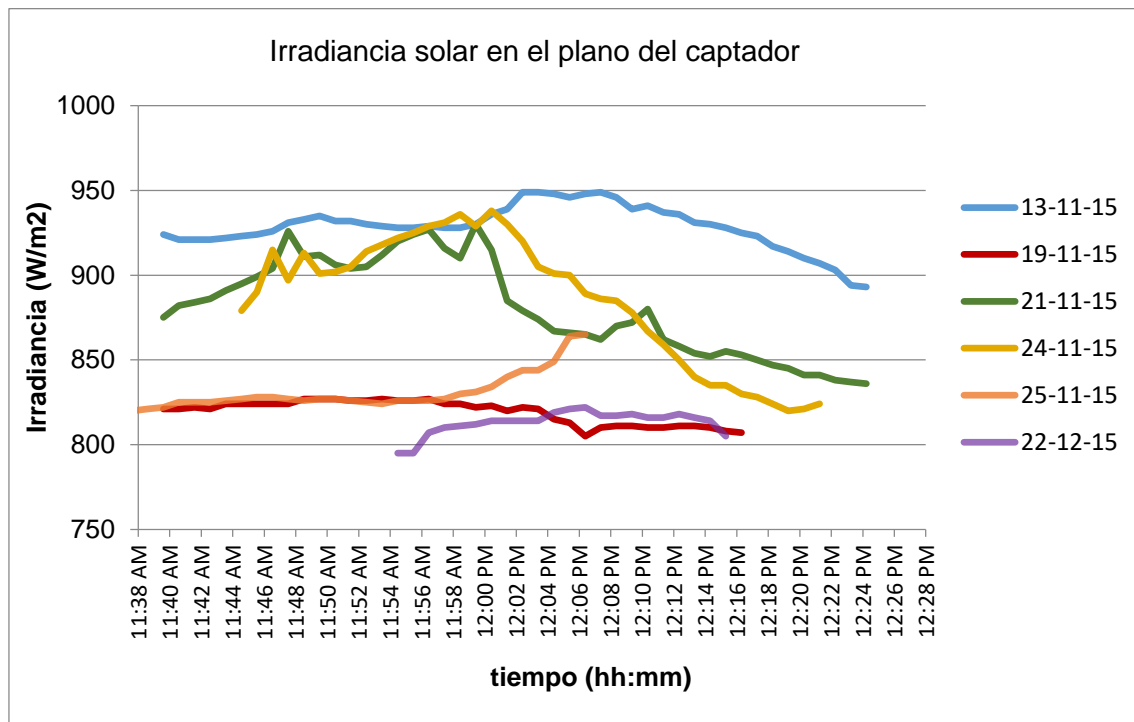


Figura 25. Irradiancia solar (W/m²) en el plano del captador.

2.2. Temperatura del aire circundante

La temperatura del aire circundante se mantuvo por debajo de los 29 °C durante los períodos de ensayo. Se registró un valor mínimo de 23.7 °C para el día 19/11/2015 y un máximo de 28.4 °C para el día 13/11/2015. Los resultados de temperatura del aire circundante se muestran en la Figura 26.

Asimismo, la variación de este parámetro no fue significativa durante los ensayos, con un mínimo de 0.6 °C y un máximo de 1.3 °C de diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas registradas en

cada día de ensayo. Todos los valores obtenidos de temperatura del aire circundante se adjuntan en el Anexo 4.

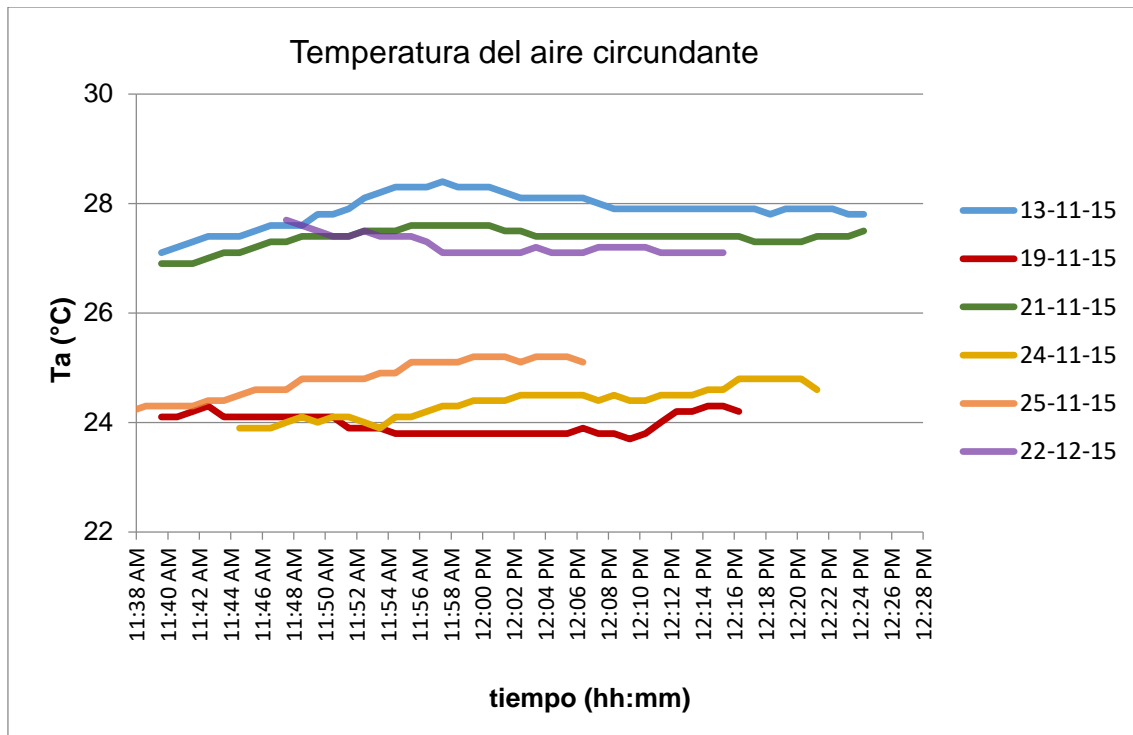


Figura 26. Temperatura del aire circundante (°C).

2.3. Temperaturas a la entrada y salida del captador

Esta variable permite apreciar el salto de temperatura que se produce en el fluido caloportador al circular a través del captador solar.

La diferencia entre la temperatura a la salida y la temperatura a la entrada del captador ($T_s - T_e$) se mantuvo en un rango de 6.8 a 9.3 °C desde el inicio de los ensayos hasta el estado estacionario, tal y como se muestra en la Figura 27. También se puede apreciar que en todos los casos el estado estacionario se alcanza entre los 16 y 23 minutos de iniciado el ensayo.

El menor salto de temperatura en se registró el día 19/11/2015, con un promedio de 7.12 °C para una temperatura a la entrada del captador de 36 °C. El mayor salto de temperatura se alcanzó el día 13/11/2015, con un promedio de 9.04 °C para una temperatura a la entrada del captador de 30.1 °C. Para ver todos los resultados de la medición de temperatura a la salida y temperatura a la entrada del captador ir al Anexo 4.

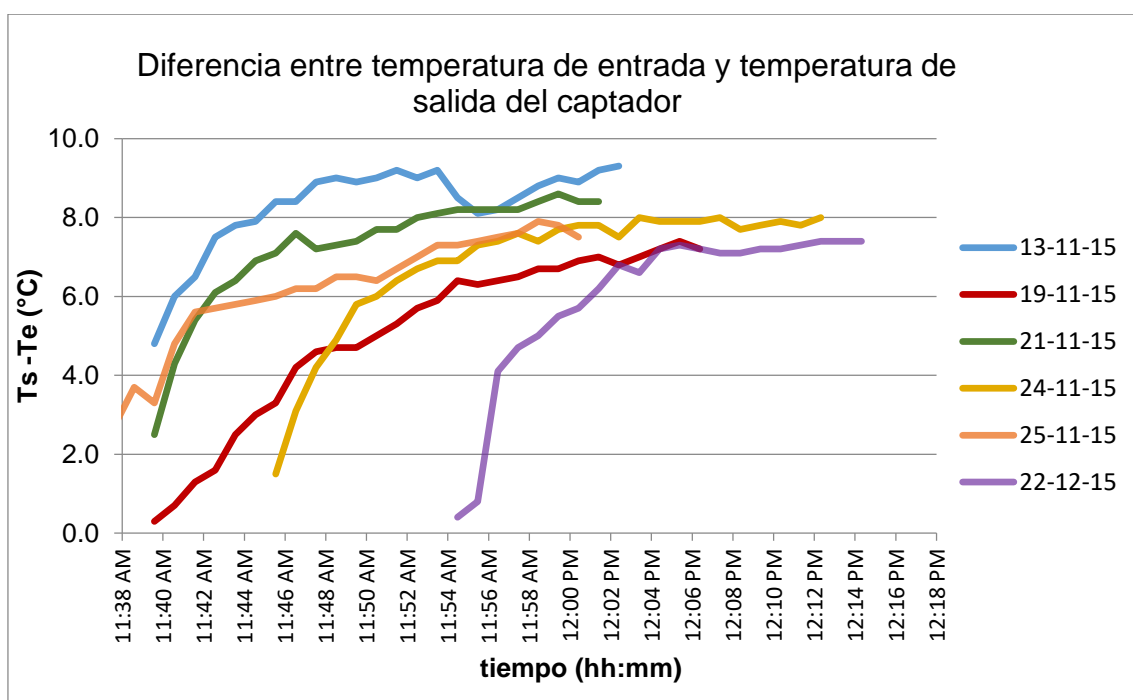


Figura 27. Diferencia entre temperatura de salida y temperatura de entrada del captador (°C).

3. Curva de eficiencia

3.1. *Eficiencia instantánea del CSTP*

La eficiencia instantánea del captador solar es calculada a partir de los datos experimentales obtenidos a partir de la medición de los

siguientes parámetros: la temperatura de entrada y salida al captador, la temperatura del aire circundante y la irradiancia solar y velocidad de viento. Los datos han sido procesados y analizados en Microsoft Excel 2016. Las pruebas se realizaron en las horas de más alta intensidad de radiación solar.

Para fines prácticos, se describirá de forma detallada, los resultados de un día de pruebas; posteriormente, se presentarán los datos globales del ensayo de rendimiento.

En la Tabla 6 se muestran los resultados obtenidos para el día jueves 19 de noviembre de 2015. La toma de datos inicia a las 11:40 h con el captador solar descubierto para medir la influencia directa de la irradiancia solar en el calentamiento del agua. La temperatura con la que el agua ingresa al captador es de 35 °C y se aprecia como la temperatura de salida incrementa gradualmente.

Según la *NTP 399.400:2001 Colectores Solares. Método de ensayo para determinar la eficiencia de los colectores solares*, los datos se deben tomar durante 15 minutos como mínimo antes de cada período estacionario, por ello, pasado este tiempo se promedian los resultados para cada parámetro en intervalos de cinco minutos, a fin de calcular la desviación entre los valores máximos y mínimos con su valor promedio, eligiéndose el período de cinco minutos con menor variación respecto a sus medias como estado estacionario, en concordancia con lo establecido por la mencionada norma (ver Tabla

4). Se puede observar, por consiguiente, que el sistema alcanza el estado estacionario entre las 12:03 y 12:07 hrs.

Tabla 6. Resultados del ensayo de rendimiento para el día 19/11/2015.

Hora	Irradiancia solar G (W/m ²)	Temperatura de entrada Te (°C)	Temperatura del aire circundante Ta (°C)	Temperatura de salida Ts (°C)
11:40	821	34.9	24.1	35.2
11:41	821	35	24.1	35.7
11:42	822	35.2	24.2	36.5
11:43	821	35.2	24.3	36.8
11:44	824	35.1	24.1	37.6
11:45	824	35.1	24.1	38.1
11:46	824	34.8	24.1	38.1
11:47	824	35.1	24.1	39.3
11:48	824	35.1	24.1	39.7
11:49	827	35.1	24.1	39.8
11:50	827	35	24.1	39.7
11:51	827	35.1	24.1	40.1
11:52	826	35.1	23.9	40.4
11:53	826	35.1	23.9	40.8
11:54	827	35.2	23.9	41.1
11:55	826	35.1	23.8	41.5
11:56	826	35.3	23.8	41.6
11:57	827	35.3	23.8	41.7
11:58	824	35.4	23.8	41.9
11:59	824	35.7	23.8	42.4
12:00	822	35.8	23.8	42.5
12:01	823	35.8	23.8	42.7
12:02	820	35.9	23.8	42.9
12:03	822	36	23.8	42.8
12:04	821	36.1	23.8	43.1
12:05	815	35.9	23.8	43.1
12:06	813	35.9	23.8	43.3
12:07	805	36.1	23.9	43.3
12:08	810	36.2	23.8	43.4
12:09	811	36.3	23.8	43.5
12:10	811	36.4	23.7	43.4
12:11	810	36.5	23.8	43.6
12:12	810	36.6	24.0	43.8
12:13	811	36.7	24.2	43.9
12:14	811	36.7	24.2	44
12:15	810	36.7	24.3	44.1

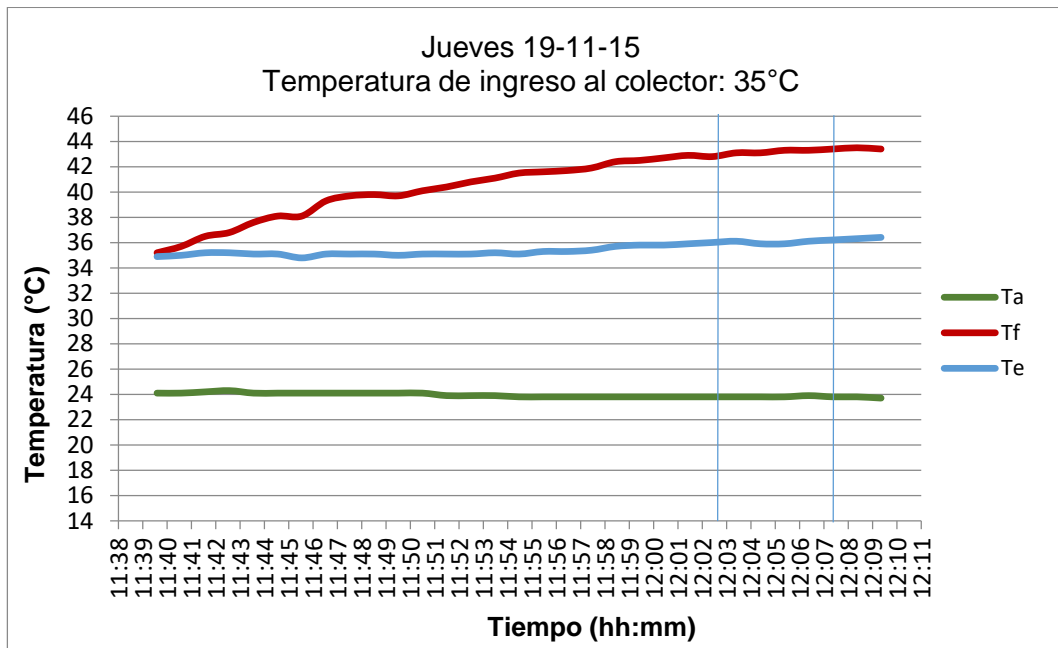


Figura 28. Temperaturas medidas el jueves 19/11/2015.

En la Figura 28 se observa que la temperatura del aire circundante se mantuvo por debajo de 30 °C. Del mismo modo, en la Figura 29, la irradiancia solar se mantuvo por encima de 790 W/m² en todo momento, y con una variación máxima de 22 W/m².

Durante el período en que el sistema alcanza el estado estacionario, se registró un valor promedio de irradiancia solar de 815.2 W/m², la temperatura de entrada (Te) es 36.0 °C, la temperatura de salida (Ts) es 43.1 °C y la temperatura del aire circundante (Ta) es 23.8 °C.

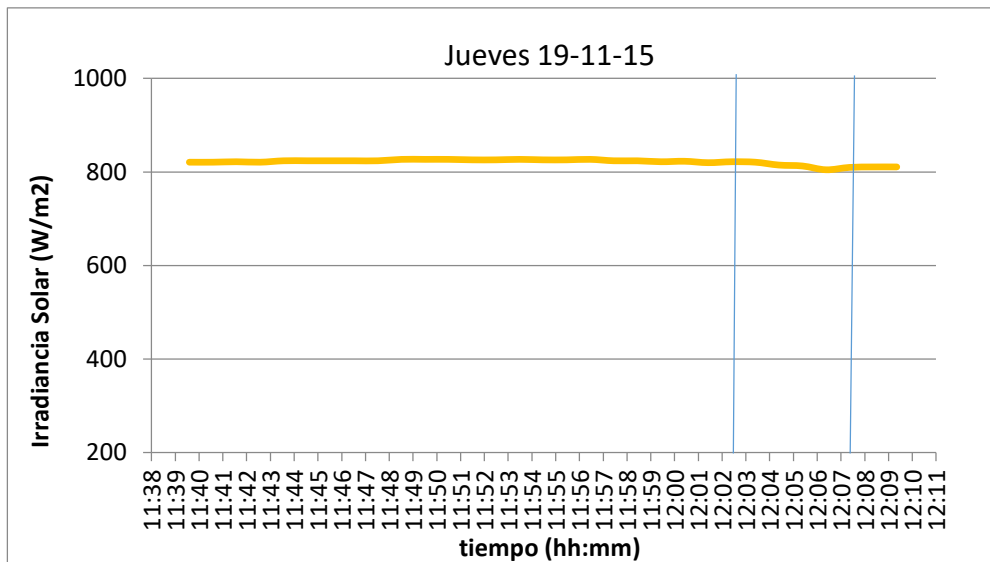


Figura 29. Irradiancia solar medida el jueves 19/11/2015.

Los valores promedio calculados para cada parámetro durante el estado estacionario se remplazaron en la ecuación de la eficiencia instantánea (14):

$$\eta = m \cdot C_p (T_s - T_e) / (A \cdot G)$$

Donde:

η : eficiencia instantánea

m : flujo másico = 0.02 kg/s.m²

C_p : calor específico del fluido = 4175 J/Kg.°C

T_s : temperatura del fluido a la salida = 43.1 °C

T_e : temperatura del fluido a la entrada = 36 °C

A : área bruta del captador = 1.8 m²

G : irradiancia solar = 815.2 W/m²

Por lo tanto, la prueba del día jueves 19 de noviembre de 2015, con una temperatura a la entrada del captador de 36 °C tuvo una eficiencia instantánea de 40.4 %. En la Tabla 7 se muestran los resultados obtenidos en los demás días de prueba. Es preciso señalar que, los valores obtenidos en el ensayo del día 25/11/2015 no cumplieron los requisitos de variación admisible para considerar que el sistema alcanzó un período estacionario, por lo que los resultados de eficiencia instantánea de este día no se consideraron para la elaboración de la curva.

Tabla 7. Datos globales obtenidos en la evaluación de eficiencia térmica

Fecha	Temperatura de entrada T_e (°C)	Temperatura del aire circundante T_a (°C)	Temperatura de salida T_s (°C)	Irradiancia solar G (W/m ²)	$[T_e - T_a]/G$ (°C/W/ m ²)	Eficiencia instantánea η
13/11/2015	30.1	28.2	39.1	936.4	0.00199	0.44610
21/11/2015	33.3	27.6	41.7	901.2	0.00640	0.43135
24/11/2015	33.4	24.5	41.2	867.8	0.01031	0.41765
22/12/2015	35.8	27.1	43.1	816	0.01064	0.41569
19/11/2015	36	23.8	43.1	815.2	0.01494	0.40371

Los valores hallados de eficiencia instantánea van desde 0.40371, para una temperatura de entrada de 36 °C, hasta 0.44610 para una temperatura de entrada de 30.1 °C (Estos resultados se analizarán con mayor detalle en el capítulo de discusión).

3.2. Modelo lineal de eficiencia instantánea del CSTP

A partir de los datos presentados en la Tabla 7 se elaboró un gráfico de dispersión en donde la eficiencia instantánea se presenta como una función de la variable $[T_e - T_a]/G$ (ver Figura 30).

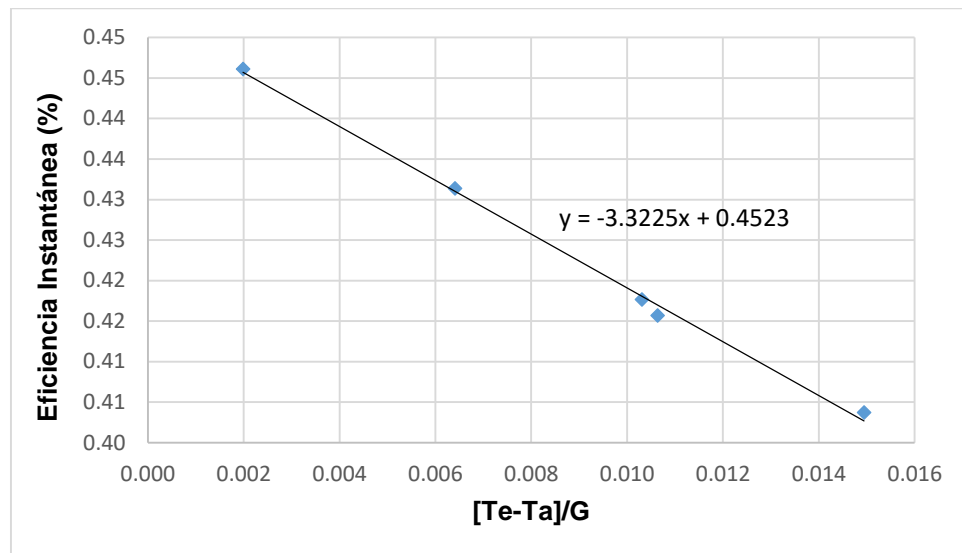


Figura 30. Modelo lineal de la eficiencia instantánea del captador solar térmico con absorbente de Acero LAF.

Una primera aproximación al modelo de rendimiento del captador solar se basa en que la eficiencia es una función lineal del diferencial de temperatura. Según este modelo, la ecuación de eficiencia instantánea es la siguiente:

$$\eta = F_R(\tau \cdot \alpha) - F_R \cdot U_L \left(\frac{T_e - T_a}{G} \right)$$

El factor de eficiencia (F_R) representa el cociente entre el calor absorbido por el fluido y el transferido, considerando la placa a la misma temperatura del fluido a la entrada del captador.

El valor de la transmitancia (τ) del vidrio transparente según Duffie y Beckman (2013) es 0.88; mientras que la absorptancia (α) del acero LAF, determinada por Bergström, Powell y Kaplan (2007), tiene un valor de 0.67 (a 527 nm). Reemplazando la ecuación del modelo lineal en la ecuación de rendimiento se obtuvo:

$$F_R \cdot U_L = 3.3225$$

$$F_R(\tau \cdot \alpha) = 0.4523$$

Utilizando los datos mencionados anteriormente ($\tau=0.88$ y $\alpha=0.67$) se calculó el factor de eficiencia (F_R):

$$F_R = \frac{0.4523}{(\tau \cdot \alpha)}$$

$$F_R = \frac{0.4523}{(0.88 \times 0.67)}$$

$$F_R = 0.7671$$

A partir del valor calculado para F_R se calculó el valor del coeficiente de pérdidas U_L :

$$F_R \cdot U_L = 3.3225$$

$$U_L = \frac{3.3225}{0.7671}$$

$$U_L = 4.3311$$

La eficiencia pico del captador solar es 45.23 % y el coeficiente global de pérdidas (U_L) es de 4.3311 W/m²/°C; de igual forma, el factor de eficiencia (F_R) fue 0.7671.

Finalmente, el modelo lineal de eficiencia instantánea del CSTP con absorbente de acero LAF queda representado por la siguiente ecuación:

$$\eta = 0.7671(\tau \cdot \alpha) - 0.7671(4.3311) \left(\frac{T_e - T_a}{G} \right)$$

3.3. Modelo cuadrático de eficiencia instantánea del CSTP

El modelo cuadrático es una variación de la ecuación lineal de rendimiento que se basa en que el factor de pérdidas no es una constante y por tanto se transforma en una función de la temperatura del captador y la temperatura del aire circundante.

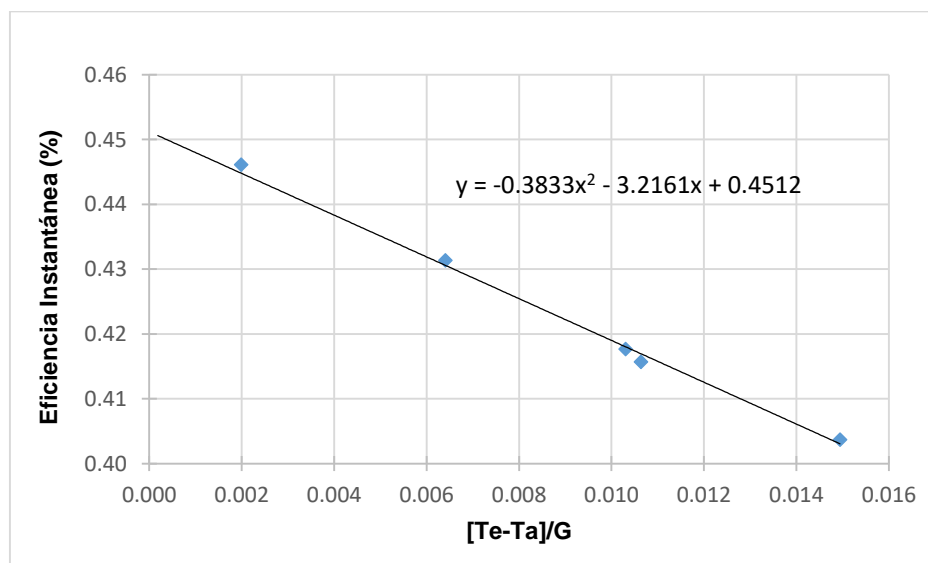


Figura 31. Modelo cuadrático de la eficiencia instantánea del captador solar térmico con absorbente de Acero LAF.

Según este modelo, la ecuación de la eficiencia es la siguiente:

$$\eta = F_R(\tau \cdot \alpha) - C_1 \left(\frac{T_e - T_a}{G} \right) - C_2 \cdot G \cdot \left(\frac{T_e - T_a}{G} \right)^2$$

Remplazando la ecuación del modelo cuadrático en la ecuación de rendimiento tenemos que:

$$F_R(\tau \cdot \alpha) = 0.4512$$

Utilizando los datos mencionados anteriormente ($\tau=0.88$ y $\alpha=0.67$) podemos calcular el factor de eficiencia (F_R):

$$F_R = \frac{0.4512}{(\tau \cdot \alpha)}$$

$$F_R = \frac{0.4512}{(0.88 \times 0.67)}$$

$$F_R = 0.7653$$

El coeficiente de pérdida de calor C_1 se obtuvo remplazando directamente su valor en el modelo de la ecuación cuadrática. El coeficiente que representa la dependencia de la temperatura de C_1 (C_2) se obtuvo de dividir el coeficiente de segundo orden de la ecuación, entre la irradiancia solar promedio del ensayo:

$$C_2 = \left(\frac{0.3833}{G} \right)$$

$$C_2 = \left(\frac{0.3833}{867.32} \right)$$

$$C_2 = 0.0004$$

La eficiencia pico del captador solar es 45.12 % y los coeficientes de pérdidas C_1 y C_2 son 3.2161 W/m²/°C y 0.0004 W/m²/°C²,

respectivamente. Para este caso, el factor de eficiencia calculado fue 0.7653.

Por consiguiente, el modelo cuadrático de eficiencia instantánea del CSTP con absorbente de acero LAF está representado por la siguiente ecuación:

$$\eta = 0.7653(\tau \cdot \alpha) - 3.2161 \left(\frac{T_e - T_a}{G} \right) - 0.0004(G) \left(\frac{T_e - T_a}{G} \right)^2$$

4. Análisis estadístico

A continuación se detalla el resultado de las pruebas estadísticas aplicadas a los datos obtenidos.

4.1. Prueba de Normalidad a los datos de temperatura

A fin de validar los datos obtenidos de Temperatura de entrada (T_e) y Temperatura de Salida (T_s), se aplicó a estos una prueba de normalidad mediante el método Shapiro Wilk. La temperatura del aire circundante no se ha considerado debido a que es un parámetro climático muy variable sobre el cuál no se tiene control.

Asimismo, se eligieron los valores de temperatura alcanzados durante el estado estacionario, puesto que desde el primer minuto hasta este momento el sistema se encuentra en constante intercambio de calor, alcanzando recién el balance térmico en el estado estacionario.

Para cada variable se planteó la siguiente hipótesis:

H_0 : La distribución de la variable no es distinta a la distribución normal

H_A : La distribución de la variable es distinta a la distribución normal

Esta hipótesis se comprobó con un nivel de significancia de 0.05, aplicándose la prueba de normalidad “Shapiro Wilk” por tener una cantidad de datos menor de 50. Los resultados se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Resultados de la prueba de normalidad a las variables T_e y T_s .

Estadísticos	Variable medida	
	T_e	T_s
Media	35.90	43.13
Desviación estándar	0.14	0.18
Mediana	35.90	43.15
Moda	35.90	43.30
Varianza	0.02	0.03
Significancia (p)	0.258	0.096

La hipótesis nula (H_0) se rechaza si el valor “p” es menor que 0.05. En ambos casos el valor “p” fue mayor que 0.05 por lo que se acepta H_0 . De los resultados mostrados en la Tabla 8 se concluye que los valores medidos de Temperatura de entrada (T_e) y Temperatura de Salida (T_s) en el estado estacionario tienen una distribución normal, y dan validez a la eficiencia instantánea calculada a partir de dichos datos.

4.2. Regresión lineal aplicada al modelo de eficiencia instantánea

Para evaluar la validez del modelo lineal propuesto, se realizó un análisis estadístico de regresión lineal, a través del método de los mínimos cuadrados con el programa Microsoft Excel 2016.

Los resultados de este análisis se muestran en la Tabla 8. El modelo lineal de eficiencia instantánea se ajusta a la siguiente ecuación:

$$Y = \beta_1 \cdot x + \beta_0$$

Tabla 9. Estadísticas de la regresión lineal.

Característica	Valor
Coefficiente de correlación múltiple	0.99851253
Coefficiente de determinación (R ²)	0.997027272
R ² ajustado	0.996036362
Error típico	0.001023729
Observaciones	5
Término independiente (β_0)	0.452320327
Coefficiente de primer grado (β_1)	-3.322510599

De los resultados mostrados, se puede afirmar que el modelo lineal propuesto es altamente representativo de la eficiencia instantánea determinada en los ensayos, pues dicho modelo de ajuste tiene un coeficiente de determinación R² de 0.997. En la Figura 32 se puede observar como los datos de eficiencia instantánea reales prácticamente se superponen con los ajustados por el modelo de regresión.

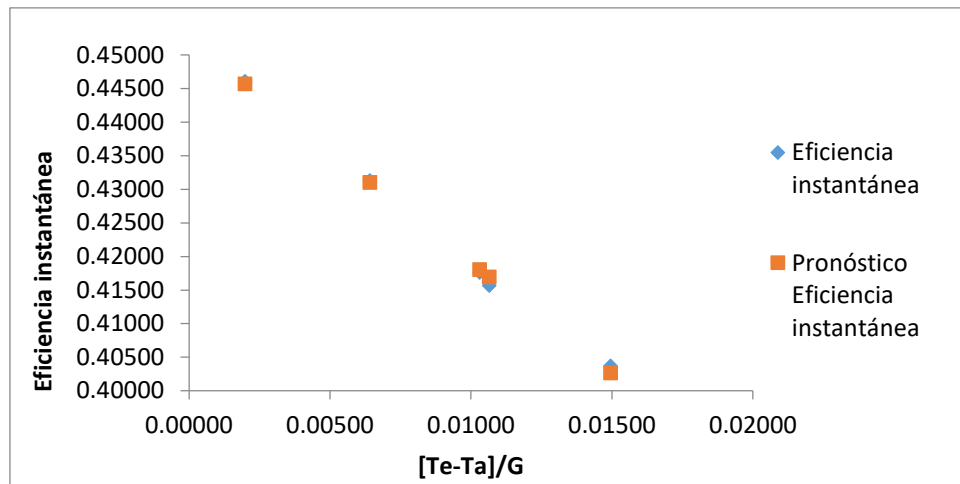


Figura 32. Curva de Regresión ajustada.

4.3. Análisis de Varianza al modelo lineal de eficiencia instantánea del CSTP

Se aplicó el Análisis de Varianza (ANOVA) para el modelo lineal de eficiencia instantánea propuesto. A partir de la ecuación:

$$Y = \beta_1 \cdot x + \beta_0$$

Se realizó el siguiente planteamiento de hipótesis:

$$H_0: \beta_1 = 0$$

$$H_A: \beta_1 \neq 0$$

Dicha hipótesis tiene por fin determinar si la variable "x" es influyente o no en la ecuación. Los resultados se muestran en la Tabla 9. Como se puede apreciar en la Tabla 9 el valor de F calculado es muy alto. Para rechazar la hipótesis nula (H_0) el valor de F calculado debe ser mayor al valor de F teórico para un nivel de significancia de 1 %.

Tabla 10. Cuadro de Análisis de Varianza (ANOVA)

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	0.001054492	0.001054492	1006.173992	0.00006885
Residuos	3	0.000003144	0.000001048		
Total	4	0.001057636			

El valor de F teórico se obtiene de tablas en función de los grados de libertad de la ecuación de regresión y de los residuos. Para este caso su valor es:

$$F_{t(0.01,1,3)} = 34.116$$

Al ser $F_c > F_t$, se rechaza la hipótesis nula, resultando ser $\beta_1 \neq 0$. Este resultado indica que la variable "x" influye directamente en la ecuación, demostrándose que la eficiencia instantánea es una función de la variable $[(T_e - T_a)/G]$.

En conclusión, las tres pruebas de análisis estadístico aplicadas confirman la realización adecuada del ensayo de rendimiento; siendo validados los valores de las variables medidas en campo y comprobándose su correlación, tal y como establece la teoría.

5. Costo estimado de producción del CSTP

A fin de determinar un precio de venta para el modelo propuesto de CSTP y posteriormente compararlo con la oferta nacional de modelos

comerciales similares, se proyectó el costo de producción para la manufactura de 60 equipos de CSTP con absorbente de acero LAF.

Los costos unitarios de los materiales se calcularon aplicando un factor de precio por volumen de producción de 0.91 para 60 unidades.

Los resultados de esta proyección se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Detalle de costo de producción estimado

Descripción	Cantidad	Costo Unit. (S/)	Costo Parcial (S/)
Vidrio templado (0.6 cm de espesor) 1 x 1.8 m.	60	105	6300
Plancha Acero LAF (0.06 cm de espesor) 1.2 x 2.4 m.	60	30	1800
Plancha galvanizada 1 x 2.5 m.	60	158	9480
Perfiles de aluminio 0.25 x 2.5 m.	60	55	3300
Aislante termoacústico 1.2 x 12 m.	30	105	3150
Tubería de cobre 3/8" x 2.5 m.	60	320	19200
Tubería de cobre 1/2" x 2.5 m.	60	55	3300
cilindro de cobre 1/2"	60	25	1500
Pintura óleo mate negro	30	30	900
Tinner	12	12	144
Silicona x 300 ml.	15	6.5	97.5
Servicio de mano de obra: corte, ensamblado, torno	1	3000	3000
Servicio de soldadura de parrilla y conectores	1	3000	3000
		Subtotal (S/)	55171.5
		Costo por unidad (S/)	919.53
		Precio base (S/)	1011.48
		Precio con IGV (S/)	1193.5

VII. DISCUSIÓN

A continuación, se compara los resultados de esta investigación con los trabajos previos descritos en el capítulo de Antecedentes de este documento, a fin de explicar las razones detrás de los hallazgos encontrados.

1. Constante de tiempo del CSTP

La determinación de la constante de tiempo es una prueba previa al ensayo de rendimiento térmico, puesto que determina el tiempo de duración del período en que el sistema se mantiene en condiciones estacionarias.

Es importante señalar que la constante de tiempo no es única y varía en función del tiempo transitorio del fluido, que depende a su vez del flujo del fluido caloportador. Para este caso, la constante de tiempo resultó en un valor de 4.66 minutos o 280 segundos aproximadamente, para un flujo de 0.02 L/s. La *NTP 300.400:2001 Colectores Solares. Método de ensayo para determinar la eficiencia de los colectores solares* menciona que debe utilizarse cinco minutos como duración mínima de un período estacionario o una constante de tiempo si es que esta última resulta mayor, por lo tanto, se utilizó el valor de cinco minutos en los ensayos de rendimiento.

La norma *UNE-EN ISO 9806:2013 Energía solar. Captadores solares térmicos. Métodos de ensayo* menciona que el período de evaluación de datos debe tener una duración de al menos cuatro veces la constante de tiempo para atenuar el prevenir que el estado inicial del captador influya en el resultado de identificación paramétrica, que, para este caso, sería aproximadamente 19 minutos, es por esta razón que en el ensayo de rendimiento inició, luego de al menos 20 minutos desde el ajuste del flujo con la tempera de entrada correcta.

En esta prueba también se pudo evaluar el tiempo que el sistema desde que el captador es expuesto a la radiación solar directa hasta alcanzar condiciones estacionarias, que resultó ser 17 minutos, ello se pudo corroborar en los siguientes ensayos.

2. Variables medidas para cálculo de eficiencia instantánea del CSTP

La irradiancia solar medida durante los períodos de ensayo superó los 790 W/m², asimismo, la variación máxima de la Irradiancia solar en períodos de 10 minutos alcanzó un máximo de ± 32 W/m², cumpliéndose en ambos casos lo requerido por la *NTP 300.400:2001 Colectores Solares. Método de ensayo para determinar la eficiencia de los colectores solares* para considerarlos como datos válidos para el ensayo de rendimiento. Sin embargo, cabe mencionar que el día 25/11/2015 antes del inicio del ensayo se presentó nubosidad media,

que gradualmente se fue despejando, por lo que, aunque no se reflejó en los datos medidos durante el ensayo, es posible que haya afectado en el normal equilibrio térmico del sistema pues ya no se alcanzó un período mínimo de cinco minutos en donde se mantengan las condiciones estacionarias.

Por otro lado, la temperatura del aire circundante (T_a) para todos los puntos de la prueba se mantuvo por debajo de $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, cumpliéndose así la condición establecida previamente para el ensayo de rendimiento. Las temperaturas variaron entre los 23.7 y $28.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, propias del clima de primavera para el distrito de Omas, en Yauyos.

Con respecto a la diferencia entre la temperatura a la salida y la temperatura a la entrada del captador ($T_s - T_e$), se observó que el mayor salto de temperatura durante un período estacionario fue de $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ para el día 13/11/2015, cuya temperatura a la entrada del captador (T_e) fue de $30.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que el menor salto de temperatura fue de $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el día 19/11/2015, donde la temperatura a la entrada del captador fue de $36\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esto se debe a que la transferencia de calor del captador hacia el fluido será más eficiente mientras menor sea la diferencia entre T_e y T_a , es por ello que con una temperatura de entrada de $30.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, cercana los $28.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura del aire circundante para este período, tuvo lugar un salto de temperatura mayor que el alcanzado con una temperatura de entrada de $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ para una temperatura del aire circundante de $23.8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3. Eficiencia instantánea

3.1. Ecuación de eficiencia instantánea del CSTP

El modelo lineal de la ecuación de eficiencia instantánea para el captador solar con absorbente de acero LAF es:

$$\eta = 0.4523 - 3.3225 \left(\frac{T_e - T_a}{G} \right)$$

La eficiencia pico calculada, como se aprecia en la ecuación anterior, es 0.4523; resultando un 33% menor al valor promedio de eficiencia pico que presentan los captadores solares comerciales, cuyos valores normalmente son mayores de 0.6.

La eficiencia pico se ve determinada por la absorción y el factor de remoción de calor del equipo (factor de eficiencia). Como lo indica la bibliografía, la absorción del acero LAF es 0.67 (Bergström, Powell, & Kaplan, 2007), considerablemente menor al 0.95 del cobre; por otro lado, los captadores comerciales suelen tener un tratamiento de pintura de superficie selectiva sobre el absorbente y la tubería interna que ayuda a tener mejores resultados de absorción que la pintura óleo negro mate, que fue la empleada en este prototipo por su mayor presencia en el mercado.

Del mismo modo, el factor de eficiencia calculado es 0.7671, por debajo del valor típico para captadores solares planos que, según

Chasseriaux (1990), se encuentra normalmente entre 0.82 y 0.85; esto se debe a la baja conductividad térmica del acero LAF, de aproximadamente $54 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ (Engineering ToolBox, 2005), ante una conductividad del cobre de $386 \text{ W/m} \cdot \text{K}$.

La técnica de adhesión también influye en el resultado, tal y como menciona Valera (2007), la adhesión de la parrilla a la placa mediante entortolado (procedimiento tradicional de unión por amarres) se puede perder hasta 9% de eficiencia respecto de una unión por soldadura. Esto se puede explicar teniendo en cuenta que la entrega de calor por conducción entre dos objetos necesita de un medio físico, cuánto mayor sea esta superficie de contacto, mejor será el intercambio de calor; en la adhesión por soldadura hay mayor área de contacto entre la placa y las tuberías que en la unión por entortolado, puesto que este último reduce su área de contacto directo a las líneas formadas entre los nueve tubos paralelos que reposan sobre la placa.

Por otro lado, el coeficiente de pérdidas globales (U) es 4.3311, un valor que se encuentra en el promedio para los captadores solares térmicos planos (entre 3.0 y 5.0), esto debido a que se utilizó una capa de poliéster de 2 y 4 cm en todas las caras interiores como aislante para el captador, un espesor mayor al usual.

Estos resultados sugieren que cualquier mejora al diseño de este prototipo de captador debe priorizar la absorción de calor, el cual

depende de la absorción de la placa y el contacto térmico; por lo tanto, si se desea mantener el absorbente de acero LAF, se podría aplicar soldadura para la unión entre la placa absorbente y la tubería; así como cambiar a una configuración de tubería continua que permita ampliar el área de contacto.

3.2. Análisis breve del mercado de captadores solares

Como se ha mencionado al inicio de esta investigación, en el mercado nacional existen diversos modelos de captadores solares térmicos planos; sin embargo, son muy pocos los que cuentan con información técnica acerca de su rendimiento térmico.

Para analizar y comparar la oferta nacional de captadores solares planos con el desarrollado para este estudio es preciso conocer la ecuación de eficiencia. Durante el desarrollo de esta investigación se solicitó la información técnica de dos empresas con presencia importante en el mercado. Sólo una de ellas pudo proporcionar la información necesaria. Esta corresponde a un captador solar de la Línea Blue, cuya eficiencia pico es 0.679. Su diseño consta de una placa absorbente de cobre con superficie selectiva TINOX, tubería de cobre unida por soldadura láser al absorbente y aislamiento de poliuretano rígido, según su ficha técnica (referenciar FT). El precio de este equipo es S/ 3,025.00 incluido IGV.

El rendimiento térmico de otro captador solar, comercializado en la región Arequipa, fue evaluado por Montoya et al. (2011), alcanzando una eficiencia pico de 0.604; pero con un coeficiente global de pérdidas de 19.92 W/m^2 , valor que se aleja demasiado de lo recomendado y se debe según el autor a un mal aislamiento térmico y un contacto deficiente entre la placa absorbente y los tubos ascendentes. La marca, modelo y precio de este equipo no fueron mencionados en la investigación.

A fin de comparar el captador en estudio con la oferta del mercado internacional en función de su rendimiento y precio, se proyectó el costo de manufactura del captador solar de acero LAF a una producción de 60 equipos para estimar su precio de venta. En la Tabla 10 se presentan las características de rendimiento en los términos del modelo cuadrático, que son los términos oficiales para comparar captadores homologados bajo la norma internacional *UNE-EN ISO 9806:2013 Energía solar. Captadores solares térmicos. Métodos de ensayo*. Para los precios de los equipos disponibles a nivel internacional se estimó un costo de importación y se convirtió el euro (€) a soles a una tasa de cambio de S/ 3.60.

Como se puede apreciar en la Tabla 10, el captador de acero LAF alcanza una eficiencia pico menor que los demás, esto debido a su composición; sin embargo, sus pérdidas de calor son ligeramente menores al resto, lo cual puede encontrar su causa en el mayor

espesor de aislamiento que se implementó en el diseño. En resumen, el proceso de calentamiento del fluido caloportador será lento pero con pocas pérdidas del calor ganado.

Tabla 11. Rendimiento y precio de captadores solares térmicos

	Prototipo	Disponible a nivel nacional	Disponible a nivel Internacional	
Variables	Acero LAF	CSB 2.0 (Blue)	SOL 200	VITOSOL 200 F SV2D
Eficiencia pico	0.4512	0.679	0.794	0.817
c1 (W/m ² /°C)	3.2161	3.5885	3.706	3.538
c2 (W/m ² /°C ²)	0.0004	0.0026	0.0137	0.023
Precio incluido IGV (S/)	1194.00	1400.00	2650.00	5370.00
Porcentaje en función de precio base (%)	85	100	189	383

El aspecto más favorable del prototipo desarrollado es su precio, un 15 % por debajo de su modelo comercial más similar, y mucho menor que el de los equipos descritos en la Tabla 10, debido principalmente al bajo costo del acero LAF en comparación al cobre. El diseño de este captador solar estuvo orientado a reducir los costos del equipo, sin que la disminución del rendimiento afecte la satisfacción de necesidades de ACS. El captador estaría pensado para su uso en localidades de alta radiación cuya población cuente con menor poder adquisitivo, a quienes el costo de inversión inicial suele desanimarlos en el uso de esta tecnología pese a su alto potencial aprovechamiento de energía solar.

VIII. CONCLUSIONES

Con respecto al rendimiento del captador solar térmico plano (CSTP) con placa absorbente de acero LAF, se concluye que:

- Alcanza una eficiencia pico de 45.23 % y posee un coeficiente global de pérdidas de $4.1 \text{ W/m}^2/\text{°C}$.
- La eficiencia pico de este prototipo es baja en comparación a los modelos de captadores comerciales disponibles a nivel local; sin embargo, debido al aislamiento utilizado en el diseño, su pérdida global de calor compite, incluso, con la de captadores ofrecidos en el mercado internacional.
- En resumen, el prototipo evaluado tarda más en calentar el agua que los modelos comerciales, pero conserva mejor el calor, por lo que llega a satisfacer las necesidades de agua caliente sanitaria.

En lo referido al aspecto económico, este prototipo tiene un costo de producción de S/ 919.53 y un precio de venta de S/ 1194.00 siendo económicamente más accesible (15% más barato) que sus similares comerciales.

Finalmente, en términos de rendimiento térmico, el CSTP de acero LAF resultó ser menos eficiente que los modelos comerciales disponibles en el mercado local; sin embargo, en términos económicos, por su menor precio constituye una alternativa más

accesible para poblaciones con limitado poder adquisitivo, que a su vez, residan en zonas rurales donde la energía solar disponible sea alta. El diseño actual puede ser mejorado tanto para reducir su costo de producción, como para incrementar su rendimiento.

IX. RECOMENDACIONES

A fin de profundizar a futuro los aspectos más resaltantes de esta investigación, se formularon las siguientes recomendaciones:

- Realizar un estudio de caracterización óptica para determinar el valor exacto de la absortancia de la placa de acero LAF con tratamiento superficial de pintura negra óleo mate.
- Para próximas evaluaciones de rendimiento térmico al aire libre elegir la estación de otoño, si el estudio se realiza en sierra, o verano, si se desarrolla en costa, para así reducir el número de días de evaluación perdidos por cielo nublado. Asimismo, utilizar un equipo *datalogger* integrador con entrada múltiple para las termocuplas, para registrar cambios de temperatura en intervalos menores de tiempo y con mayor exactitud.
- En cuanto a las mejoras aplicables al diseño del captador se recomienda amoldar la placa de Acero LAF a la semicircunferencia de los tubos ascendentes mediante la técnica de embutición de metales, lo cual puede hacerse de forma modular en fragmentos de placa de 0.3 x 0.4 m, estas modificaciones incrementarán la superficie de contacto para la transferencia de calor y una mayor facilidad para ensamblar la placa absorbente a la parrilla de cobre.

- Para reducir el costo de producción del captador, se sugiere buscar alternativas más baratas en los materiales de protección del captador como son la carcasa de aluminio galvanizado y el vidrio templado.

X. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anak Sup, B. (2010). *Effect of Absorber Plate Material on Flat Plate Collector Efficiency*. Malaysia.

Aranda Usón, A. (2009). *Energía solar térmica (Serie Energías renovables)*. Zaragoza: Prensas Universitarias de Zaragoza.

Asociación Española de Normalización y Certificación. (2013). *Energía solar. Captadores solares térmicos. Métodos de ensayo (ISO 9806:2013)*. Madrid: AENOR.

AVEN. (2008). *Guía práctica de Energía Solar Térmica*. Valencia.

Barriga R., A., Delgado P., E., Guevara , J., Peralta , J., Naranjo , M., & Villalta , K. (2014). *Introducción al Estudio de Fuentes Renovables de Energía* (1era ed.). Iniciativa Latinoamericana de Libros de Texto Abiertos (LATIn).
Obtenido de:
http://www.proyectolatin.org/books/Energias_Renovables_CC_BY-SA_3.0.pdf

Becerra, A., Barba-Ortega, J., & Rodríguez M., R. (2010). Construcción y evaluación de un colector solar con tubos de calor y efecto doble ventana. *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 8(1), 48-52.

Bergström, D., Powell, J., & Kaplan, A. (2007). The absorptance of steels to Nd: YLF and Nd: YAG laser light at room temperature. *Applied Surface Science*, 253(11), 5017-5028.

Billy, A. S., Tanti, S., Mohd, F., & Rosli, A. (2014). Experimental Study of Water Heating Efficiency between Aluminium and Copper Absorber Plate in Solar Flat Plate Collector. *Applied Mechanics and Materials*, 660, 709-713.

Brunold, S., Frey, R., & Frei, U. (1994). A comparison of three different collectors for process heat applications. *Optical Materials Technology for Energy Efficiency and Solar Energy Conversion, XIII*, 107-118.

Chasseriaux, J. M. (1990). *Conversión térmica de la radiación solar*. Paris.

Cleanergysolar. (28 de noviembre de 2011). *Cleanergysolar*. Obtenido de <http://www.cleanergysolar.com/2011/11/28/calculo-de-la-superficie-colectora-solar-termica-parte-4-de-5/>

De Felipe, J. J., & López, J. A. (1999). *Sistemas solares térmicos*. Barcelona: Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya.

Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie. (2010). *Planning and Installing Solar Thermal Systems: A Guide for Installers, Architects, and Engineers* (Second ed.). London: Earthscan.

Díaz V., J. (2015). *Sistemas de energías renovables*. España: Ediciones Paraninfo SA.

Duffie, J., & Beckman, W. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes* (Fourth edition ed.). U.S.A.: John Wiley & Sons, Inc.

ECA Instituto de Tecnología y Formación. (2008). *Energía Solar Térmica*. Madrid: Fundación Confemetal Editorial.

Elías C., X. (2012). *Sistemas de tratamiento térmico. La incineración: Tratamiento y valorización energética de residuos*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.

Elías C., X., & Bordas A., S. (2012). *Energías renovables: Energía, Agua, Medioambiente, territorialidad y Sostenibilidad*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.

Engineering ToolBox. (2005). *Thermal Conductivity of Metals*. Recuperado el 11 de 12 de 2017, de https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-metals-d_858.html

Escobar, R., Gamio, P., Moreno, A., Castro, A., Cordero, V., & Vásquez, U. (2016). *Energización rural mediante el uso de energías renovables para fomentar un desarrollo integral y sostenible. Propuestas para alcanzar el*

acceso universal a la energía en el Perú. Lima, Perú: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

Fallas, J. (2012). Prueba de Hipótesis. Rechazar o no Ho: he ahí el dilema. *Creative Commons.*

Fauroux, L., & Jagër, M. (2013). Diseño y Análisis de Colectores Solares Planos.

Fischer, S., & Steinhagen, H. M. (2002). Collector test method under quasi-dynamic conditions according to the European Standard EN-12975-2. *ISES 2001 Solar World Congress.*

FUNIBER. (2012). *Curso Aplicación de las Energías Renovables.* España.

García, S. (2012). Principios de funcionamiento de las centrales solares termoeléctricas. En FENERCOM, *Guía técnica de la energía solar termoeléctrica* (págs. 13-50). Madrid.

Horn, M. (Noviembre de 2006). El estado actual del uso de la energía solar en el Perú. *perúeconómico*, XXIX(11), 10-11.

Incropera, F., & DeWitt, D. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor.* Pearson Educación.

INDECOPI. (2001). *NTP 399.400:2001 COLECTORES SOLARES. Método de ensayo para determinar la eficiencia de los colectores solares*. Lima.

Instituto Nacional de Estadística e Informática - INEI. (2007). *Censos Nacionales 2007 : XI de Población y VI de Vivienda*. Perú.

Instituto Nacional de Estadística e Informática - INEI. (2018). *Perú: Formas de acceso al agua y saneamiento básico*. Lima, Perú.

Inter-American Development Bank [IDB]. (2013). *Sustainable Energy for All. Peru: Rapid Assessment and Gap Analysis*. IDB.

IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.

IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Geneva, Switzerland.

ISO. (1994). *ISO 9806-1:1994 Test methods for solar collectors Part 1: Thermal performance of glazed liquid heating collectors*.

Jutglar, L., & Galán, M. (2012). *Termotecnia*. Barcelona: Marcombo Universitaria.

López M., G. A., Mantilla L., J. A., & Poveda S., B. H. (Octubre de 2012).

Evaluación de un calentador solar de agua fabricado con tubería PVC en serie y envases pet translucidos. *Tecnura*, 16, 120-128.

Martínez, J., Noceto, P., & Suárez, R. (2013). *Manual Técnico de Energía Solar*

Térmica. Volumen II: Aspectos técnicos y normativos. Montevideo - Uruguay: Facultad de Ingeniería, Universidad de la República.

Mathioulakis, E., Vorpoulos, K., & Belessiotis, V. (2000). Uncertainty in solar

collector testing results. *ISES Solar World Congress 1999, Volume III*, 56-61.

Mathner, F., & Weiss, W. (2014). *Solar Heat Worldwide: Markets and*

Contribution to the Energy Supply 2012. Gleisdorf, Austria: Steinhuber Infodesign.

Montoya, L. A., Palo, J. E., Cabana, W. R., & Soria, L. (2011). Evaluación de un

calentador solar de agua de acuerdo a Norma Técnica Peruana. *XVIII Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente*.

Paz, J. (2006). *Colectores solares planos. Tratamiento teórico*. Juárez:

Univesidad Autónoma de ciudad Juárez.

Plazas, C., Moreno, N., & Sánchez, C. (2001). Diseño, construcción y evaluación de un colector solar de placa plana con parámetros de rendimiento modificables. *Revista Colombiana de Física*, 33(2), 263-267.

PNUD, PNUMA, UICN e IM. (2016). *El futuro ancestral: la adaptación basada en ecosistemas*. Lima.

PNUMA. (2012). *Perspectivas del Medio Ambiente Mundial 5*.

Polo Bravo, C. A., & Torres Muro, H. A. (1995). Métodos experimentales para la evaluación de colectores y termas solares. *Memorias del XII Simposio Peruano de Energía Solar (SPES)*.

Presidencia del Consejo de Ministros - PCM. (2015). *Plan Multisectorial ante Heladas y Frijaje 2015*. Lima, Perú.

Presidencia del Consejo de Ministros - PCM. (Setiembre de 2018). *Portal del Estado Peruano*. Recuperado el Setiembre de 2018, de Municipalidad Distrital de Omas:

http://www.peru.gob.pe/Nuevo_Portal_Municipal/portales/Municipalidades/1436/entidad/pm_municipalidad.asp

Rodríguez , J., López, F., Araiza, M., Olvera, C., & Dorrbercker , S. (2016). Diseño de un colector solar de placa plana. *Ingeniería Energética*, 15-24.

Roldán, J. (2013). *Organización y montaje mecánico e hidráulico de instalaciones solares térmicas*. España: Ediciones Paraninfo S.A.

Rufes M., P. (2012). *Energía Solar Térmica: Técnicas para su Aprovechamiento*. Barcelona: Marcombo.

Sabatelli, V., Marano, D., Braccio, G., & Sharma, V. (2002). Efficiency test of solar collectors: uncertainty in the estimation of regression parameters and sensitivity analysis . *Energy Conversion and Management*, 2287-2295.

Sancho, J., Riesco, J., Jiménez, C., Sánchez de Cos, M., Montero, J., & López, M. (2012). *Atlas de radiación solar en España utilizando datos del SAF de clima de EUMETSAT*. España: Agencia Estatal de Meteorología.

Sarmiento, P. (2007). *Energía solar en arquitectura y construcción*. Chile: RIL Editores.

SENAMHI. (2003). *Atlas de Energía Solar del Perú*. Lima.

SENAMHI. (Setiembre de 2018). *SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ* . Obtenido de Mapa Climático del Perú: <https://www.senamhi.gob.pe/site/sea/www/?p=mapa-climatico-del-peru>

Thekaekara, M., & Drummond, A. (1971). Standard values for the Solar Constant and its spectral components. *Nature Physical Science* 229, 6-9.

Valera P., A. (2007). *Energía Solar II*. Lima - Perú: Asamblea Nacional de Rectores.

Visiedo, J. (2010). *Diseño y construcción de un equipo de experimentación en energía solar térmica*. Catalunya, España: Universitat Politècnica de Catalunya.

Volker Quaschnig. (Mayo de 2003). 2003. *Renewable Energy World*, 90-93.

Obtenido de:

http://www.volker-quaschnig.de/articles/fundamentals1/index_e.php

Walsh, M., & Lin, W. (2015). A Parametric Study on the Thermal Performance of Unglazed Solar Water Collectors with Their Colorbond Steel Absorber Plates Also Used as Roofs. *International Journal of Green Energy* , 1309-1322.

Weather Spark. (Setiembre de 2018). *Weather Spark*. Obtenido de El clima promedio en Yauyos Perú: <https://es.weatherspark.com/y/22236/Clima-promedio-en-Yauyos-Per%C3%BA-durante-todo-el-a%C3%B1o#Sections-WaterTemperature>

XI. GLOSARIO

a. Absortancia solar (α)

Cuando incide radiación sobre un cuerpo, una parte de la radiación es absorbida y el resto es reflejada, La absortancia es la relación entre la radiación absorbida y la radiación incidente. Estos valores varían entre 0 y 1. siendo 1 para un cuerpo negro (Rufes M., 2012).

b. Acero LAF

Acero negro laminado en frío. Variedad de acero dulce (bajo en carbono).

c. Calor específico del fluido caloportador

Cantidad de calor que por unidad de masa necesita una sustancia para que su temperatura se eleve un grado centígrado.

d. Caudal de flujo

Volumen de fluido que pasa en la unidad de tiempo a través de una sección transversal de una corriente. Debe mantenerse constante para fines del ensayo.

e. CSTP

Abreviatura de "Captador Solar Térmico Plano". Tipo de captador solar térmico cuyo componente principal consta de una placa absorbente metálica que transfiere el calor hacia el fluido

caloportador que circula a través de una tubería adosada a la misma placa.

f. Eficiencia pico o eficiencia óptica

En términos de la norma *UNE-EN-ISO 9806:2013 Energía solar. Captadores solares térmicos. Métodos de ensayo*, se trata de la eficiencia del captador cuando la diferencia entre la temperatura media del captador y la temperatura del aire circundante es cero a un ángulo de incidencia de la radiación solar normal a la superficie captadora. Representa la eficiencia máxima del captador.

g. Eficiencia instantánea

Se define como el cociente entre la potencia útil real extraída y la energía solar interceptada por el captador, esta puede ser representada como una ecuación lineal o de segundo orden en función de la temperatura del fluido caloportador y la irradiancia solar. También se utiliza simplemente el término “eficiencia instantánea” en el contexto de captadores solares.

h. Factor de eficiencia

También denominado “factor de remoción del calor”, representa la relación entre la ganancia de energía útil real de un captador con la ganancia útil que se obtendría si toda la superficie del colector estuviera a la temperatura de entrada del fluido.

i. Fluido caloportador

Aire, agua u otro fluido que pasa a través de un captador, o que está en contacto con él, extrayendo la energía térmica captada (Elías C., 2012).

j. Intercambiador en paralelo

Distribución en paralelo de los tubos al interior del captador solar de flujo líquido. El fluido va acumulando temperatura a medida que recorre el intercambiador, si se añaden más captadores dispuestos en serie esto causará una pérdida de eficiencia en los captadores siguientes.

k. Intercambiador continuo

Este tipo de distribución consiste en una sola tubería que recorre el interior del captador, absorbiendo el calor a lo largo de su recorrido. Cuando se utiliza un sistema de captadores en esta distribución el rendimiento disminuye significativamente después del tercer captador, pues cada vez ingresa agua con mayor temperatura, por lo tanto, la energía que puede absorber es menor.

l. Irradiación

Energía incidente por unidad de superficie sobre un plano dado, obtenida por integración de la irradiancia durante un intervalo de

tiempo dado, normalmente una hora o un día. Se expresa en MJ/m²/día o kWh/m²/día (AVEN, 2008).

m. Irradiancia solar

Potencia solar incidente total por unidad de superficie sobre un plano dado. Se expresa en W/m².

n. Irradiancia solar difusa

Irradiancia de la radiación solar difusa sobre una superficie receptora plana. Junto a ella se debe especificar la inclinación y el azimut de la superficie receptora (Aranda Usón, 2009).

o. Irradiancia solar reflejada

Radiación por unidad de tiempo y área que incide sobre un objeto y procede de la reflexión de la radiación solar en el suelo y otros objetos (Aranda Usón, 2009).

p. Radiación solar

Se refiere a la energía procedente del sol en forma de ondas electromagnéticas.

q. Radiación solar directa

Radiación solar que incide sobre un plano dado, procedente de un pequeño ángulo sólido centrado en el disco solar.

r. Radiación solar difusa

La diferencia entre la radiación solar hemisférica y la radiación solar directa.

s. Radiación solar global

Radiación solar hemisférica recibida en un plano horizontal.

t. Radiación solar hemisférica

Radiación solar incidente en una superficie dada, definida por su azimut e inclinación, recibida desde un ángulo sólido de 2π sr (estereorradián) del hemisferio situado por encima de la superficie (Aranda Usón, 2009). Es la suma de la radiación solar directa y la difusa.

u. Rendimiento térmico

Se refiere al concepto del rendimiento de una máquina (en este caso sería el captador solar térmico) la cual nos devuelve en forma útil sólo una parte de la energía que recibe para realizar su trabajo. En términos de la norma *UNE-EN-ISO 9806:2013 Energía solar. Captadores solares térmicos. Métodos de ensayo*, el ensayo de rendimiento térmico está representado por el modelo matemático de la ecuación de eficiencia instantánea.

v. *Transmitancia*

Es la fracción de energía que atraviesa un cuerpo. Para cuerpos opacos la transmitancia es cero. para cuerpos transparentes. su valor es cercano a 1 (Sarmiento, 2007).

XII. ANEXOS

ANEXO 1. Certificado de Calibración del solarímetro.

TENMARS ELECTRONICS CO., LTD.

SALES OFFICE: 6F 586 RUI GUANG ROAD, NEIHU, TAIPEI, TAIWAN, R.O.C.

TEL: +886-2-2658-5770 FAX: +886-2-2658-5075 E-mail: services@tenmars.com

WEBSITE: <http://www.tenmars.com>

CALIBRATION & TEST CERTIFICATE

No.130701636

Date of Issue: Jan. 12, 2015

To whom it my concern:

We hereby certify that the instrument under mentioned has been certainly calibrated according to our calibration standard and the testing result in the calibration procedure has been good enough within the tolerance regulated in our specification.

Name of Model : SOLAR POWER METER

Temperature : 22.5°C

Model Number : TM -206

Humidity : 62.8%

Serial Number : 140403288

Date of Calibration : Jan. 12, 2015

Test Data : as under

Inspector : CARY

Range	Indication	Calibration Point	Tolerance	Result
W/m2	100.4	100	96.0~104.0	Pass
W/m2	803	800	760~840	Pass
BTU(ft2*h)	31.7	31.5	30.5~33.0	Pass
BTU(ft2*h)	253	251	241~264	Pass

Calibrators used for calibration and testing:

Name of Model	Model Number	Serial Number	Due Date
Standard Pyranometer	Hukseflux SR11	7109	Jan. 12, 2016

(The standard generators used for calibration procedure are proofed once a year and can be traceable to the standard authorized by public organization.)

TENMARS ELECTRONICS CO., LTD.

Jia Ming Wu

Manager, Quality Control Dept.

ANEXO 2. Certificado de Calibración de los pirómetros.

General Industrial Controls Private Limited



EC & RoHS Declaration of Conformity

We,

General Industrial Controls Private Limited, T-107, MIDC, Bhosari, Pune 411 026 (Maharashtra State) India +91-20-30680011, +91-20-27122574, marketing@gicindia.com, www.gicindia.com; declare under sole responsibility that the following described products in our delivered version comply with the appropriate basic safety and health requirements of the:

1. Low Voltage Directive : 2014/35/EU
2. EMC Directive : 2014/30/EU
3. RoHS Directive : 2011/65/EU based on its design and type, as brought into circulation by us.

(In case of alteration of the machine, not agreed upon by us, this declaration will lose its validity.)

Description of the Product:

Series & Nomenclature: Temperature Controller - Series PR-69
 Catalog Numbers & Product Revision: 151A12B, 151B12B, 151C12B, 151D12B, 151A13B1, 151B13B1, 151C13B1, 151D13B1, 151A13B, 151B13B, 151C13B, 151D13B .
 Revision - R022
 Device Firmware Version: V177


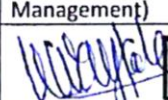
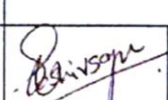

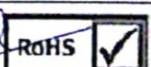
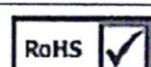
Applicable Harmonized Standards: Under EMC & LVD Directives:

Ref. No.	Title
IEC 61000-4-2	Electrostatic Discharge (ESD) Immunity Test
IEC 61000-4-3	Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test
IEC 61000-4-4	Electrical Fast Transient / Burst immunity test
IEC 61000-4-5	Surge Immunity test
IEC 61000-4-6	Conducted Susceptibility (Immunity to conducted disturbances, induced by radio-frequency fields)
IEC 61000-4-8	Power frequency magnetic field Immunity test
IEC 61000-4-11	Voltage dips, short Interruptions & Voltage variations immunity tests for AC input ports
IEC 61010-1	DI-electric Strength (Safety requirements for electrical equipment for measurement, control, and Laboratory use)
CISPR-11/14-1	Conducted & Radiated Emissions

RoHS Directive 2011/65/EC of the European Parliament & of the council regarding the limitation of dangerous substances, Year in which CE Marking was affixed: 2015

Name of Company: General Industrial Controls Pvt. Ltd.

Date: 25-01-2015

Name of Signatory: Rajan Rane Title / Designation: Asst. Manager (Product Engg)	Name of Signatory: Vijay Waykole Title / Designation: General Manager (Material Management)	Name of Signatory: Shrihari kshirsagar. Title / Designation: Manager (Quality)
		
		

Document Ref. No: EC0V117

T-107, M.I.D.C., Bhosari, Pune, 411 026, INDIA. Tel: +91 (0) 20 3068 0000 – 29 Fax: 91 (0) 27122574

ANEXO 3. Presupuesto de la Investigación.

Descripción	Unidad	Cant.	Costo Unit. (S/.)	Costo Parcial (S/.)
Captador Solar				
Vidrio templado (0.6 cm de espesor) 1 x 1.8 m	m ²	2	63,00	126,00
Plancha Acero LAF (0.06 cm de espesor) 1.2 x 2.4 m	unidad	1	34,00	34,00
Plancha galvanizada 1 x 2.5 m	unidad	1	55,00	55,00
Perfiles de aluminio 0.25 x 2.5 m	Unidad	1	60,00	60,00
Aislante termoacústico 1.2 x 12 m	unidad	1	90,00	90,00
Tubería de cobre 3/8" x 2.5 m.	m	3	110,00	330,00
Tubería de cobre 3/4" x 2.5 m.	m	1	60,00	60,00
cilindro de cobre 3/4"	cm	8	4,00	32,00
Pintura óleo mate negro	Gal	1	34,00	34,00
Tinner	Gal	1	15,00	15,00
Silicona x 300 ml.	Unidad	1	8,00	8,00
Servicio de mano de obra	Unidad	1	220,00	220,00
Servicio de soldadura de parrilla	Unidad	1	120,00	120,00
Servicio de torno de conectores	Unidad	1	30,00	30,00
Servicio de soldadura de conectores	Unidad	1	40,00	40,00
Conexiones y accesorios				
Tubo de PVC 3/4" agua fría x 5m.	Unidad	1	17,00	17,00
Tubo de PVC 3/4" agua caliente x 5m.	Unidad	1	28,00	28,00
Codos PVC 3/4" de 90°	Unidad	4	0,60	2,40
Válvula bola pesada 3/4"	Unidad	1	27,00	27,00
Adaptador 3/4" a 1/2" hembra	Unidad	1	1,50	1,50
Tanque de plástico 50 lts	Unidad	1	50,00	50,00
Tanque de plástico 150 lts	Unidad	1	100,00	100,00
Perfil de fierro 1.2 x 1.18 cm x 6 m	Unidad	2	27,00	54,00
Llave esférica botadero 1/2"	Unidad	1	25,00	25,00
Tapones hembra	Unidad	2	1,50	3,00
Bomba de 0.5 HP diámetro de 1/2"	Unidad	1	125,00	125,00
Sistema de medición				
Medidor de volumen de agua	Unidad	1	60,00	60,00
Solarímetro	Unidad	1	495,00	495,00
Termocupla tipo J	Unidad	2	45,00	90,00
Pirómetros	Unidad	2	255,00	510,00
Mini estación meteorológica	Unidad	1	300,00	300,00
			Imprevistos (10%)	422,54
			TOTAL	3439,44

ANEXO 4. Universo de datos medidos.

Fecha	Hora	Radiación Solar (W/m ²)	Temperatura de Entrada (°C)	Temperatura del aire circundante (°C)	Temperatura de Salida (°C)
13-Nov-15	11:40	924	27.3	27.1	32.1
13-Nov-15	11:41	921	27.6	27.2	33.6
13-Nov-15	11:42	921	27.5	27.3	34
13-Nov-15	11:43	921	27.5	27.4	35
13-Nov-15	11:44	922	27.6	27.4	35.4
13-Nov-15	11:45	923	27.8	27.4	35.7
13-Nov-15	11:46	924	27.9	27.5	36.3
13-Nov-15	11:47	926	27.9	27.6	36.3
13-Nov-15	11:48	931	27.9	27.6	36.8
13-Nov-15	11:49	933	28	27.6	37
13-Nov-15	11:50	935	28.2	27.8	37.1
13-Nov-15	11:51	932	28.4	27.8	37.4
13-Nov-15	11:52	932	28.4	27.9	37.6
13-Nov-15	11:53	930	28.6	28.1	37.6
13-Nov-15	11:54	929	29	28.2	38.2
13-Nov-15	11:55	928	29.6	28.3	38.1
13-Nov-15	11:56	928	30	28.3	38.1
13-Nov-15	11:57	929	30	28.3	38.2
13-Nov-15	11:58	928	29.9	28.4	38.4
13-Nov-15	11:59	928	30	28.3	38.8
13-Nov-15	12:00	930	30.1	28.3	39.1
13-Nov-15	12:01	936	30.2	28.3	39.1
13-Nov-15	12:02	939	30.1	28.2	39.3
13-Nov-15	12:03	949	30.1	28.1	39.4
13-Nov-15	12:04	949	30.2	28.1	40
13-Nov-15	12:05	948	30.4	28.1	40.2
13-Nov-15	12:06	946	30.4	28.1	40.6
13-Nov-15	12:07	948	30.6	28.1	40.8
13-Nov-15	12:08	949	30.9	28	41.3
13-Nov-15	12:09	946	30.9	27.9	41.5
13-Nov-15	12:10	939	31.1	27.9	41.5
13-Nov-15	12:11	941	31.1	27.9	42.3
13-Nov-15	12:12	937	31.1	27.9	42.6
13-Nov-15	12:13	936	31.5	27.9	42.9
13-Nov-15	12:14	931	31.8	27.9	43.1
13-Nov-15	12:15	930	31.9	27.9	43.2
13-Nov-15	12:16	928	31.8	27.9	43.3
13-Nov-15	12:17	925	31.8	27.9	43.2
13-Nov-15	12:18	923	31.8	27.9	43.7
13-Nov-15	12:19	917	32	27.8	43.8
13-Nov-15	12:20	914	32.2	27.9	43.9

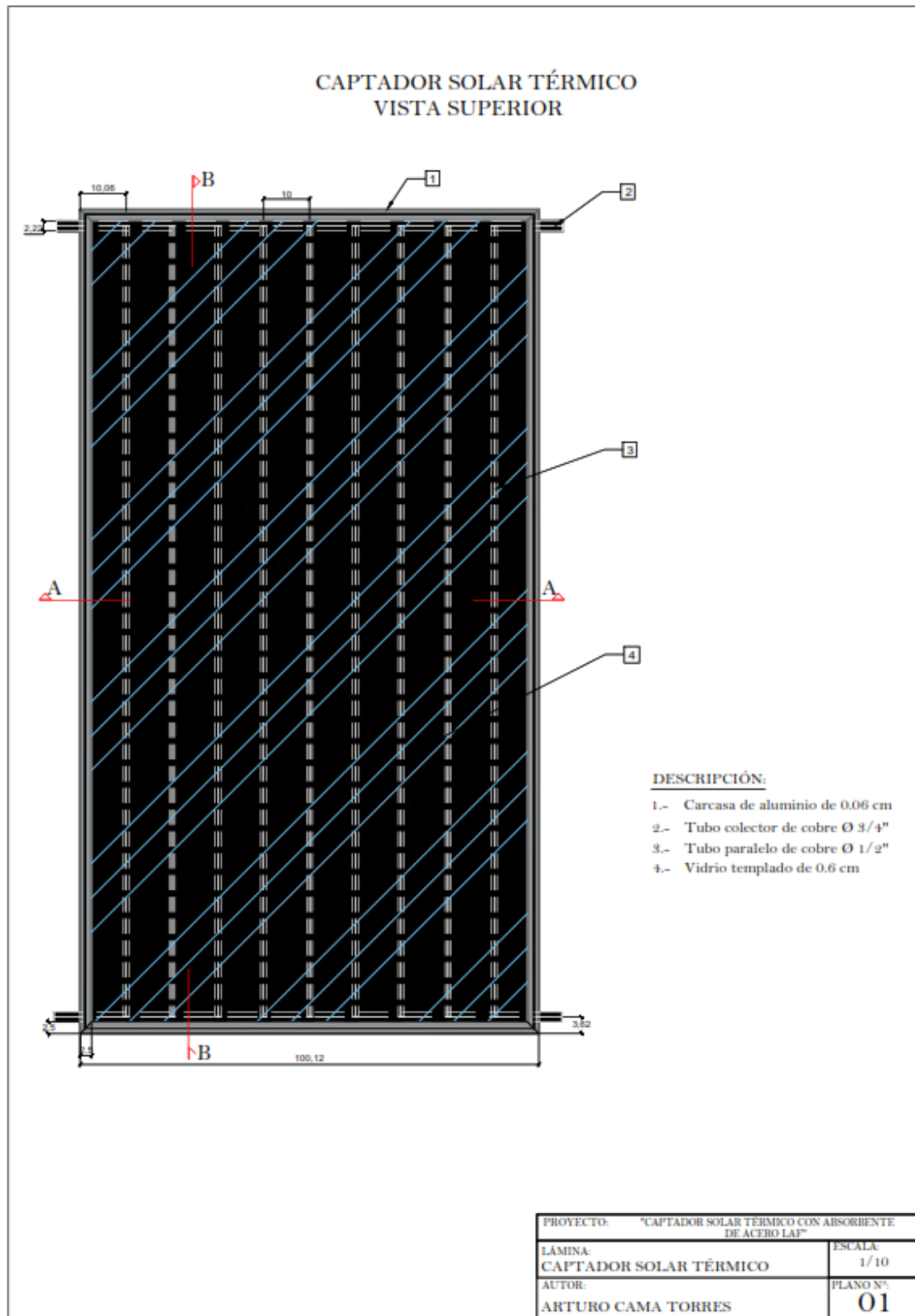
Fecha	Hora	Radiación Solar (W/m ²)	Temperatura de Entrada (°C)	Temperatura del aire circundante (°C)	Temperatura de Salida (°C)
13-Nov-15	12:21	910	32.2	27.9	44
13-Nov-15	12:22	907	32.2	27.9	44.1
13-Nov-15	12:23	903	32.4	27.9	44.2
13-Nov-15	12:24	894	32.8	27.8	44.3
13-Nov-15	12:25	893	32.8	27.8	44.3
13-Nov-15	12:26	886	33	27.8	44.4
13-Nov-15	12:27	884	33.1	27.8	44.4
13-Nov-15	12:28	882	33.2	27.7	44.4
13-Nov-15	12:29	878	33.2	27.7	44.4
13-Nov-15	12:30	881	33.2	27.7	44.5
13-Nov-15	12:31	885	33.3	27.7	44.5
13-Nov-15	12:32	888	33.4	27.7	44.6
13-Nov-15	12:33	898	33.4	27.8	44.7
13-Nov-15	12:34	811	33.6	27.6	44.8
13-Nov-15	12:35	439	33.9	27.7	44.4
13-Nov-15	12:36	3.4	34	27.6	43.4
19-Nov-15	11:40	821	34.9	24.1	35.2
19-Nov-15	11:41	821	35	24.1	35.7
19-Nov-15	11:42	822	35.2	24.2	36.5
19-Nov-15	11:43	821	35.2	24.3	36.8
19-Nov-15	11:44	824	35.1	24.1	37.6
19-Nov-15	11:45	824	35.1	24.1	38.1
19-Nov-15	11:46	824	34.8	24.1	38.1
19-Nov-15	11:47	824	35.1	24.1	39.3
19-Nov-15	11:48	824	35.1	24.1	39.7
19-Nov-15	11:49	827	35.1	24.1	39.8
19-Nov-15	11:50	827	35	24.1	39.7
19-Nov-15	11:51	827	35.1	24.1	40.1
19-Nov-15	11:52	826	35.1	23.9	40.4
19-Nov-15	11:53	826	35.1	23.9	40.8
19-Nov-15	11:54	827	35.2	23.9	41.1
19-Nov-15	11:55	826	35.1	23.8	41.5
19-Nov-15	11:56	826	35.3	23.8	41.6
19-Nov-15	11:57	827	35.3	23.8	41.7
19-Nov-15	11:58	824	35.4	23.8	41.9
19-Nov-15	11:59	824	35.7	23.8	42.4
19-Nov-15	12:00	822	35.8	23.8	42.5
19-Nov-15	12:01	823	35.8	23.8	42.7
19-Nov-15	12:02	820	35.9	23.8	42.9
19-Nov-15	12:03	822	36	23.8	42.8
19-Nov-15	12:04	821	36.1	23.8	43.1
19-Nov-15	12:05	815	35.9	23.8	43.1
19-Nov-15	12:06	813	35.9	23.8	43.3

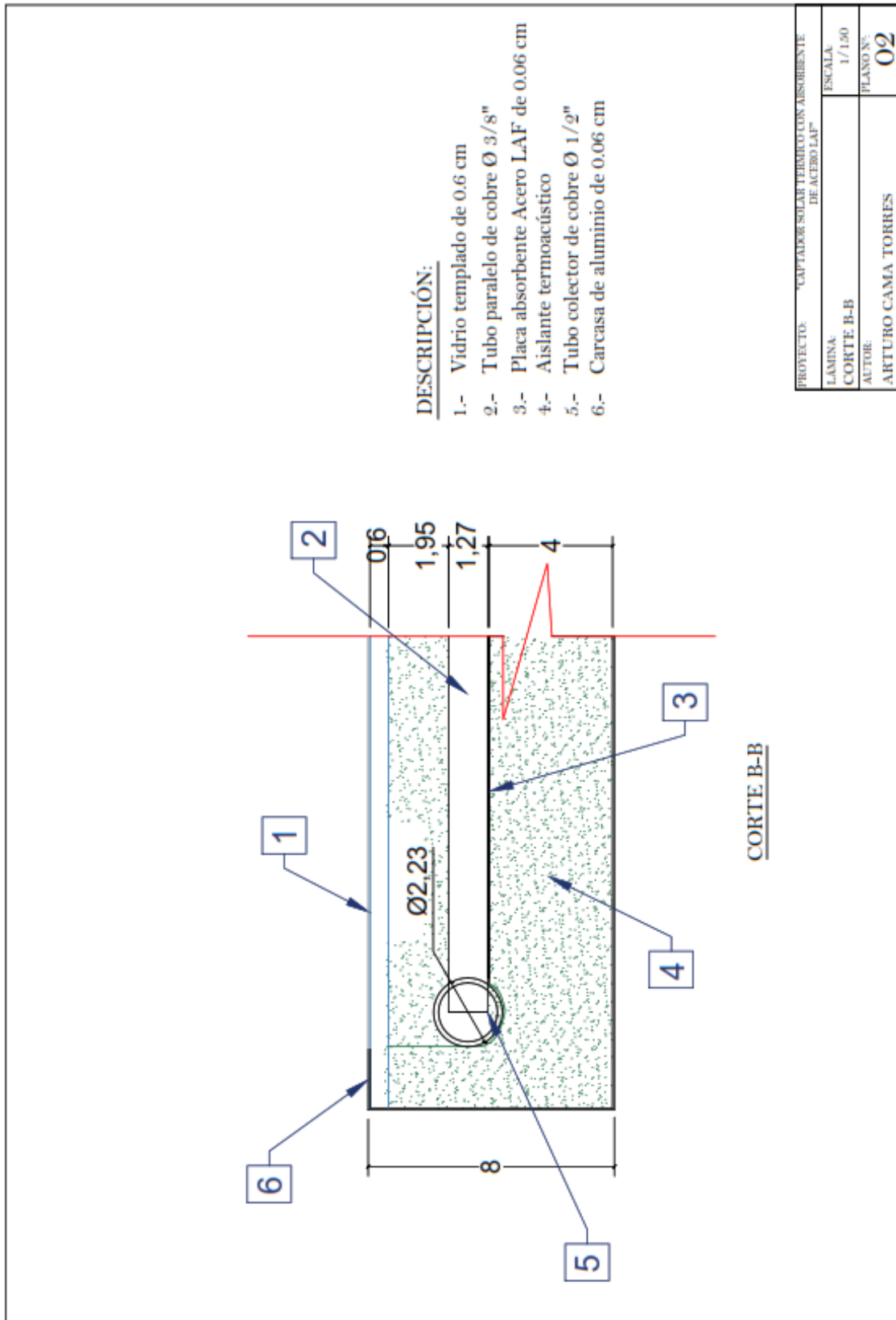
Fecha	Hora	Radiación Solar (W/m ²)	Temperatura de Entrada (°C)	Temperatura del aire circundante (°C)	Temperatura de Salida (°C)
19-Nov-15	12:07	805	36.1	23.9	43.3
19-Nov-15	12:08	810	36.2	23.8	43.4
19-Nov-15	12:09	811	36.3	23.8	43.5
19-Nov-15	12:10	811	36.4	23.7	43.4
19-Nov-15	12:11	810	36.5	23.8	43.6
19-Nov-15	12:12	810	36.6	24	43.8
19-Nov-15	12:13	811	36.7	24.2	43.9
19-Nov-15	12:14	811	36.7	24.2	44
19-Nov-15	12:15	810	36.7	24.3	44.1
19-Nov-15	12:16	808	36.9	24.3	44.1
19-Nov-15	12:17	807	37	24.2	44.1
24-Nov-15	12:30	870	31	23.9	30.5
24-Nov-15	12:31	875	31.3	23.9	30.7
24-Nov-15	12:32	876	31.3	23.9	30.7
24-Nov-15	12:33	879	31.3	23.9	31.2
24-Nov-15	12:34	820	31	23.9	32.5
24-Nov-15	12:35	915	30.8	23.9	33.9
24-Nov-15	12:36	897	31.3	24	35.5
24-Nov-15	12:37	913	31.4	24.1	36.3
24-Nov-15	12:38	901	31.1	24	36.9
24-Nov-15	12:39	902	31.2	24.1	37.2
24-Nov-15	12:40	905	31.3	24.1	37.7
24-Nov-15	12:41	914	31.3	24	38
24-Nov-15	12:42	918	31.3	23.9	38.2
24-Nov-15	12:43	922	31.6	24.1	38.5
24-Nov-15	12:44	925	31.5	24.1	38.8
24-Nov-15	12:45	929	31.6	24.2	39
24-Nov-15	12:46	931	31.8	24.3	39.4
24-Nov-15	12:47	937	32	24.3	39.4
24-Nov-15	12:48	909	32	24.4	39.7
24-Nov-15	12:49	938	32	24.4	39.8
24-Nov-15	12:50	930	32.2	24.4	40
24-Nov-15	12:51	920	32.6	24.5	40.1
24-Nov-15	12:52	910	32.5	24.5	40.5
24-Nov-15	12:53	908	32.6	24.5	40.5
24-Nov-15	12:54	905	32.8	24.5	40.7
24-Nov-15	12:55	900	32.9	24.5	40.8
24-Nov-15	12:56	897	32.9	24.4	40.9
24-Nov-15	12:57	885	33.3	24.5	41
24-Nov-15	12:58	878	33.3	24.4	41.1
24-Nov-15	12:59	867	33.4	24.4	41.3
24-Nov-15	13:00	859	33.5	24.5	41.3
24-Nov-15	13:01	850	33.5	24.5	41.5

Fecha	Hora	Radiación Solar (W/m ²)	Temperatura de Entrada (°C)	Temperatura del aire circundante (°C)	Temperatura de Salida (°C)
24-Nov-15	13:02	840	33.7	24.5	41.5
24-Nov-15	13:03	835	33.9	24.6	41.6
24-Nov-15	13:04	835	34	24.6	41.6
24-Nov-15	13:05	830	34.2	24.8	41.7
24-Nov-15	13:06	828	34.4	24.8	41.8
24-Nov-15	13:07	824	34.3	24.8	41.9
24-Nov-15	13:08	820	34.3	24.8	41.9
24-Nov-15	13:09	821	34.4	24.8	42
24-Nov-15	13:10	824	34.5	24.6	42
25-Nov-15	11:36	822	27.6	24.1	27.9
25-Nov-15	11:37	820	27.8	24.2	29.2
25-Nov-15	11:38	820	27.7	24.2	30.4
25-Nov-15	11:39	821	27.8	24.3	31.5
25-Nov-15	11:40	822	27.9	24.3	31.2
25-Nov-15	11:41	825	28	24.3	32.8
25-Nov-15	11:42	825	27.9	24.3	33.5
25-Nov-15	11:43	825	28.2	24.4	33.9
25-Nov-15	11:44	826	28.2	24.4	34
25-Nov-15	11:45	827	28.5	24.5	34.4
25-Nov-15	11:46	828	28.6	24.6	34.6
25-Nov-15	11:47	828	28.7	24.6	34.9
25-Nov-15	11:48	827	29	24.6	35.2
25-Nov-15	11:49	826	29	24.8	35.5
25-Nov-15	11:50	827	29.1	24.8	35.6
25-Nov-15	11:51	827	29.3	24.8	35.7
25-Nov-15	11:52	826	29.4	24.8	36.1
25-Nov-15	11:53	825	29.4	24.8	36.4
25-Nov-15	11:54	824	29.4	24.9	36.7
25-Nov-15	11:55	826	29.7	24.9	37
25-Nov-15	11:56	826	29.8	25.1	37.2
25-Nov-15	11:57	826	30	25.1	37.5
25-Nov-15	11:58	827	30.1	25.1	37.7
25-Nov-15	11:59	830	30	25.1	37.9
25-Nov-15	12:00	831	30.1	25.2	37.9
25-Nov-15	12:01	834	30.4	25.2	37.9
25-Nov-15	12:02	840	30.5	25.2	38.2
25-Nov-15	12:03	844	30.6	25.1	38.3
25-Nov-15	12:04	844	31	25.2	38.4
25-Nov-15	12:05	849	30.9	25.2	38.5
25-Nov-15	12:06	864	31.1	25.2	38.4
25-Nov-15	12:07	865	31.1	25.1	38.6
22-Dic-15	11:48	789	31.4	27.9	31.5
22-Dic-15	11:49	790	31.3	27.8	31.5

Fecha	Hora	Radiación Solar (W/m ²)	Temperatura de Entrada (°C)	Temperatura del aire circundante (°C)	Temperatura de Salida (°C)
22-Dic-15	11:50	793	31.2	27.7	31.4
22-Dic-15	11:51	790	31.2	27.6	31.4
22-Dic-15	11:52	794	31.2	27.6	31.5
22-Dic-15	11:53	795	31.4	27.7	31.5
22-Dic-15	11:54	795	31.6	27.6	31.7
22-Dic-15	11:55	795	31.6	27.6	32.1
22-Dic-15	11:56	795	31.6	27.6	32.5
22-Dic-15	11:57	807	31.6	27.5	35.8
22-Dic-15	11:58	810	31.8	27.3	36.6
22-Dic-15	11:59	811	32	27.3	37.1
22-Dic-15	12:00	812	32.1	27.3	37.7
22-Dic-15	12:01	814	32.1	27.3	37.9
22-Dic-15	12:02	814	32	27.3	38.3
22-Dic-15	12:03	814	31.8	27.3	38.7
22-Dic-15	12:04	814	32	27.4	38.7
22-Dic-15	12:05	819	32.1	27.3	39.4
22-Dic-15	12:06	821	32	27.3	39.4
22-Dic-15	12:07	822	32.4	27.3	39.7
22-Dic-15	12:08	817	32.7	27.4	39.9
22-Dic-15	12:09	817	32.7	27.4	39.9
22-Dic-15	12:10	818	32.9	27.4	40.2
22-Dic-15	12:11	822	33.2	27.4	40.5
22-Dic-15	12:12	825	33.2	27.4	40.7
22-Dic-15	12:13	828	33.2	27.4	40.8
22-Dic-15	12:14	838	33.3	27.4	41.1
22-Dic-15	12:15	813	33.3	27.4	41.3
22-Dic-15	12:16	795	33.6	27.4	41.5

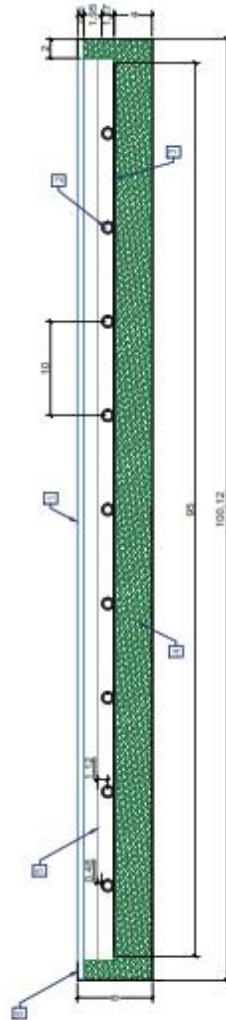
ANEXO 5. Planos del CSTP con absorbente de Acero LAF





DESCRIPCIÓN:

- 1.- Vidrio templado de 0.6 cm
- 2.- Tubo paralelo de cobre Ø 3/8"
- 3.- Placa absorbente Acero LAF de 0.06 cm
- 4.- Aislante termoacústico
- 5.- Tubo colector de cobre Ø 1/2"
- 6.- Carcasa de aluminio de 0.06 cm



CORTE A-A

PROYECTO:	CAPTADOR SOLAR VERIFICACIÓN ABSORBENTE DE ACERO LAF	ESCALA:	1/600
LÁMINA:	CORTE A-A	PLANO Nº:	03
AUTOR:	ARTURO CAMA TORRES		