

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN**

Facultad de Ciencias

Escuela Profesional de Física Aplicada

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UNA TERMA SOLAR CON  
TUBOS DE VACÍO BAJO CONDICIONES CLIMÁTICAS DEL  
CENTRO POBLADO MAURE – KALLAPUMA  
(4260 msnm), TARATA, TACNA**

TESIS

Presentada por:

Bach. John Alfredo Chuquimia López

Para Optar el Título Profesional de:

**LICENCIADO EN FÍSICA APLICADA**

TACNA – PERÚ

2021

## ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS No. 364

En la ciudad de Tacna, a través de la Plataforma Google Meet de la Facultad de Ciencias, de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann; siendo las 16:00 horas del día 15 de noviembre del 2021, estando presente el jurado calificador nominado por Resolución de Facultad No. 10083-2021-FACI-UN/JBG, conformado por los siguientes docentes:

Dr. HUGO ALFREDO TORRRES MURO	Presidente
Dr. JESÚS ALFREDO CHACALTANA GARCÍA	Secretario
M.Sc. JESÚS NATIVIDAD AGREDA PAREDES	Miembro

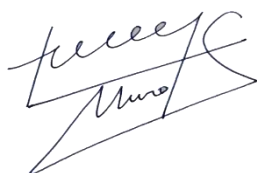
Acto seguido, se dio lectura a la Resolución correspondiente, y del mismo modo se dio lectura al Artículo 22 del Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad de ciencias.

A continuación, el Presidente del Jurado instó al Bachiller: JOHN ALFREDO CHUQUIMIA LÓPEZ, a exponer la tesis titulada: "EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UNA TERMA SOLAR CON TUBOS DE VACÍO BAJO CONDICIONES CLIMÁTICAS DEL CENTRO POBLADO MAURE – KALLAPUMA (4260 msnm), TARATA, TACNA".

Siendo las 16:45 horas, el tesista concluye su exposición, luego se procedió a la formulación de las preguntas por parte de los miembros del jurado calificador.

Terminado este proceso, se invitó a que los miembros del jurado emitan su calificación de acuerdo a reglamento. El promedio de la calificación dio el siguiente resultado: Aprobado por unanimidad, con el calificativo de diecisiete (17), de acuerdo al Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad de Ciencias.

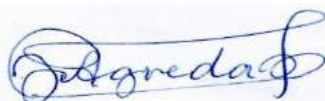
Siendo las 18:00 horas, se dio por concluido el acto de sustentación de la tesis, firmando los señores miembros del jurado calificador, en señal de conformidad.



Dr. Hugo Alfredo Torres Muro  
**PRESIDENTE**



Dr. Jesús Alfredo Chacaltana García  
**SECRETARIO**



Mgr. Jesús Natividad Agreda Paredes  
**MIEMBRO**

## CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, MSc. Carlos Armando Polo Bravo, en mi condición de Asesor acreditado por Resolución de Facultad N° 9539-2019-FACI-UN/JBG, del Bachiller John Alfredo Chuquimia López quien sustentó la tesis titulada: EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UNA TERMA SOLAR CON TUBOS DE VACÍO BAJO CONDICIONES CLIMÁTICAS DEL CENTRO POBLADO MAURE - KALLAPUMA (4260 MSNM), TARATA, TACNA, para obtener el título profesional de Licenciado en Física Aplicada.

Informo que habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y de similitud de trabajos de investigación y producción intelectual, considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del software de similitud textual TURNITIN, cuenta con el nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es 3%. Por lo que **CERTIFICO LA SIMILARIDAD** de la tesis está de acuerdo al nivel **PERMITIDO**, para continuar con los trámites correspondientes y para su publicación en el repositorio institucional.

Se emite el presente certificado con fines de continuar con los tramites respectivos para su obtención del título.

Tacna, 07 de junio de 2023



---

**MSc. Carlos Armando Polo Bravo**  
**Asesor**

Dedico este trabajo con todo mi cariño

A mis padres Justina y Gumercindo

A mis hermanas Lidia, Yovana y Susy

A mi hermano Lucio

## AGRADECIMIENTO

A mi asesor MSc. Carlos Polo Bravo por su amplio apoyo durante todo el proceso de elaboración de esta tesis.

A mi Co-asesor Dra. Mónica Gómez León de la Universidad Nacional de Ingeniería quien me ha permitido ser parte de su proyecto de investigación en la cual he conocido mucha gente grata (Dr. Manfred Horn, Ing. Juan Molina, Pablo Ratache, Sócrates Valdés, Martín Ponce) y adquirido conocimiento y experiencia en el área de las energías renovables.

A mis amigos Edgar y Freddy por su invaluable apoyo y sugerencias durante todo el proceso de evaluación.

Al director del centro educativo Horacio Zeballos Gamez del Centro Poblado Maure – Kallapuma, Profesor Miguel Sierra y su conserje, Sr. Víctor, por brindarme todas las facilidades durante los periodos de evaluación.

A toda la comunidad del Centro Poblado Maure – Kallapuma por permitirme realizar mis trabajos de investigación.

Al proyecto 04-2018-FONDECYT-BM-IADT-MU de la Universidad Nacional de Ingeniería.

A la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann que a través del Vicerrectorado de Investigación y el programa “Concurso de financiamiento de tesis para optar el título profesional con fondos de canon, sobre canon y regalías mineras 2019-II”, me dieron la oportunidad de realizar esta tesis.

## ÍNDICE

DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
ÍNDICE DE ANEXOS .....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE TABLAS .....	xvi
NOMENCLATURA .....	xvii
RESUMEN.....	xx
ABSTRACT .....	xxi
INTRODUCCIÓN .....	1
<b>CAPÍTULO I</b>	
GENERALIDADES .....	4
1.1. Formulación del problema.....	4
1.2. Pregunta de investigación.....	6
1.3. Justificación.....	6
1.4. Objetivos .....	8
1.4.1. Objetivo general .....	8

1.4.2. Objetivos específicos .....	8
1.5. Hipótesis .....	8
1.6. Variables.....	9
1.7. Indicadores .....	9
1.8. Limitaciones de la investigación .....	9
1.9. Descripción y características de la investigación .....	10
 <b>CAPÍTULO II</b>	
MARCO TEÓRICO.....	11
2.1. Antecedentes del estudio .....	11
2.2. Energía solar.....	15
2.2.1. El sol y la radiación solar.....	17
2.2.2. Constante solar .....	20
2.2.3. Radiación solar en la superficie terrestre.....	22
2.3. Irradiancia solar .....	29
2.4. Terma solar.....	33
2.4.1. Colectores solares de placa plana .....	35
2.4.2. Colectores solares con tubos de vacío .....	37

2.5. Termas solares con colectores de tubos de vacío tipo Direct-flow .....	39
2.5.1. Efecto termosifón .....	41
2.5.2. Eficiencia .....	44
2.6. El clima.....	48
2.7. Zonas Altoandinas del Perú.....	51
 <b>CAPÍTULO III</b>	
MATERIALES .....	53
3.1. Terma solar con tubos de vacío.....	53
3.2. Estación meteorológica Davis Ventage Pro .....	54
3.3. Estación meteorológica HOBO .....	55
3.4. Sensores de temperatura HOBO.....	57
3.5. Otras fuentes de información meteorológica.....	58
3.5.1. SENAMHI .....	59
3.5.2. Meteonorm.....	59
 <b>CAPÍTULO IV</b>	
PROCEDIMIENTO .....	60
4.1. Lugar de estudio .....	60

4.2. Reinstalación y mejoramiento de la terma solar .....	65
4.2.1. Reorientación de la terma solar .....	65
4.2.2. Reinstalación y aislamiento térmico de las tuberías .....	69
4.3. Sensores de temperatura .....	70
4.3.1. Instalación.....	70
4.3.2. Sensores internos al termotanque .....	71
4.3.3. Sensores externos al termotanque.....	72
4.3.4. Recopilación y procesamiento de data .....	73
4.4. Sensor de irradiancia solar HOBO .....	73
4.4.1. Instalación.....	74
4.4.2. Recopilación y análisis de data.....	74
4.5. Instalación de medidor de flujo volumétrico.....	75

## **CAPÍTULO V**

RESULTADOS.....	76
5.1. Comportamiento térmico de la terma solar en estado sin consumo .....	77
5.1.1. Temperaturas internas.....	81
5.1.2. Temperaturas externas .....	83

5.1.3. Flujo de retorno o contraflujo .....	84
5.1.4. Ritmo de calentamiento y enfriamiento.....	87
5.1.5. Congelamiento de agua en las tuberías.....	94
5.1.6. Eficiencia .....	95
5.2. Comportamiento térmico de la terma solar en estado con consumo .....	101
5.2.1. Porcentaje de agua lista para su uso .....	101
5.2.2. Calentamiento del agua.....	104
5.2.3. Eficiencia .....	109
 <b>CAPÍTULO VI</b>	
DISCUSIÓN .....	112
 <b>CAPÍTULO VII</b>	
CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS .....	118
7.1. Conclusiones .....	117
7.2. Sugerencias .....	118
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	121

## ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXOS.....	130
ANEXO 1. Comparación de la temperatura ambiente entre la estación meteorológica Davis y SENAMHI .....	131
ANEXO 2. Irradiancia solar para los periodos de prueba en estado con consumo .....	132
ANEXO 3. Mapa de la irradiación solar global horizontal del Perú .....	134
ANEXO 4. Termocuplas hobo.....	135
ANEXO 5. RXW Silicon Pyranometer Sensor (RXW-LIB-xxx).....	136
ANEXO 6. HOBO® 4-Channel Thermocouple Data Logger .....	137
ANEXO 7. Fotos.....	138

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Intercambio energético en la tierra y su atmósfera.....	16
Figura 2. Estructura solar .....	18
Figura 3. Espectro de radiación de un cuerpo negro .....	20
Figura 4. Balance energético medio global anual de la Tierra.....	24
Figura 5. Masa de aire .....	27
Figura 6. Componentes de la irradiancia solar .....	31
Figura 7. Espectros de la radiación solar en sus diferentes componentes.....	33
Figura 8. Usos más comunes de una terma solar .....	34
Figura 9. Colector de placa plana.....	36
Figura 10. Colector con tubo de vacío .....	38
Figura 11. Tubo al vacío del tipo Direct-flow.....	40
Figura 12. Gradientes de temperatura en un tubo de vacío.....	43
Figura 13. Terma solar con tubos de vacío .....	53
Figura 14. Estación meteorológica Davis Ventage Pro .....	54
Figura 15. Estación meteorológica HOBO .....	56

Figura 16. Sensor de Irradiancia solar HOBO .....	56
Figura 17. Termopares tipo T y tipo K .....	57
Figura 18. Datalogger HOBO con cuatro entradas para termopares .....	58
Figura 19. Ubicación geográfica del centro poblado de Kallapuma.....	61
Figura 20. Temperatura ambiente para Kallapuma-Chuapalca.....	62
Figura 21. Temperaturas máximas y mínimas para Chuapalca-Kallapuma .....	64
Figura 22. Energía solar media diaria por meses para Kallapuma.....	64
Figura 23. Orientación geográfica de la terma solar .....	66
Figura 24. Orientación geográfica de la terma solar antes y después .....	67
Figura 25. Fotografías de la terma solar antes y después.....	67
Figura 26. Esquema del sistema de suministro de agua caliente con energía solar reinstalada y mejorada.....	68
Figura 27. Conexiones de tuberías con aislamiento.....	69
Figura 28. Ubicación de sensores internos.....	71
Figura 29. Ubicación de sensores externos .....	72
Figura 30. Interfaz del programa HOBOWare.....	73
Figura 31. Interfaz de la página HOBOLink .....	74

Figura 32. Medidor de flujo volumétrico analógico .....	75
Figura 33. Variación de las temperaturas en los diferentes puntos para la terma solar con tubos de vacío en Kallapuma.....	78
Figura 34. Variación de las temperaturas para días nublados .....	79
Figura 35. Irradiancia solar global en un plano horizontal e inclinado.....	80
Figura 36. Irradiancia solar global en un plano horizontal e inclinado.....	80
Figura 37. comportamiento térmico del tubo de vacío .....	81
Figura 38. Comportamiento térmico del agua dentro del termotanque .....	82
Figura 39. Comportamiento térmico de los puntos exteriores al termotanque .....	84
Figura 40. Fenómeno de contraflujo .....	85
Figura 41. Comportamiento térmico para los días de marzo del 2021 .....	86
Figura 42. Condiciones meteorológicas.....	86
Figura 43. Cálculo del ritmo de calentamiento y enfriamiento.....	89
Figura 44. Cálculo del ritmo de calentamiento y enfriamiento.....	92
Figura 45. Congelamiento del agua dentro de las tuberías .....	95
Figura 46. Cálculo de la insolación.....	98
Figura 47. Eficiencia de la terma solar en estado sin consumo .....	100

Figura 48. Primera prueba en estado con consumo.....	102
Figura 49. Calentamiento del agua que fluye a través de la terma solar.....	104
Figura 50. Calentamiento del agua que fluye a través de la terma solar.....	107
Figura 51. Calentamiento del agua que fluye a través de la terma solar.....	107
Figura 52. Comparación del comportamiento térmico de calentamiento del agua en ambos estados .....	108
Figura 53. Curva de la eficiencia .....	111
Figura 54. Curva de la eficiencia .....	111

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tiempos de calentamiento del agua para $T_{superior}$ .....	93
Tabla 2. Tiempos de enfriamiento del agua para $T_{superior}$ .....	93

## NOMENCLATURA

$A_c$	Área total del colector sobre la cual incide la irradiancia solar
$A_t$	Área de apertura de un solo tubo
$AM$	Masa de aire
$\beta$	Ángulo de inclinación del colector
$c$	Velocidad de la luz
$c_p$	Calor específico
$d$	Diámetro del tubo interior del tubo de vacío
$E_T$	Energía térmica útil
$G$	Irradiancia solar global en plano horizontal
$G_D$	Irradiancia solar difusa en plano horizontal
$G_{D-colector}$	Irradiancia solar difusa en el plano del colector
$G_\varphi$	Irradiancia solar global en plano con inclinación $\varphi$
$G_N$	Irradiancia normal solar directa en plano horizontal
$G_{N-colector}$	Irradiancia solar directa en el plano del colector
$G_R$	Irradiancia solar reflejada por el suelo
$G_{sc}$	Constante solar
$H$	Altitud de un lugar sobre el nivel del mar
$\eta$	Eficiencia
$\eta_o$	Eficiencia óptica
J	Joules
K	Grados kelvin
Kg	Kilogramo
Km	Kilómetros

$k_B$	Constante de Boltzmann
$l$	Longitud del tubo de vacío
$\lambda$	Longitud de onda
$M$	Medidor de flujo volumétrico
$m$	Metro
$m$	Masa
$\dot{m}$	Flujo másico o caudal
$\mu\text{m}$	Micrómetros
$N_t$	Número total de tubos de vacío en el colector
$P$	Presión atmosférica
$P_o$	Presión atmosférica normal o estándar
$\dot{Q}$	Flujo de calor
$R_T$	Radio terrestre
$\rho_{\text{suelo}}$	Reflectancia del suelo terrestre
$S_G$	Sensor de irradiancia solar
$s$	Segundos
$T$	Temperatura
$t$	Tiempo
$T_a$	Temperatura ambiente
$T_{\text{ducha}}$	Temperatura del agua en la ducha
$T_{\text{in}}$	Temperatura del agua fría que ingresa al tubo de vacío
$T_{\text{inferior}}$	Temperatura del agua en la parte inferior dentro del termotanque
$T_{\text{ingreso}}$	Temperatura del agua en el punto de ingreso hacia el termotanque
$T_m$	Temperatura promedio
$T_{\text{out}}$	Temperatura del agua caliente que sale del tubo de vacío

$T_{red}$	Temperatura del agua de la red
$T_{salida}$	Temperatura del agua en el punto de salida desde el termotanque
$T_{superior}$	Temperatura del agua en la parte superior dentro del termotanque
$V$	Volumen de agua
$W$	Watts
$\theta_z$	Ángulo cenital
$\hbar$	Constante de Plank

## RESUMEN

En el presente trabajo se evalúa la eficiencia de una terma solar con tubos de vacío mediante el estudio de sus características térmicas en dos estados diferentes, sin consumo y con consumo bajo condiciones climáticas extremas que caracterizan el centro poblado Maure – Kallapuma ubicado en la zona altoandina a 4260 msnm. El estudio se realizó a base de una de las tres termas solares instaladas e inoperativas en el Centro Educativo Horacio Zeballos Gamez de Kallapuma. Fue necesario realizar una serie de mejoras a la terma solar debido a su deficiente instalación original. Se instalaron ocho sensores de temperatura en diferentes puntos de la terma solar con el objetivo de recopilar la mayor información posible sobre el comportamiento térmico durante el proceso de calentamiento de agua para uso doméstico. Los datos se recopilaron durante los meses menos fríos de Kallapuma que corresponden desde diciembre del 2020 hasta marzo del 2021. El estudio ha tenido periodos de evaluación *in situ* y periodos en las cuales se dejó registrando los sensores de manera automática y bajo la supervisión del personal que labora en el centro educativo. Los resultados obtenidos nos muestran que la eficiencia máxima de la terma solar en un estado sin consumo es de 0,61 y para un estado con consumo es iguala a 0,56 lo que nos permite concluir que las termas solares con tubos de vacío son muy eficientes en Kallapuma para producir agua caliente de uso doméstico.

**Palabras clave:** Terma solar, Alto andino, Eficiencia, Clima y Temperatura.

## **ABSTRACT**

In the present work, the efficiency of a solar water heater with vacuum tubes is evaluated by studying its thermal characteristics in two different states, without consumption and with consumption under extreme climatic conditions that characterize the populated center called Maure – Kallapuma, located in the high lands, at 4260 masl. The study was carried out based on one of the three solar water heaters installed and that are inoperative at the Horacio Zeballos Gamez Educational Center in Kallapuma. It was necessary to make a series of improvements to the solar water heater due to its poor original installation. Eight temperature sensors were installed at different parts in the solar water heater in order to collect as much information as possible about the thermal behavior during the process of heating water for domestic use. The data was collected during the less cold months of Kallapuma that correspond from December 2020 to March 2021. The study has had on-site evaluation periods and periods in which the sensors were automatically registered and under the supervision of the personnel who work in the educational center. The results obtained show us that the maximum efficiency of the solar water heater in a state without consumption is 0.61 and for a state with consumption it is equal to 0.56, which allows us to conclude that Solar water heaters with evacuated tubes are very efficient in Kallapuma to produce hot water for domestic use.

**Keywords:** Solar water heater, High land, Efficiency, Climate, and Temperature.

## INTRODUCCIÓN

La zona Altoandina de la región Tacna se caracteriza por sus temperaturas extremas, mucho sol durante el día y frío intenso durante las noches, con clima frío de montaña subhúmedo. Durante el invierno que corresponden a los meses de junio, julio y agosto, las regiones Altoandinas de nuestro país son drásticamente azotadas por las bajas temperaturas o heladas que afectan la salud de los pobladores en especial a los niños y mayores de edad. Las condiciones climáticas de estas zonas altoandinas, las cuales, al ser frías y húmedas, generan una alta vulnerabilidad a la población de contraer enfermedades respiratorias agudas (Flores, 2017). Los estudios realizados por el Ministerio de Salud, muestran que el número de casos de menores de 5 años afectados con infecciones respiratorias agudas desde el 2008 al 2018 supera los 2000 casos cada año (MINSA, 2017). Bajo ese contexto, el suministro de agua caliente constituye un elemento energético de suma importancia para un hogar en zonas altoandinas para usos como la higiene personal y la limpieza del hogar.

A nivel mundial, el agua caliente, se ha convertido en el segundo uso energético doméstico más importante después de la calefacción y la refrigeración. Por esta razón en los últimos años se está produciendo un aumento notable de instalaciones de energía solar térmica en el mundo (Mendoza et al., 2018).

Las termas solares son un mecanismo simple y muy eficiente para calentar el agua usando la energía solar, y no contamina el medio ambiente. Los avances

tecnológicos permiten la fabricación de sistemas de mejor calidad y a menor costo, que ha generado un aumento del uso de las termas solares con tubos de vacío que aparte de ser, hoy en día, económicos son altamente eficientes bajo diversas condiciones climáticas. Montoya (2011) en su estudio menciona que debido a los diferentes problemas que se presentan en los colectores solares de placa plana cuando operan en zonas de altura y existiendo una nueva tecnología en colectores solares para calentamiento de agua que podría solucionar este problema es que se hace necesario un método de evaluación para conocer su comportamiento térmico y poder proponer su uso para los distintos climas de la región.

Existen estudios en nuestro país sobre termas solares en condiciones de clima frío realizados por Lobato y Barrena (2016) y Lobato (2019) en la zona altoandina de Tarma – Junín; Colque y Condori (2016), Flores (2018), y Molina y Huánuco (2020) en la ciudad de Puno; Mercado (2015) en la ciudad de Huánuco; Martínez (2014) en las zonas altoandinas de San José de Quero y Yanacancha de Huánuco. Pero en ninguno de estos estudios se ha llegado a temperaturas tan bajas en los meses de verano hasta el punto de congelamiento de las tuberías como si ocurre en nuestro estudio, por lo que el presente trabajo se podría considerar como base para futuros estudios de termas solares en lugares con climas extremos (esencialmente en cuanto al descenso de temperaturas) y referencia para todos aquellos que proyectan hacer instalaciones en lugares altoandinos.

El desarrollo de este trabajo se divide en siete capítulos. En el capítulo I se formula los objetivos de la investigación a través del planteamiento del problema, se indica las variables que interviene en el estudio y se da a conocer las hipótesis.

En el capítulo II se desarrolla la teoría necesaria para el desarrollo de esta investigación. Se revisa lo concerniente a la radiación solar y sus características. Se describe los principales tipos de termas solares empleados para el calentamiento de agua de uso sanitario y su principio físico de funcionamiento.

En el capítulo III se describen todos los materiales e instrumentos empleados para registrar la temperatura del agua, medir el flujo volumétrico y los parámetros meteorológicos.

En el capítulo IV se describe todos los procedimientos realizados en el estudio. Se describe las mejoras realizadas en la terma solar respecto a su configuración original, se detalla la ubicación de los sensores de temperatura, el sensor de irradiancia solar y el medidor de flujo volumétrico en los diferentes puntos y cómo se recopilan los datos.

En el capítulo V se muestran los resultados obtenidos. Se muestra el comportamiento térmico de la terma solar en dos estados diferentes, la primera sin consumo y la segunda con consumo, y a partir de estos resultados se calcula la eficiencia de la terma solar para ambos estados. La discusión se muestra en el capítulo VI y finalmente en el capítulo VII se exponen los resultados y sugerencias.

## **CAPÍTULO I**

### **GENERALIDADES**

#### **1.1. Formulación del problema**

La región Tacna cuenta con una gran diversidad geográfica, posee una línea costera extensa y ancha en el sur, cerca al cual se encuentra la ciudad de Tacna a una altitud media de 562 msnm. La zona de relieve andino está comprendida entre los 2000 a 5000 msnm. Esta zona está compuesta por una puna extendida, de pendientes suave y moderada, en su parte más alta se encuentran nevados que alcanzan los 5815 msnm (Sifuentes, s. f.). Las temperaturas ambientales, en las zonas alto andinas, llegan por debajo de los cero grados Celsius durante las estaciones de invierno y otoño, y difícilmente superan los veinte grados Celsius en las estaciones de primavera y verano tal y como lo reportan las estaciones meteorológicas instaladas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú SENAMHI, por lo que la producción de agua caliente para uso doméstico se hace de vital importancia.

Existe hoy en día la tecnología necesaria para poder producir agua caliente usando como fuente de energía el suministro eléctrico, sin embargo, en muchos centros poblados aun no llega el fluido eléctrico, tal es el caso del centro poblado Maure – Kallapuma ubicado en la provincia de Tarata, departamento de Tacna, a una altitud de 4260 msnm. En esta zona alto andina de extrema

pobreza, cada año sufre las incidencias de heladas con temperaturas por debajo de los  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  (SENAMHI, 2020).

El uso de colectores solares, para calentar el agua, es la mejor alternativa que aparte de ser amigable con el medio ambiente, no necesita una fuente de alimentación eléctrica. Estos colectores solares tienen la capacidad de generar y abastecer agua caliente en viviendas, colegios, hospitales y diversas instituciones. Teniendo conocimiento de ellos es que se han instalado tres termas solares con tubos de vacío en la Institución Educativa Horacio Zeballos Gamez del centro poblado Maure – Kallapuma, Tacna. Además, cada terma solar está conectada a un tanque elevado y está a la vez alimentada por la red y con una cisterna de respaldo conectada a una bomba de 1HP para elevar el agua. Actualmente estas termas solares con tubos de vacío ya no están en funcionamiento, esto debido principalmente a muchos factores que no se tomaron en cuenta antes de su instalación, tales como las temperaturas extremas de la zona, la orientación adecuada de las termas solares, la correcta instalación de las tuberías y el aislamiento térmico adecuado.

## **1.2. Pregunta de investigación**

¿Cuál es la eficiencia y el comportamiento térmico de una terma solar con tubos de vacío que suministra agua caliente para uso doméstico en el centro educativo Horacio Zeballos Gamez bajo las condiciones climáticas del centro poblado Maure – Kallapuma (4260 msnm), Tarata, Tacna?

## **1.3. Justificación**

En vista de ausencia del fluido eléctrico y las bajas temperaturas en el centro poblado de Kallapuma – Tacna, es necesario emplear colectores solares con tubos de vacío, ya que estas son más eficientes y económicos a comparación con las de placa plana, para obtener agua caliente de uso doméstico en el centro educativo Horacio Zeballos Gamez.

Además, el uso de termas solares está muy bien justificado ya que la región de Tacna cuenta con un alto potencial de recurso energético solar. Según las mediciones realizadas por el Centro de Energías Renovables de Tacna (CERT) de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann (UNJBG), el promedio anual es de 5,8 kWh/m<sup>2</sup>-día; valor que está por encima del valor promedio mundial (Polo & Torres, 2013).

Sin embargo, aún no se han realizado suficientes estudios rigurosos sobre el comportamiento térmico de una terma solar con tubos de vacío en condiciones climáticas de zonas alto andinas. Ya que estas no se comportan de

la misma manera que una terma solar instalada en la ciudad de Tacna, debido principalmente a las bajas temperaturas que se alcanzan en las zonas altoandinas. Esta falta de estudios rigurosos se refleja en las instalaciones defectuosas e incorrectas que se llevaron a cabo en muchos centros poblados incluyendo Kallapuma, en la cual la orientación de los colectores de las termas solares es errónea y las conexiones de las tuberías están sin aislamiento térmico, de modo que están expuestas a las bajas temperaturas que podrían producir roturas y reducir su vida útil.

Por lo que, el estudio y evaluación de un colector solar con tubos de vacío, de manera detallada y rigurosa bajo las condiciones climáticas del centro poblado Maure – Kallapuma, Tacna, servirá para comprender el comportamiento térmico de estos colectores bajo tales condiciones climáticas, de modo que los resultados de este estudio permitirán que investigaciones futuras mejoren el empleo de materiales y otros componentes en los colectores de este tipo como parte de programas de desarrollo social.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general**

Evaluar la eficiencia y el comportamiento térmico de una terma solar con tubos de vacío bajo las condiciones climáticas del centro poblado Maure – Kallapuma (4260 msnm), Tarata, Tacna para su uso en el Centro Educativo Horacio Zeballos Gamez.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Evaluar la eficiencia y comportamiento térmico de una terma solar con tubos de vacío sin consumo ubicado en el Centro Educativo Horacio Zeballos Gamez.
- Evaluar la eficiencia y comportamiento térmico de una terma solar con tubos de vacío con consumo ubicado en el Centro Educativo Horacio Zeballos Gamez.

## **1.5. Hipótesis**

Las condiciones climáticas del centro poblado Maure – Kallapuma (4260 msnm) influyen en la eficiencia y comportamiento térmico de una terma solar con tubos de vacío que suministra agua caliente de uso doméstico.

## **1.6. Variables**

- **Variable I (independiente)**

Clima del centro poblado Maure – Kallapuma.

- **Variable II (dependiente)**

Eficiencia de la terma solar

## **1.7. Indicadores**

- **Indicadores de la variable I**

- Irradiancia solar
- Temperatura ambiental
- Temperatura del agua de la red

- **Indicadores de la Variable II**

- Irradiancia solar
- Temperatura ambiental
- Temperatura del agua en la entrada del termotanque
- Temperatura del agua en la salida del termotanque

## **1.8. Limitaciones de la investigación**

- Los días continuos de nubosidad en temporada de lluvia en verano y nevada en invierno dificulta la obtención de resultados concluyentes si la investigación dura un periodo de tiempo corto.

- La lejanía y el difícil acceso a la zona obliga a que los aparatos de recolección de datos y la terma solar, funcionen sin la supervisión de un especialista. Aumentando así el riesgo de obtención de datos erróneos en caso de alguna falla.
- No se cuenta con acceso a la corriente eléctrica de la red.
- Escasa logística para alojamiento y alimentación para los investigadores.

### **1.9. Descripción y características de la investigación**

- **Tipo de estudio:** Investigación experimental
- **Nivel de investigación:** Investigación aplicada

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes del estudio

Esta tesis toma en cuenta trabajos previos de investigación realizados por diferentes autores y que están relacionados con el tema de estudio.

Flores (2018) realizó un diseño de una terma solar con tubos al vacío considerando las condiciones ambientales que existe en las zonas alto andinas, que en este caso particular es la ciudad de Puno. En este estudio se concluye que, para que una terma solar obtenga una temperatura de 40 °C bajo las condiciones de clima de la zona, esta debe estar dotada de 8 tubos al vacío como mínimo y debe tener una capacidad volumétrica de 153 litros en el termotanque.

Colque & Condori (2016) determinaron la eficiencia de una terma solar con tubos al vacío de flujo directo en la ciudad de Puno, obteniéndose un valor de la eficiencia promedio diario que oscila en el rango de 66 % – 67 % y un promedio de la eficiencia general diario de 69,98 % la cual, concluyen, es 13,02 % más eficiente con respecto a la eficiencia térmica de las termas solares de colectores de placa plana que alcanza un valor de 55,70 %. Este estudio se realizó en un periodo de cinco días durante la estación de primavera.

Martines (2014) realizó un estudio detallado sobre el efecto de los colectores solares con tubos de vacío en el ahorro de energía eléctrica en zonas alto andinas de Yanacancha y San José de Quero ubicadas en la región de Huancayo. En este estudio se demuestra que el empleo de colectores solares tiene un efecto positivo en el ahorro de energía eléctrica. Aun cuando había poca radiación solar en los días de evaluación a causa de la aleatoriedad del tiempo y que en promedio era 4,76 kWh/m<sup>2</sup>/día, se ha obtenido una ganancia energética de 125,9 kWh/día gracias a los colectores solares en las comunidades mencionadas.

Mercado (2015) llevó a cabo un estudio para la evaluación de parámetros de operación de un colector solar de tubos al vacío para generación de agua caliente en Huánuco, en el considera que la posición del colector solar, el ángulo de funcionamiento y el número de tubos son los parámetros más importantes en un colector solar de tubos al vacío que se deben tener en cuenta en su instalación. Al considerar adecuadamente estos parámetros, durante los estudios, Mercado C. M. pudo obtener una temperatura promedio del agua de 54,01 °C para uso doméstico.

Lobato y Barrena (2016) calcularon la eficiencia de dos tipos de termas solares, la primera consistía en una terna con colectores de cobre y la se segunda

una terma solar con colectores de CPVC, mismas que fueron evaluadas en zonas altoandinas de Junín. En este estudio se consideran tres situaciones diferentes en las condiciones climáticas de la zona, días soleados, días semi nublados y días nublados. Los resultados mostraron que los colectores de CPVC tienen una eficiencia mayor que los colectores de cobre por que producen una mayor diferencia de temperatura del agua y que el valor calculado fue de 54,59 % para días soleados, 48,32 % para días semi nublados y 30,01 % para días nublados.

Lobato (2019) realizó un estudio para determinar la eficiencia de una terma solar empleando colectores solares de cobre y CPVC en condiciones climáticas que caracterizan las zonas altoandinas de Junín, en la cual la terma solar alcanzó una eficiencia mayor al 50 % y se observó que la ganancia promedio de temperatura en un colector de CPVC fue mayor que la ganancia de temperatura en un colector de cobre. Sin embargo, en ambos tipos de colectores se alcanzaron temperaturas del agua mayores a 70°C aun en días nublados.

Molina & Huánuco (2020) estudiaron las características de la radiación solar en Puno para diseñar un sistema térmico solar de agua caliente sanitaria para un hotel de cincuenta personas. En este estudio se muestra que la radiación promedio mensual para Puno es de 6,29 KWh/m<sup>2</sup>/día y a base de este parámetro

se pudo diseñar con éxito una terma solar que es capaz de brindar agua caliente de forma eficiente a un hotel de 50 personas.

Polo y Torres (2013) realizaron un trabajo en el Centro de Energías Renovables de Tacna – CERT en la cual exponen métodos experimentales para evaluar termas y colectores solares para el calentamiento de agua en estado estático y dinámico. En este estudio se centró en los parámetros: eficiencia de conversión, eficiencia instantánea, coeficiente global de pérdidas térmicas, eficiencia óptica, la fracción solar, eficiencia térmica, grado de utilización y curvas de variación térmica. Además, indican que se puede considerar que un colector solar es de buena calidad térmica si su coeficiente global de pérdidas térmicas se encuentra entre  $4 \text{ W/m}^2\text{°C}$  y  $5 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .

Polo (2013) evaluó el potencial energético solar que posee la región de Tacna. Los resultados de este trabajo muestran que el potencial energético solar global de la región de Tacna cuantificado sobre una superficie horizontal en valor promedio anual es de  $6,04 \text{ kWh/m}^2\text{día}$ , la cual es superior en 13,46 % al promedio mundial; equivalente a 0,51 kilogramos de petróleo por metro cuadrado por día. Si la región de Tacna fuese abastecida durante todo el día por sistemas fotovoltaicos, sería necesario una superficie de terreno del desierto de 246,88 ha, la cual equivale al 0,032% de la zona de biodiversidad de escaza o

nula vegetación. En este estudio se señala además que, la provincia con mayor potencial energético solar es Candarave (6,42 kWh/m<sup>2</sup>día), y el distrito con menor recurso solar es Ite (5,4 kWh/m<sup>2</sup>día). Estos valores indican que la región de Tacna posee un recurso energético solar muy bueno para su aprovechamiento.

## **2.2. Energía solar**

La energía solar es la única forma de energía no contaminante disponible para el hombre. Esta energía es abundante, gratuita e inagotable (Sayigh, 1977). La energía solar ha existido durante millones de años y ha sido utilizada por muchos seres vivos y no vivos para cambios y procesos físicos, químicos y biológicos. Generación tras generación, la energía solar ha sido la principal fuente de energía diaria de muchas formas. El comienzo de la modernidad humana y la civilización cambió la utilización de la energía solar. Las civilizaciones humanas anteriores utilizaron la energía solar para la iluminación, el secado de alimentos y el cuidado personal. Los seres humanos modernos utilizan la energía solar para la vida cotidiana, el trabajo y, en general, para la vida. A medida que aumenta la demanda humana de suministro de energía moderna, la atención a la energía solar se vuelve más intensa (Enteria, 2014).

Toda la energía no nuclear disponible para el hombre proviene de la radiación solar (excepto por una cantidad relativamente pequeña de energía liberada

térmicamente del núcleo de la tierra y de las influencias extraterrestres en las mareas y corrientes de marea). El vasto suministro de energía solar llega a la tierra en cantidades tales que  $1,4 \times 10^{-1} \text{ J}$  pasa a través de un plano normal al haz de radiación solar incidente de un centímetro cuadrado cada segundo ( $1,4 \text{ kW/m}^2$ ). La energía que incide en la tierra cada año es esta cantidad multiplicada por el área de la sección transversal de la tierra que equivale a  $1,3 \times 10^{14} \text{ m}^2$ , el resultado asciende a  $5,6 \times 10^{24} \text{ J}$ . Aproximadamente el 34 % de la energía incidente se refleja de regreso al espacio (figura 1), mientras que alrededor del 47 % se absorbe en la superficie de la tierra y el 19 % se absorbe en la atmósfera por el polvo, nubes, vapor de agua, dióxido de carbono y otros elementos presentes en la atmósfera.

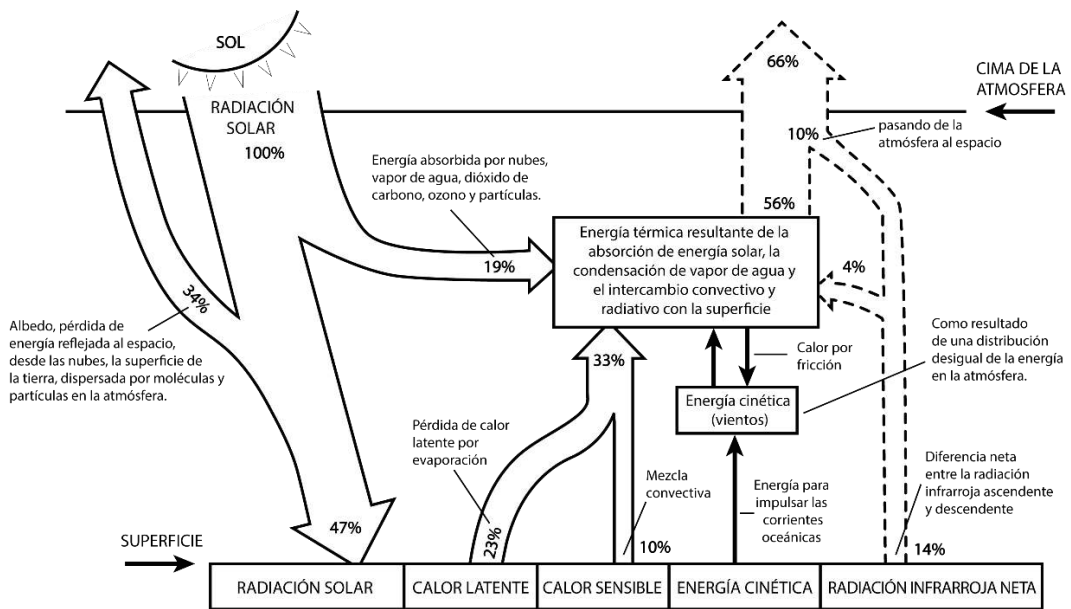


Figura 1. Intercambio energético en la tierra y su atmósfera. Adaptado de Messel (1975).

La energía absorbida en la superficie también se devuelve a la atmósfera por convección y evaporación. Aproximadamente el 2 % de la energía es responsable de las circulaciones atmosférica y oceánica, pero se convierte en calor por fricción y, junto con el resto de la energía absorbida en la atmósfera, se irradia al espacio como radiación infrarroja. Solo una parte muy pequeña, menos del 0,01 %, se almacena químicamente por la actividad fotosintética de las plantas. Sin embargo, es esta fracción de la energía atrapada del que el hombre obtiene energía tanto de sus necesidades metabólicas diarias como para la mayoría de sus necesidades de calefacción, movilidad y mecanización (Messel, 1975).

### **2.2.1. El sol y la radiación solar**

El sol es una estrella muy típica de clase espectral G2V, es una enorme esfera de materia gaseosa inmensamente caliente con un diámetro de  $6,96 \times 10^5$  Km de radio y que se encuentra en promedio a  $1,496 \times 10^8$  Km de la tierra. El sol tiene una masa de  $1,989 \times 10^{30}$  Kg, su densidad media es  $1409 \text{ Kg/m}^3$  mientras que la densidad en su centro alcanza los  $1,6 \times 10^5 \text{ Kg/m}^3$  (Karttunen et al., 2016). Aproximadamente el 74 % de la masa del sol es hidrógeno, el 25 % es helio y el resto está formado por elementos más pesados. La temperatura del sol en su centro es de  $1,5 \times 10^7$  K, mientras que su temperatura superficial de aproximadamente 5785 K y se conoce como *temperatura efectiva*; esta temperatura superficial le confiere un color blanco al sol

pero que en la superficie terrestre vemos con un color amarillo debido a la dispersión atmosférica de la radiación solar (Kalogirou, 2009).

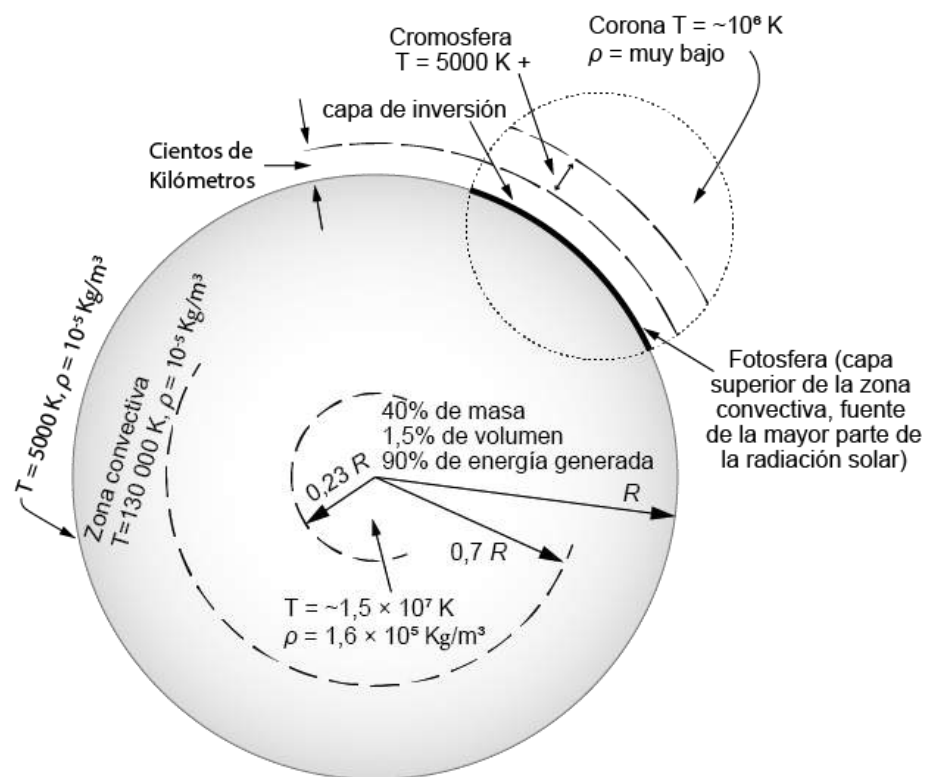


Figura 2. La estructura solar. Adaptado de Duffie y Beckman (2013)

El espectro de radiación solar muestra la distribución de la radiación solar por longitud de onda. A pesar de la amplia gama de longitudes de onda de la radiación solar, se emite muy poca energía como radiación de longitud de onda muy larga o muy corta; la mayor parte de la energía se concentra dentro del rango de longitud de onda de

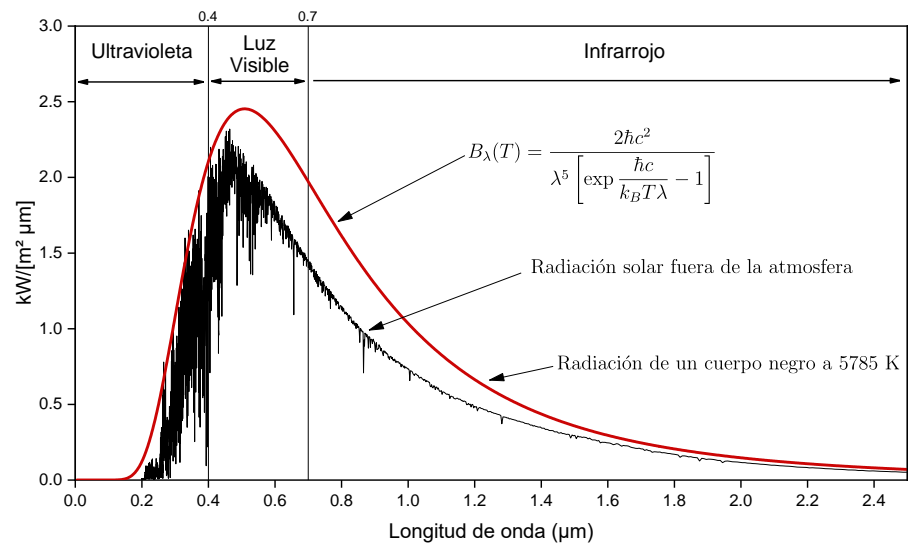
0,2 a 2,5  $\mu\text{m}$ , lo que representa el 99 % de la radiación solar total. La región visible se extiende desde aproximadamente 0,4 a 0,7  $\mu\text{m}$  Esta es la única parte del espectro que es visible para el ojo humano. Las bandas visible, infrarroja y ultravioleta contienen 40 %, 52 % y 8 % de la energía, respectivamente (Sokolik, 2008). La longitud de onda máxima de la radiación es de aproximadamente 0,48  $\mu\text{m}$ . A medida que la luz solar penetra en la atmósfera terrestre, la radiación solar es atenuada por la atmósfera a través de la absorción, la dispersión y la reflexión. (Fasulo, 2012).

La distribución de la radiación solar en función de la longitud de onda se denomina espectro solar. La emisión de un cuerpo negro que tiene la temperatura del Sol proporciona una buena aproximación al espectro solar. Esta emisión viene dada por la llamada función de Planck que relaciona la energía emitida con la longitud de onda y la temperatura del cuerpo negro (Sokolik, 2008):

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2\hbar c^2}{\lambda^5 \left( e^{\frac{\hbar c}{k_B T \lambda}} - 1 \right)} \quad (01)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de la onda,  $\hbar$  es la constante de plank ( $6,63 \times 10^{-34}$  Js),  $k_B$  es la constante de Boltzmann ( $1,38 \times$

$10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ ),  $c$  es la velocidad de la luz, y  $T$  es la temperatura absoluta (kelvin) del cuerpo negro (Sokolik, 2008).



*Figura 3.* Espectro de radiación de un cuerpo negro (rojo) con temperatura efectiva de 5785 K comparado con el espectro solar. Elaborado a partir de los datos de NREL (2020).

### 2.2.2. Constante solar

La cantidad de energía solar por unidad de tiempo, a la misma distancia media de la tierra al sol, recibido por unidad de área en una superficie normal a los rayos del sol incidente fuera de la atmósfera terrestre es la llamada constante solar,  $G_{sc}$ . La distribución de esta energía en función de la longitud de onda es el espectro solar extraterrestre (Sayigh, 1977). El valor de la constante solar es difícil de

medir desde la superficie terrestre a causa de los efectos de la atmosfera. Un método para la medición de la constante solar fue propuesta por primera vez en 1881 por Langley, quien dio su nombre a la unidad de medida de la constante solar como Langley por minuto, ( $\text{Langley}/\text{min}$ ) y que era igual a calorías por centímetro cuadrado por minuto, ( $\text{cal}/\text{cm}^2\text{min}$ ). Posteriormente se cambió al sistema internacional SI como Watts por metro cuadrado,  $\text{W}/\text{m}^2$  (Kalogirou, 2009).

Es curioso que a pesar de su denominación “*constante solar*”, su valor no siempre fue constante y ha ido cambiando a medida que se fueron desarrollando nuevas tecnologías y métodos para su medición.

En 1971 la NASA adoptó el valor de la constante solar igual a  $1353 \text{ W}/\text{m}^2$ . Frohlich, en 1977, calculó un valor igual a  $1377 \text{ W}/\text{m}^2$ . En 1982 Hickey obtuvo un valor igual a  $1372,7 \text{ W}/\text{m}^2$  (Ari rabl, 1985). La constante solar calculada y aceptada en la mayor parte de los años 80 fue de  $1369 \text{ W}/\text{m}^2 \pm 0,25 \%$ . en el 2008 se cambió al valor de  $1360,8 \text{ W}/\text{m}^2 \pm 0,5 \text{ W}/\text{m}^2$  de acuerdo a las medidas para todo el rango espectral de la radiación solar y una serie de nuevas pruebas radiométricas realizadas en los laboratorios de la NASA (Fasulo, 2012). En el año 2000, el valor adoptado por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM por sus siglas en ingles) para la constante solar fue de  $1366,1 \text{ W}/\text{m}^2$  (Kalogirou, 2009). Este valor fue revalidado

en un estudio realizado por Gueymard en el 2018 y se usa en la actualidad según las normativas ISO (Gueymard, 2018).

$$G_{sc} = 1366,1 \text{ W/m}^2 \pm 0,5 \text{ W/m}^2$$

### **2.2.3. Radiación solar en la superficie terrestre**

Antes de llegar a la superficie de la Tierra, la radiación solar está sujeta a diversas interacciones y atenuaciones. Al principio, al llegar a la atmósfera terrestre, la radiación se refleja parcialmente en sus capas exteriores, y la parte reflejada vuelve al espacio. Luego, al atravesar la atmósfera, la radiación se atenúa aún más, ya que la atmósfera la absorbe y dispersa parcialmente (Chwieduk, 2014).

Como se vio en el apartado anterior, la energía solar disponible en la atmósfera superior de la Tierra es casi constante y depende de los movimientos y la distancia entre la Tierra y el Sol asociados con la rotación y revolución constante de la Tierra alrededor del Sol y las actividades nucleares del Sol. Como la Tierra tiene una capa de atmósfera, la energía solar disponible en la atmósfera superior de la Tierra se reduce antes de que llegue a la superficie Terrestre, dependiendo del tiempo y las condiciones climáticas, ubicaciones de la superficie y actividades locales como humo denso de incendios forestales (Enteria, 2014).

A medida que se propaga a través de la atmósfera, la radiación solar sufre dispersión y absorción por gases, aerosoles y nubes. La fracción de radiación solar que sobrevive y llega a la superficie se refleja parcialmente en la atmósfera. El resto es absorbido por la superficie. La radiación dispersa (o difusa) puede ser dispersada repetidamente y reflejada hasta que finalmente sea refleja de regreso al espacio o es absorbida por el sistema superficie-atmósfera de la Tierra. La absorción de la radiación solar, un proceso mediante el cual la energía transportada por ondas electromagnéticas se convierte en otras formas, es la única fuente significativa de calor que, en última instancia, sustenta el clima y la vida en nuestro planeta. A diferencia de la absorción, la dispersión es un proceso que conserva la energía radiante, pero redirige la energía de la onda incidente en todas direcciones (Sokolik, 2008).

La superficie de la Tierra también absorbe parte de la radiación solar que sobrevivió al atravesar la atmósfera. El resto se refleja en la atmósfera. La fracción de radiación solar reflejada por una superficie se llama albedo superficial. Las superficies con albedo bajo reflejan una pequeña cantidad de luz solar; aquellos con alto albedo reflejan una gran cantidad. En última instancia, la reflexión de la superficie y la atmósfera controla la cantidad de energía solar que regresa al espacio, que se puede expresar en términos del albedo de la Tierra en su conjunto, llamado

albedo planetario. El albedo planetario de la Tierra es de aproximadamente 0,3, es decir que alrededor del 30 % de la radiación solar se refleja y el 70 % restante es absorbido por el sistema superficie-atmósfera de la Tierra (Sokolik, 2008).

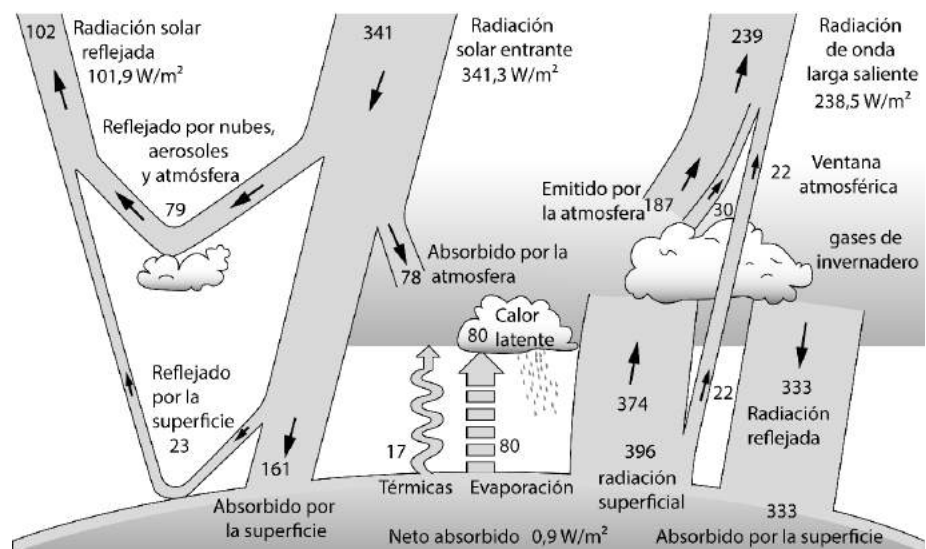


Figura 4. Balance energético medio global anual de la Tierra. Los valores son flujos promediados globales y anuales en unidades de  $W/m^2$ . Adaptado de Kiehl (1997), Sokolik (2008) y Fasulo (2012).

La Figura 4 muestra las estimaciones de la disponibilidad energética media mundial anual basado en los resultados y las observaciones de años de estudio. En la parte superior de la atmósfera, la radiación solar incidente es aproximadamente 341,3  $W/m^2$ , o un cuarto de la constante solar. Esto se debe a que el área de la sección transversal en la que la Tierra intercepta el flujo solar es  $\pi R_T^2$ , pero el

área del planeta esférico es  $4\pi R_T^2$ , donde  $R_T$  es el radio de la Tierra. Tomando el albedo planetario de 30 %, aproximadamente 238,5 W/m<sup>2</sup> (o 70 %) está disponible en promedio para calentar la atmósfera y la superficie. De esto, aproximadamente el 50 % es absorbido por la superficie. A su vez, la radiación de onda larga emitida por la superficie de la Tierra es de aproximadamente 396 W/m<sup>2</sup> que es mucho mayor que la cantidad de radiación solar absorbida por la superficie (161 W/m<sup>2</sup>). Esto enfatiza la importancia de la atmósfera como manta térmica que mantiene la superficie caliente. La mayor parte de la radiación de onda larga de la superficie es absorbida y reemitida por los gases de efecto invernadero y las nubes (y en menor medida por los aerosoles) a temperaturas más bajas. De esta emisión cerca de 333 W/m<sup>2</sup> regresa de nuevo a la superficie, mientras que unos 239 W/m<sup>2</sup> de la radiación terrestre se pierde en el espacio. Solo una pequeña fracción (22 W/m<sup>2</sup>) de la radiación emitida desde la superficie se transmite a través de la atmosférica directamente al espacio, considerando la cobertura de nubes global de aproximadamente el 62 %. Así, mientras que la radiación solar absorbida proporciona la fuente de energía, el infrarrojo térmico desempeña un papel importante en la redistribución de la energía radiante dentro de la atmósfera y entre la superficie y la atmósfera (Kiehl, 1997; Sokolik, 2008; Fasulo, 2012).

A nivel mundial, el calor latente se libera de la superficie al alrededor de tres cuartos ( $80 \text{ W/m}^2$ ), y calor sensible un cuarto ( $17 \text{ W/m}^2$ ) de la energía radiante media anual absorbida por la superficie (onda corta y onda larga). Los ecosistemas ejercen una influencia importante en la distribución de la energía entre el calor sensible y latente. La presencia de vegetación tiende a incrementar los flujos de calor latente en relación con los flujos de calor sensible. Si no hubiera una transferencia de calor latente y sensible, la temperatura de la superficie terrestre sería mucho más alta que el valor observado de  $288 \text{ K}$ . El examen del balance de radiación global revela un papel vital de la composición atmosférica y la superficie en el control del clima de nuestro planeta. Cualquier cambio (natural o inducido por el hombre) en los gases, aerosoles, nubes o la superficie tiene el potencial de alterar el equilibrio de la radiación (Sokolik, 2008; Fasulo, 2012).

Es evidente, entonces, que la radiación solar que llega a la superficie de la tierra se reduce por debajo de la radiación solar extraterrestre  $G_{\text{on}}$ , debido a que la radiación solar se agota durante su paso por la atmósfera antes de llegar a la superficie terrestre.

Debido a la rotación terrestre la posición del sol en el cielo cambia a medida que transcurre las horas del día, esto implica necesariamente que la radiación solar recorre diferentes longitudes de

trayecto dentro de la atmosfera antes de alcanzar la superficie de la tierra debido a la variación de su ángulo de incidencia (sobre la atmosfera) respecto al cenit  $\theta_z$ . El grado de atenuación de la radiación solar que viaja a través de la atmósfera terrestre depende de la longitud del camino y de las características del medio por la cual atraviesa (Chwieduk, 2014).

**La masa de aire (AM)** se define como una relación entre la masa de la atmósfera, que necesita ser atravesada por la radiación solar, para que pueda alcanzar la superficie de la Tierra, a la masa de la atmósfera que la radiación tendría que atravesar si el sol estuviera en su cenit. En los cálculos de radiación solar, una masa de aire estándar se define como la longitud del camino que debe atravesar la radiación solar para alcanzar el nivel del mar cuando el sol está en su cenit (Kalogirou, 2009).

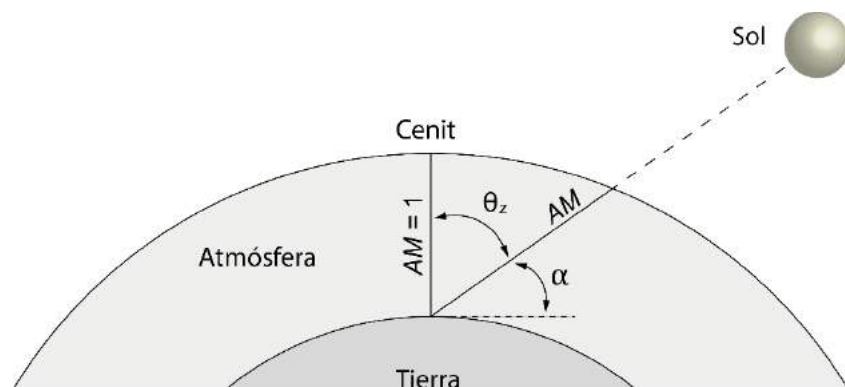


Figura 5. Masa de aire. Adaptado de Kalogirou (2009).

La reducción de la intensidad de la radiación solar con el aumento del ángulo cenital del sol generalmente se asume que es directamente proporcional al aumento de la masa de aire y se supone que la masa de aire es la inversa del coseno del ángulo cenital entre la normal a la superficie de la Tierra y la dirección de haz (Kalogirou, 2009; Chwieduk, 2014):

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta_z)} \quad (02)$$

Para ángulos cenitales entre  $0^\circ$  y  $70^\circ$ , se utiliza la siguiente aproximación (Chwieduk, 2014):

$$AM = \frac{P}{P_o \cos(\theta_z)} \quad (03)$$

Los símbolos  $P$  representan la presión atmosférica, mientras que  $P_o = 1013$  hPa es la presión estándar y el símbolo  $P$  es el valor de presión real (hPa). Si asumimos que la presión atmosférica real  $P$  es igual a la presión atmosférica estándar (es decir,  $P = P_o$ ), se puede derivar una relación simplificada descrita por la ecuación 02.

Por lo tanto, a nivel del mar ( $P = P_o$ ) cuando el sol está directamente arriba, es decir cuando  $\theta_z = 0^\circ$ , la masa de aire es 1 ( $AM1$ ); y cuando  $\theta_z = 60^\circ$ , se tiene la masa de aire es 2 ( $AM2$ ). De

manera similar, la radiación solar fuera de la atmósfera terrestre tiene una masa de aire cero ( $AM0$ ).

Para ángulos cenitales menores a  $70^\circ$ , la aproximación según la ecuación 03 ya no se puede utilizar, ya que la curvatura y la refracción de la luz de la Tierra se convierten en factores importantes que deben tenerse en cuenta. Dickinson y Cheremisinoff propusieron la siguiente relación aproximada para su uso en todo el rango de ángulos cenitales (Chwieduk, 2014):

$$AM = \frac{1 - 0,1H}{\sin(\alpha) + 0,15(\alpha + 3,9)^{-1,253}} \quad (04)$$

Donde  $\alpha$  es la altitud solar,  $\alpha = 90^\circ - \theta_z$  (figura 5).  $H$  es la altitud del lugar sobre el nivel del mar en kilómetros.

### 2.3. Irradiancia solar

Un parámetro que se utiliza ampliamente para describir la cantidad de radiación es la irradiancia. Se define como la energía incidente por unidad de área de una superficie y se encuentra mediante la integración de todo el espectro de la radiación solar (Chwieduk, 2014).

La *Irradiancia normal solar directa* ( $G_N$ ) es la medida de la radiación solar recibida por unidad de área por una superficie que se mantiene siempre perpendicular (o normal) a los rayos paralelos que vienen en línea recta

directamente desde el sol. Se mide por medio de pirheliómetros, instrumento de tipo telescópico con una apertura de diámetro pequeño. Las superficies receptoras del pirheliómetro deben mantenerse en todo momento perpendiculares a la dirección de la radiación solar, por lo que el uso de un sistema de seguimiento es adecuado. Esta cantidad es de especial interés para los colectores solares de concentración, en los que los espejos o lentes controlan solo la radiación del haz. Los montajes en los colectores que siguen la posición del sol en el cielo buscan maximizar la captación de la Irradiancia normal solar directa (Lozano, 2019).

La ecuación para la irradiancia solar directa en el plano del colector solar,  $G_{N-colector}$ , es esta irradiancia normal directa multiplicada por el coseno del ángulo de incidencia (Walker, 2013).

$$G_{N-colector} = G_N \cos\theta \quad (05)$$

El ángulo de incidencia,  $\theta$ , es el ángulo entre una normal (perpendicular) a la superficie y una línea al sol. La radiación de haz directo es la parte de la luz solar responsable de proyectar sombras, y la luz solar difusa ilumina el interior de la sombra.

La irradiancia solar difusa ( $G_D$ ) es la cantidad de radiación recibida (por unidad de área) por una superficie que no llega en un camino directo desde el sol, sino que es isotrópica, lo que significa que proviene igualmente de todas

las direcciones. Se mide sobre una superficie horizontal con un piranómetro, que incorpora un disco o una banda sombreadora, para evitar la visión del disco solar (lo que elimina la componente directa) en su recorrido diario.

Con este supuesto isótopo, la Irradiancia solar difusa en el plano del colector solar,  $G_{D-colector}$ , es la Irradiancia difusa isótopa multiplicada por el factor de visión de la radiación de la superficie al cielo (Walker, 2013).

$$G_{D-colector} = G_D \left( \frac{1 + \cos\beta}{2} \right) \quad (06)$$

También hay modelos anisotrópicos (Duffie & Beckman, 2013), en las que asumen que el difuso se dispersa hacia adelante si la radiación del haz es alta, e isotrópico si la radiación del haz directo es baja.

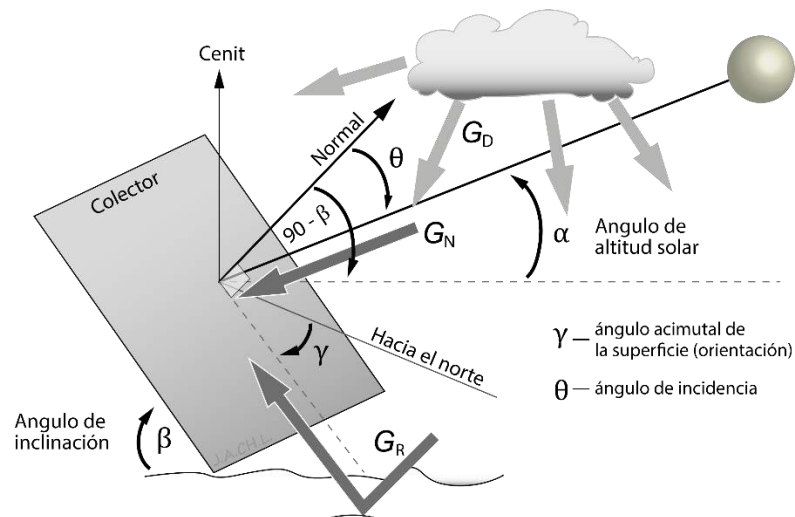


Figura 6. Componentes de la irradiación solar. Adaptado de Walker (2013).

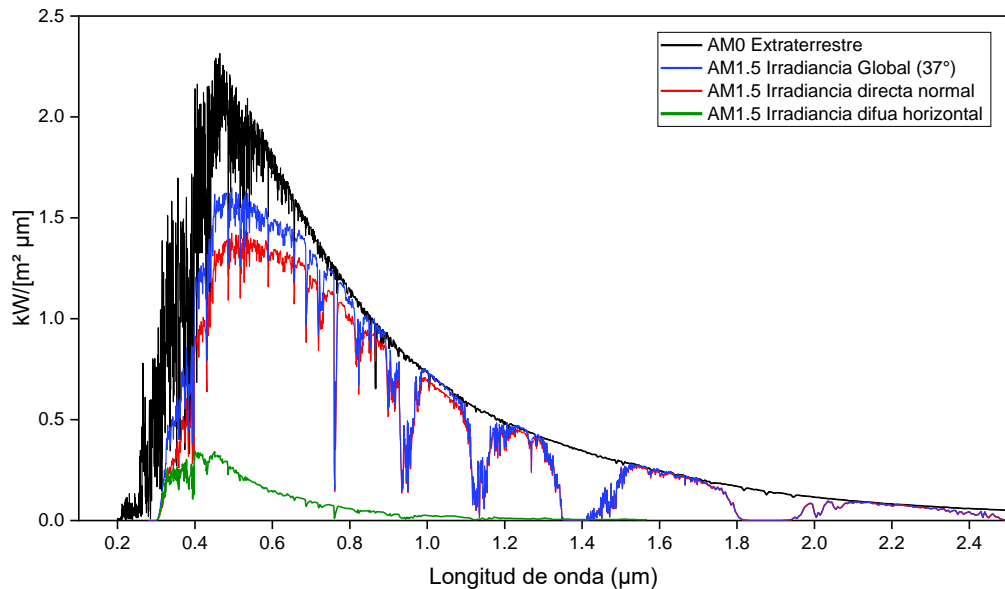
La *irradiancia solar reflejada por el suelo* ( $G_R$ ) es una tercera fuente de radiación solar que incide sobre el colector y que proviene de la radiación (directa y difusa) que incide en el suelo delante del colector solar y que se refleja hacia arriba y hacia la superficie del colector. Esto puede ser significativo para los colectores en ángulos de inclinación pronunciados y cuando el suelo está cubierto de nieve o es muy reflectante. La radiación reflejada por el suelo viene dada por la siguiente ecuación (Walker, 2013):

$$G_R = (G_N \sin \alpha + G_D) \rho_{suelo} \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \quad (07)$$

Donde  $\rho_{suelo}$  es la reflectancia del suelo.

La *irradiancia solar global* ( $G$ ) es la suma de toda la radiación que incide en el colector: irradiancia normal directa, difusa y reflejado por el suelo. Este parámetro representa la energía total disponible que llega a una superficie horizontal y suele ser el factor más importante para comprender el recurso disponible para los sistemas fotovoltaicos, los colectores de placa plana y los colectores de tubos al vacío con propósitos de calentamiento de agua a temperaturas no superiores a 100 °C (Duffie & Beckman, 2013; Walker, 2013; Wright, 2008).

$$G = G_N + G_D + G_R \quad (08)$$



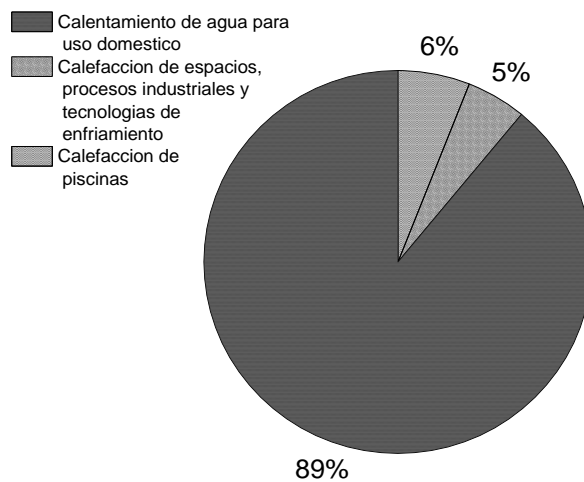
*Figura 7.* Espectros de la radiación solar en sus diferentes componentes. Elaborado a partir de los datos de NREL (2020).

#### 2.4. Terma solar

Los sistemas solares térmicos se consideran una tecnología madura que ha penetrado en los mercados de todo el mundo con la mayor capacidad instalada total entre otras tecnologías de energía renovable. El tipo de colector solar, el tipo de sistema en el que están integrados los colectores y la aplicación para la que se utilizan varían, dependiendo principalmente de la ubicación. (Duffie & Beckman, 2013; Lozano, 2019).

En 2016 Los colectores térmicos de tubos al vacío cubrieron el 71 % del total instaladas a nivel mundial, principalmente debido a su mayor participación en el mercado más grande del mundo, China. Los colectores de

placa plana constituyen el segundo lugar con un aproximado de 22 % y los colectores de líquidos sin cristal cubren menos del 7 % (Wang, 2016).



*Figura 8.* Usos más comunes de las termas solares a nivel mundial. Adaptado de Wang (2016).

La gran mayoría de la capacidad instalada, como se presenta en la figura 8 (casi el 90 %) se utiliza para cubrir agua caliente para usos sanitarios, en forma de sistemas de termosifón (no bombeado) con menos de una cuarta parte de circulación forzada. El agua de calefacción para piscinas es la segunda aplicación más utilizada (alrededor del 6%), principalmente en forma de colectores de líquido sin cubiertas de cristal, mientras que menos del 5% de la capacidad instalada total se utiliza para suministrar calor para calefacción de espacios, procesos industriales, o tecnologías de enfriamiento solar impulsadas térmicamente (Wang, 2016).

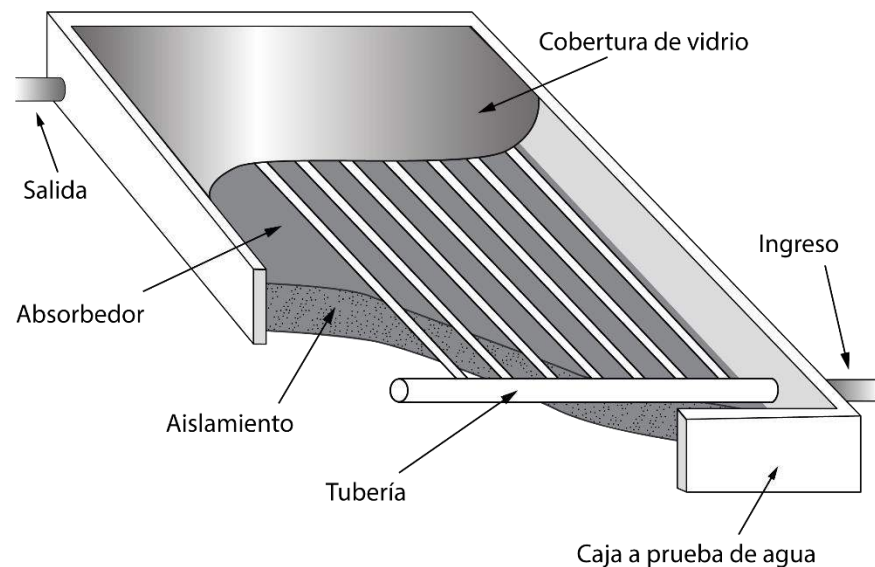
Los sistemas de calefacción solar para producción de agua caliente para uso sanitario son los más habituales. Se pueden emplear una variedad de sistemas para producir agua caliente, como termosifón, sistemas de circulación directa e indirecta y sistemas de aire. Para que los sistemas se utilicen sin problemas cuando la temperatura del aire está por debajo del punto de congelación, se suelen emplear sistemas de circulación indirecta. Los sistemas comunes consisten principalmente en colectores solares de placa plana, un tanque de almacenamiento con una base empotrada y la tubería necesaria. La eficiencia media anual del sistema para la conversión de la radiación solar en energía útil en forma de agua caliente varía entre el 30 % y el 40 %, dependiendo principalmente del tipo de colector solar utilizado (Wang, 2016).

Existe una gran variedad de termas solares disponible hoy en el mercado, aquí se describirán solo los principales tipos de termas solares, recomiendo ampliamente el trabajo titulado “Latest advances on solar thermal collectors: A comprehensive review” escrito por Evangelisti et al. (2019), Donde resume con bastante precisión los diferentes tipos de termas solares que existen hoy.

#### **2.4.1. Colectores solares de placa plana**

Un colector solar de placa plana típico consiste en un absorbedor negro en el que la radiación solar absorbida se convierte en calor, que a su vez

se conduce a un fluido. El absorbedor incluye tuberías a través de los cuales fluye el líquido caloportador. La parte posterior y los lados del absorbedor están aislados y la parte frontal está cubierta con un material transparente que permite que la radiación solar llegue al absorbedor y reduce las pérdidas de calor hacia el ambiente.



*Figura 9.* Colector de placa plana. Adaptado de Foster et al. (2010)

Todo lo anterior está encerrado en una carcasa de metal que brinda protección contra la intemperie y ofrece soporte estructural. El cobre, el acero (inoxidable o no), el aluminio, el vidrio y varios plásticos son algunos de los materiales utilizados en los colectores de placa plana. El tipo de materiales y la tecnología utilizados en la producción de

sistemas solares son críticos en la estimación de la carga térmica que pueden cubrir los sistemas, ya que influyen en las características técnicas de los colectores y, en consecuencia, en la eficiencia del sistema (Wang, 2016).

#### **2.4.2. Colectores solares con tubos de vacío**

Los colectores de tubo de vacío tienen un mejor rendimiento que los colectores de placa plana para operaciones a alta temperatura en el rango de 77 a 170 °C debido a la reducción de la pérdida de calor por convección gracias a la envoltura de vacío alrededor de la superficie del absorbedor. Fue propuesto por primera vez por Speyer (1965). Speyer hizo las primeras pruebas de la eficiencia de un colector solar de un tubo de vacío prototipo y elaboró un análisis de costos del proceso de fabricación de los tubos de vacío (Budihardjo, 2005). Este tipo de colectores son muy adecuados para aplicaciones de calefacción comerciales e industriales y también para aplicaciones de refrigeración mediante la regeneración de ciclos de refrigeración. También pueden ser una alternativa eficaz a los colectores de placa plana para la calefacción de espacios domésticos, especialmente en regiones donde a menudo está nublado (Tin-tai et al, 2011).

Incluso un vacío deficiente eliminará sustancialmente la transferencia de calor por convección, pero para eliminar la mayor parte de

la transferencia de calor por conducción, el camino libre medio de una molécula en el aire debe ser más largo que el ancho del espacio de vacío (Speyer, 2016).

El uso de las termas solares con tubos de vacío está incrementando debido a su buena eficiencia térmica y las altas temperaturas del agua que se puede almacenar a comparación de los colectores de placa plana.

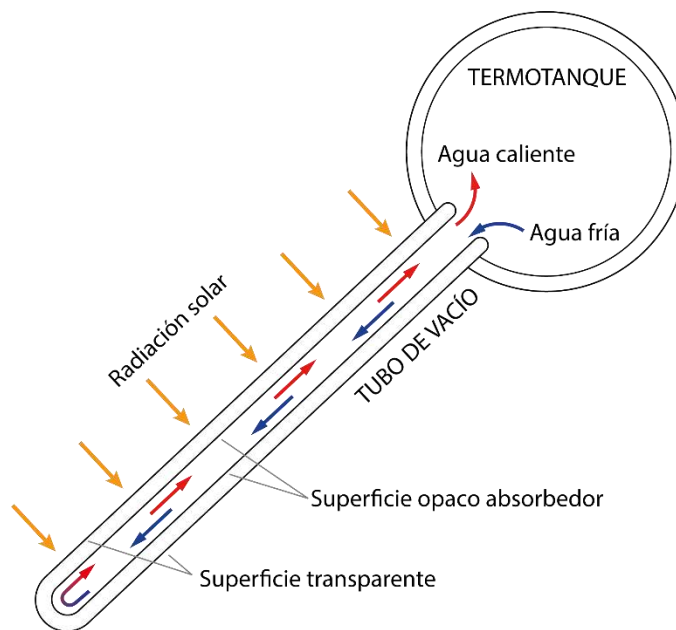


Figura 10. Colector con tubo de vacío. Adaptado de Budihardjo (2005)

Un colector solar de tubo de vacío consta de filas de tubos de vidrio paralelos conectados a un termotanque. El aire dentro de cada tubo se elimina alcanzando presiones de vacío de alrededor de  $10^{-3}$  mbar. Esto crea condiciones de alto aislamiento para eliminar la pérdida de calor por

convección y radiación, por lo que se pueden alcanzar temperaturas más altas que las de los colectores de placa plana. Una variante del vacío es que el tubo puede utilizar un gas de baja conductividad térmica como el xenón. Cada tubo de vacío tiene una superficie absorbente en el interior. Dependiendo del mecanismo para extraer calor del absorbedor, los colectores solares de tubo de vacío se clasifican en Direct-flow (flujo directo) y heat-pipe (tubo de calor). la figura 10 muestra cómo trabaja una terma solar con colectores de tubos de vacío en su configuración Direct-flow.

## **2.5. Termas solares con colectores de tubos de vacío tipo Direct-Flow**

A pesar de haberse utilizado durante décadas, los colectores solares de tubo de vacío no han supuesto una competencia real a los colectores solares de placa plana, principalmente debido a los altos costos de los procesos de fabricación y las dificultades para proporcionar buenas juntas entre el tubo de vidrio y los colectores metálicos de extracción de calor en los primeros modelos. El colector con tubo de vacío tipo direct-flow es atractivo debido a su simplicidad y su bajo costo de fabricación, este modelo ha entrado como competidor directo a las de placa plana y superado en uso ampliamente (Budihardjo, 2005).

Un colector tipo Direct-flow consta normalmente de 15 a 40 tubos de vacío con un extremo conectado directamente a un tanque horizontal. El tubo consta en realidad de dos tubos de vidrio concéntricos sellados en un extremo con un espacio de vacío anular en el medio y un absorbente de superficie selectivo recubierto en la superficie exterior del tubo interior como se ve en la figura 11 (Budihardjo, & Morrison, 2009).



*Figura 11.* Tubo al vacío del tipo direct-flow o flujo directo. Adaptado de Sabiha et al. (2015).

El comportamiento de este tipo de tubos de vacío depende de la velocidad de calentamiento del fluido el cual se determina analizando la temperatura en el termotanque (Montoya, 2011). La transferencia de calor en este colector es impulsada puramente por la circulación natural del agua (termosifón) a través de los tubos de un solo extremo con conexión directa a un tanque horizontal (Budihardjo, 2005).

### **2.5.1. Efecto termosifón**

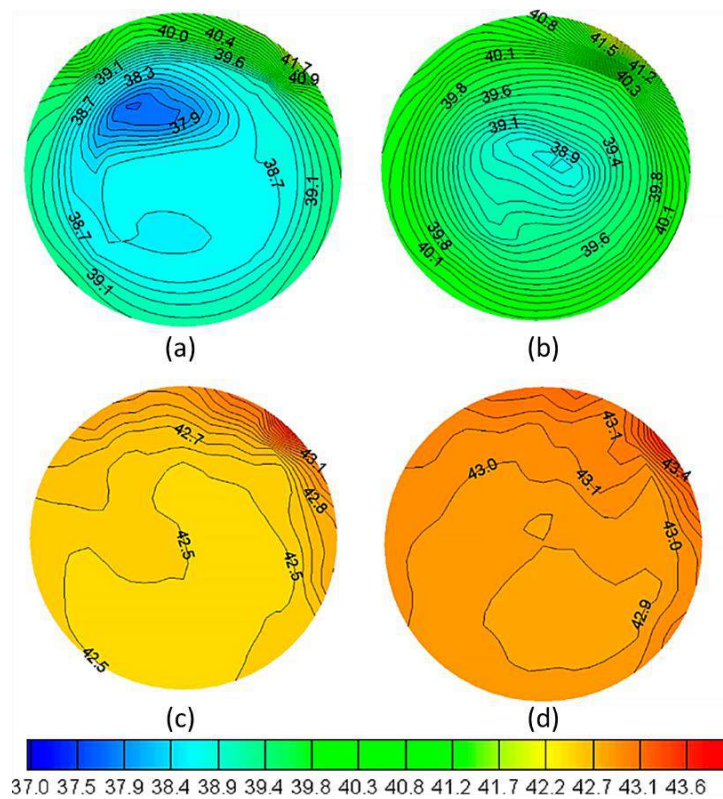
La transferencia de calor en las termas solares del tipo Direct-flow está dada puramente por la circulación natural del agua a través de los tubos de vacío. El agua dentro de cada tubo es calentada por la radiación solar y se eleva hasta el termotanque, el espacio dejado es inmediatamente remplazado por agua fría (Budihardjo & Morrison, 2009). El flujo de circulación a través de los tubos está influenciado por dos factores: la intensidad de la radiación que incide sobre la superficie del absorbedor y la temperatura del termotanque. En operaciones de mayor temperatura, la viscosidad del agua es menor y el gradiente de densidad es mayor. Como el gradiente de densidad es la fuerza impulsora de la circulación natural, el caudal a través del tubo aumenta a medida que aumenta la temperatura del termotanque (Morrison et al., 2005).

Cuando la radiación solar empieza a incidir sobre el colector, los tubos de vacío empiezan a trabajar lentamente. Cuando la radiación solar incide sobre la capa de absorción selectiva en el tubo interno, el tubo se calienta y transfiere calor al agua en su interior. A medida que el agua se calienta lentamente, el agua caliente empieza a moverse lentamente hacia el termotanque, por otro lado, el agua fría que está dentro del termotanque sale hacia los tubos de vacío. Este movimiento

recíproco de cada tubo de vacío hacia el termotanque y del termotanque hacia cada tubo de vacío se llama circulación natural (Mohammadkarima, 2014). A medida que el sol se eleva la irradiancia solar incrementa, la temperatura del agua se eleva y el flujo de agua aumenta. Cuando el sol se aproxima a su punto más elevado, la temperatura del agua dentro de cada tubo de vacío se hace muy caliente. La circulación natural en cada tubo de vacío es debido a la diferencia de densidades del agua caliente y el agua fría; ya que la densidad del agua caliente es menor que la densidad del agua fría, el agua que es calentada en cada tubo de vacío fluye hacia el termotanque y el agua fría que está en el termotanque fluye hacia los tubos de vacío (Mohammadkarima, 2014).

Debido a la variación de la intensidad de la radiación solar y el ángulo de incidencia en la superficie del tubo, el flujo de agua dentro del tubo de vacío muestra dos tipos diferentes de perfiles. El primero que ya se conoce es lineal y paralelo al eje del tubo según el *flujo de boyante*. La segunda es una forma helicoidal generada por el movimiento de la irradiancia alrededor de la transversal del tubo y el movimiento del flujo axialmente hacia arriba debido a la flotabilidad. Por esta razón, la segunda forma aparece claramente después del mediodía solar. Este flujo hace que el agua caliente suba hacia el tanque. Por otro lado, el

agua fría se mueve hacia abajo en el mismo perfil de forma de flujo. Este perfil de flujo de forma helicoidal aparece alrededor del mediodía solar después de que aumenta la temperatura del agua y aumenta la tasa de flujo flotante (Essa & Mostafa, 2017).



*Figura 12.* Gradientes de temperatura tomados a las 11 [h] hora solar. Los contornos se capturan en cuatro secciones transversales diferentes del tubo de vacío, (a) Abertura superior, (b) 1/4 de longitud de tubo dirigida desde la apertura superior, (c) 1/2 longitud de tubo dirigida desde la apertura superior, (d) 3/4 de longitud de tubo dirigida desde la apertura superior. (Essa & Mostafa, 2017).

Se observa el crecimiento del flujo termosifónico al aumentar la radiación solar incidente y al aumentar la relación longitud/diámetro del tubo. La variación del flujo termosifónico muestra una dependencia directa respecto a la relación longitud diámetro del tubo absorbedor y con la radiación incidente (absorbida) en el tubo colector. Esto corrobora el aumento de la energía útil al aumentar el área de captación para un coeficiente de pérdida determinado (Cisneros & Recalde, 2015).

Los experimentos han demostrado que la correlación entre el flujo del termosifón y la tasa de la insolación global es lineal, además el flujo termosifónico se estabiliza durante el medio día (Kudish et al., 1985).

### **2.5.2. Eficiencia**

La eficiencia del calentador solar es el porcentaje de la energía solar que realmente se aprovecha para calentar el agua (Mendoza, 2014) y se define como el cociente de la energía térmica útil frente a la energía solar total recibida según la norma ASHRAE 93-2003 (Rondan et al. 2016; Zubriski & Dick, 2012)

$$\eta = \frac{\text{energía útil real recolectada}}{\text{energía solar interceptada por el área bruta del colector}} \quad (09)$$

El concepto de eficiencia apropiado para caracterizar una terma solar es el referente a la de su rendimiento global: la eficiencia ( $\eta_E$ ), que se define como la energía térmica útil ( $E_T$ ) ganada por la terma solar dividido por la energía solar disponible ( $E_S$ ) ese día o durante el periodo de evaluación (Mendoza, 2014).

$$\eta_E = \frac{\text{Energía térmica útil } (E_T)}{\text{Energía solar disponible } (E_S)} \quad (10)$$

La diferencia entre la ecuación 09 y la ecuación 10, es que la primera permite calcular la eficiencia de la terma solar para un instante de tiempo (eficiencia instantánea) mientras que la segunda permite calcular la eficiencia de la terma solar para un periodo largo de evaluación (eficiencia horaria, diaria, mensual y anual)

La energía térmica útil  $E_T$  ganada por la terma se calcula a partir de la ecuación (Lozano, 2019; Montoya, 2011).

$$E_T = mc_p\Delta T \quad (11)$$

Donde  $m$  es la masa total,  $c_p$  el calor específico de la sustancia y  $\Delta T$  es la variación de la temperatura (Montoya, 2011).  $E_S$  se calcula

hallando el área bajo la curva de la irradiancia dentro del intervalo de tiempo en la cual dura la evaluación.

La tasa de calor alcanzado en el tanque por cada tubería viene dada por la ecuación (Mohammadkarima, 2014):

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}c_p(T_{out} - T_{in}) \quad (12)$$

Donde  $\dot{m}$ ,  $T_{out}$ ,  $T_{in}$ ,  $c_p$  son el flujo masico, temperatura de salida, temperatura de ingreso y calor especifico respectivamente. Considerando la cantidad de tubos de vacío  $N_t$  que componen el colector, el calor total es (Mohammadkarima, 2014):

$$\dot{Q}_{col} = N_t \dot{Q}_{in} \quad (13)$$

La eficiencia de una terma solar con tubos de vacío para calentamiento de agua de uso doméstico está dada por las siguientes ecuaciones (Budihardjo, 2005; Kurpaska et al., 2019; Lozano, 2019; Majid et al., 2015; Mohammadkarima, 2014)

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{util}}{A_c G} \quad (14)$$

$$\eta = \eta_o - a_1 \frac{(T_m - T_a)}{G} - a_2 \frac{(T_m - T_a)^2}{G} \quad (15)$$

Donde  $G$  es la irradiancia solar ( $\text{w/m}^2$ ) y  $\eta_o$  es la eficiencia óptica,  $T_m$  la temperatura promedio,  $A_c$  el área total del colector sobre la cual incide la irradiancia solar. Las constantes  $a_1$  y  $a_2$  se obtiene a través de simulaciones y análisis numérico mediante los datos experimentales.

Haciendo el uso de la ecuación 14 podemos obtener eficiencias horarias, diarias o mensuales. En general se puede obtener la eficiencia para un periodo de tiempo  $\Delta t$  (Mohammadkarima, 2014).

El área total del colector sobre la cual incide la irradiancia solar  $A_c$  es mayor al medio día que en cualquier otro momento del día. Al medio día cerca del 33 % de tubo interior absorbedor de cada tubo de vacío está expuesto al sol. Entonces, el área sobre la cual incide la radiación solar o área de apertura de un solo tubo  $A_t$  es igual a (Majid et al., 2015)

$$A_t = 0,33 \pi d l \quad (16)$$

Donde  $d$  es el diámetro del tubo interior absorbedor y  $l$  es la longitud de la misma. Entonces si consideramos el número total de tubos de vacío como  $N_t$ , tendremos:

$$A_c = N_t A_t \quad (17)$$

## 2.6. El clima

La Organización Meteorológica Mundial en la conferencia de Varsovia (1935) definió como clima las condiciones meteorológicas medidas para el mes y el año, calculadas sobre un periodo de treinta años. Las principales variables meteorológicas que caracterizan el clima de un lugar son la temperatura, la presión atmosférica, el viento, la humedad, la precipitación y radiación solar.

**Temperatura:** es una de las magnitudes más utilizadas para describir el estado de la atmósfera. Formalmente, la temperatura es una magnitud relacionada con la rapidez del movimiento de las partículas que constituyen la materia. Cuanto mayor agitación presenten éstas, mayor será la temperatura. Para medir la temperatura, tenemos que basarnos en propiedades de la materia que se ven alteradas cuando ésta cambia: la resistencia eléctrica de algunos materiales, el volumen de un cuerpo, el color de un objeto y otros fenómenos. El instrumento que se utiliza para medir la temperatura en meteorología se llama termómetro.

**Presión atmosférica:** es la fuerza que ejerce la columna de masa atmosférica sobre una unidad de área en la superficie terrestre en un punto determinado. La presión atmosférica depende de muchas variables como la

temperatura, la humedad y sobre todo de la altitud. Cuanto a mayor altitud nos encontremos, la cantidad de aire por encima nuestro será menor, lo que hará que también sea menor la presión que éste ejerza sobre la superficie ubicado allí. La mayor presión atmosférica es la que se produce al nivel del mar. Por ende, esta medida se toma como referencia de la presión atmosférica normal.

**Viento:** El viento consiste en el movimiento de aire desde una zona hasta otra. Existen diversas causas que pueden provocar la existencia del viento, pero normalmente se origina cuando entre dos puntos se establece una cierta diferencia de presión o de temperatura. El viento se mide en dos parámetros, el primero consiste medir la velocidad horizontal del viento mediante un anemómetro, el segundo parámetro es la medida de la dirección del viento usando una veleta que nos indica la procedencia geográfica del viento.

**Humedad:** es la cantidad de vapor de agua que contiene el aire. Esta cantidad no es constante, sino que depende de muchos factores, como la lluvia, posición geográfica (si está cerca o no al mar, por ejemplo), la vegetación del lugar entre otros. Existen diversas maneras de referirnos al contenido de la humedad en la atmosfera, la más usada es la denominada *humedad relativa*, que se expresa en tanto por ciento (%) y se define como la relación entre la cantidad

de vapor de agua contenida en el aire y la máxima cantidad que el aire sería capaz de contener a esa temperatura.

***Precipitación:*** es la caída de agua sólida o líquida como consecuencia de la condensación del vapor sobre la superficie terrestre. Dentro de este concepto están los fenómenos de lluvia, granizo, llovizna, aguanieve y nieve. El proceso de precipitación está dado a través de las nubes que al ascender se expanden y se enfrían esto hace que el vapor de agua alcance el punto de rocío y la condensación.

***Radiación solar:*** La mayoría de los datos de radiación disponibles son para superficies horizontales, incluyen radiación directa y difusa y se midieron con piranómetro. Hay dos tipos de datos de radiación solar ampliamente disponibles. El primero es la radiación total diaria promedio mensual sobre una superficie horizontal, la segunda es la radiación total horaria sobre una superficie horizontal por cada hora durante períodos prolongados, como uno o más años (Duffie & Beckman, 2013)

El rendimiento de un calentador de agua solar está influenciado por las condiciones meteorológicas locales, la orientación e inclinación del colector (Budihardjo, 2005). En zonas de altura donde la temperatura es muy baja, las

rejillas de los colectores de placa plana pueden colapsar por el congelamiento del fluido caloportador (Montoya, 2011). Por esta razón los colectores solares que utilizan placa plana son más comunes en las regiones de clima cálido, mientras que los colectores de tubos de vacío se han adoptado cada vez más en el norte de Asia y en los países europeos (Budihardjo, 2005) y en lugares de mayor altitud en nuestro país, donde funcionan mejor que los colectores de placa plana debido a la menor pérdida de calor en las operaciones a temperaturas más altas en climas fríos.

## **2.7. Zonas altoandinas del Perú**

El territorio peruano ha sido dividido tradicionalmente en tres grandes regiones geográficas: la Costa, la Región Andina y la Selva; sin embargo, al no existir uniformidad de relieve, de clima ni de flora entre estas regiones Pulgar Vidal, desarrolló su tesis sobre las ocho regiones naturales del Perú, las mismas que, para su desarrollo, tienen en cuenta los criterios de altitud, ecología, clima, toponimia y actividad humana (Anaya, 2015)

Las regiones altoandinas, según Vidal, se dividen en: región *Quechua* comprendida entre los 2300 y 3500 msnm, región *Suni o Jalca* comprendida entre los 3500 y 4000 msnm, región *Puna o Jalca o Altoandino* comprendida entre los 4000 y 4800 msnm, y región *Janca o Cordillera* comprendida sobre los 4800 msnm (Anaya, 2015).

En estas regiones se caracterizan por tener temperaturas muy bajas especialmente en los meses de invierno. Estos factores climatológicos afectan a la salud de la población, en especial a los menores. Un estudio realizado por el Ministerio de Salud – MINSA, muestra el número de casos que se han atendido en menores de 5 años afectados con infecciones respiratorias agudas desde el 2008 al 2018 en la región Tacna (MINSA, 2017).

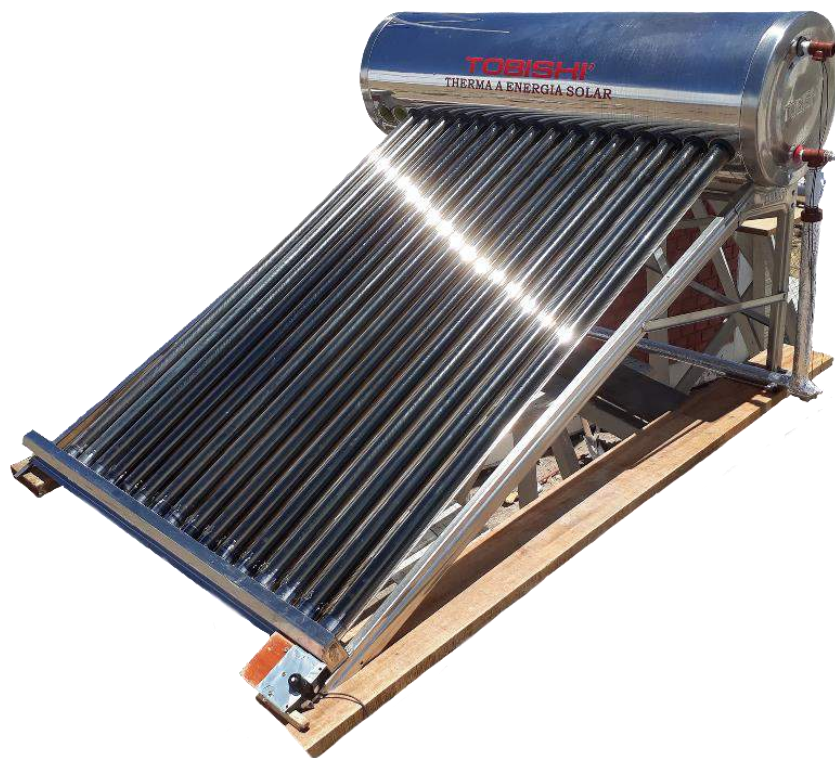
En el ámbito económico, como es común en la región alto andina del Perú, el poder adquisitivo es muy limitado ya que la población se dedica principalmente a la ganadería y a la agricultura. Un censo realizado por el Instituto Nacional de Estadística e Informática – INEI, realizada en 2017 muestra los materiales que predominan en la construcción de viviendas en la zona altoandina de nuestro país, ubicadas por encima de los 2500 msnm. En la construcción de las paredes exteriores de las viviendas predomina el adobe, seguida de ladrillo o bloque de cemento. El material predominante en la construcción de los pisos es la tierra y muy pocas viviendas tienen pisos de cemento. Para el caso del techo, el material predominante es la plancha de calamina, fibra de cemento o similares (INEI, 2019). La población escoge los materiales para la construcción para sus viviendas aquellos de acuerdo con las características de su clima y la posibilidad de encontrarlos en sus regiones.

## CAPÍTULO III

### MATERIALES

#### 3.1. Terma solar con tubos de vacío

La terma solar evaluado en este estudio está compuesto por 18 tubos de vacío tipo Direct-flow y se conectan a un termotanque que está en posición horizontal como se aprecia en la figura 13. Esta terma solar es de baja presión y funciona por el efecto termosifón.



*Figura 13.* Terma solar con tubos de vacío evaluado en el presente estudio.

### 3.2. Estación meteorológica Davis Ventage Pro

La estación meteorológica automática de la marca Davis fue instalada en la zona (en el Tambo de Kallapuma) por el proyecto 04-2018-FONDECYT-BM-IADT-MU de la Universidad Nacional de Ingeniería y monitorea los parámetros meteorológicos de la zona como es la irradiancia solar global en plano horizontal, radiación UV, temperatura del aire o bulbo seco, humedad relativa, presión atmosférica, precipitación, velocidad del y dirección y otros parámetros calculados a partir de las variables mencionadas.

A través de un convenio especial entre el presente trabajo de tesis y el proyecto mencionado de la UNI se pudo acceder a la data recopilada por esta estación meteorológica.



*Figura 14.* Estación meteorológica Davis Ventage Pro.

### 3.3. Estación Meteorológica HOBO

La estación meteorológica automática de la marca HOBO es una estación instalada en el Centro Educativo Horacio Zeballos Games como parte de la investigación de la presente tesis. A diferencia de la estación Davis, esta estación está limitada a la cantidad de sensores que se conecten a ella para poder monitorear los parámetros meteorológicos. En este caso se contó con sensores de temperatura del aire o bulbo seco, presión atmosférica, e irradiancia solar global en plano inclinado ( $24^\circ$ )

**Sensor de irradiancia solar HOBO.** El sensor de irradiancia solar HOBO se conecta de forma inalámbrica con la estación meteorológica HOBO y mide la irradiancia solar en un plano con una inclinación igual a la de los tubos de vacío ( $24^\circ$ ), el objetivo de esta inclinación es obtener la irradiancia solar para los cálculos de la eficiencia. Su rango de medición es de 0 a  $1280 \text{ W/m}^2$  con un rango espectral de 300 a  $1100 \text{ nm}$  ( $0,3 - 1,1 \mu\text{m}$ , figura 3). su precisión es de  $\pm 10 \text{ W/m}^2$  con un error adicional inducido por la temperatura de  $\pm 0,38 \text{ W/m}^2$  a partir de los  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Las características técnicas se muestran en el anexo 5.



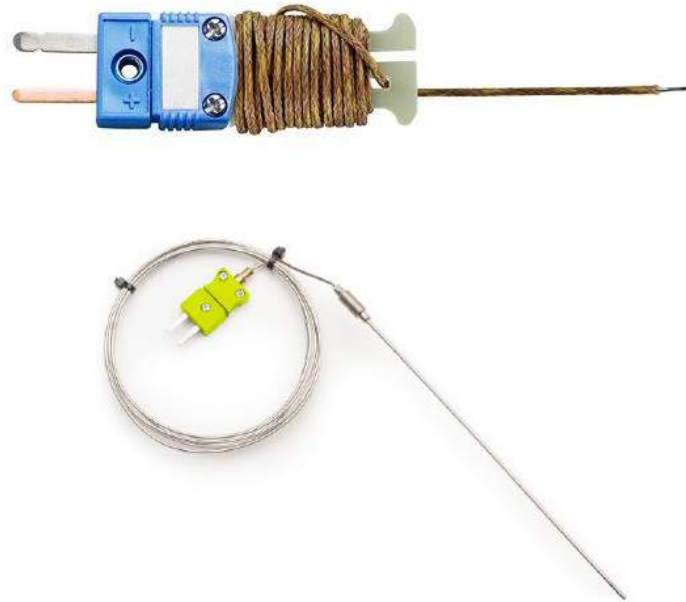
*Figura 15.* Estación meteorológica HOBO.



*Figura 16.* Sensor de Irradiancia solar HOBO. (HOBO, 2020)

### 3.4. Sensores de temperatura HOBO

Los sensores usados para esta investigación son termopares de tipo K y tipo T. se empleó un total de ocho termopares. Siete de las termocuplas son del tipo T y una de tipo K, con rango de precisión de  $\pm 1,0$  °C en el intervalo de  $-65$  °C a  $100$  °C para las termocuplas tipo T y  $\pm 2,2$  °C en el intervalo de  $0$  °C a  $293$  °C para el tipo K. La elección de los termopares, principalmente del tipo T, es debida a su precisión dentro del rango de temperaturas que alcanza la termal solar en estudio. Las características técnicas se muestran en el anexo 4.



*Figura 17.* Termopares tipo T (arriba) y tipo K (abajo). (HOBO, 2020)

**Dataloggers HOBO.** Se emplearon dos dataloggers HOBO para el almacenamiento de los datos recopilados por los termopares, cada datalogger cuenta con entradas para cuatro termopares, cuenta también con una pantalla donde se puede visualizar los valores medidos en tiempo real. Las características técnicas se muestran en el anexo 6.



*Figura 18.* Datalogger HOBO con cuatro entradas. (HOBO, 2020)

### **3.5. Otras fuentes de información meteorológica**

La estación meteorológica Davis fue instalada en la zona solo hace un par de años atrás y la estación HOBO se instaló solo para el periodo que duró la investigación. Para obtener información de los parámetros meteorológicos históricos para Kallapuma y zonas próximas se recurrió a otras fuentes.

### **3.5.1. SENAMHI**

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI, es un organismo público ejecutor adscrito al Ministerio del Ambiente que tiene como propósito generar y proveer información y conocimiento meteorológico, hidrológico y climático de manera confiable, oportuna y accesible en beneficio de la sociedad peruana. (SENAMHI, 2020)

### **3.5.2. Meteonorm**

Meteonorm es una combinación única de información climatológica y sofisticadas herramientas de cálculo para la interpolación de datos alrededor del mundo. Administra una de las bases de datos climatológicos más completas. Recopila datos de más de 8000 estaciones meteorológicas alrededor del mundo, datos a partir de 5 satélites, y a partir de mediciones de aerosoles (Meteonorm, 2020)

## **CAPÍTULO IV**

### **PROCEDIMIENTO**

#### **4.1. Lugar de estudio**

Kallapuma es un centro poblado ubicado en el distrito de Tarata, provincia de Tarata, región de Tacna. Ubicado en la zona Altoandina con una latitud de 17.315573° Sur, longitud de 69.730225° Oeste, y altitud de 4260 metros sobre el nivel del mar. Cuenta con una población de alrededor de 56 personas, un promedio de 23 viviendas (MIDIS, 2020), entre hombres, mujeres y niños. Kallapuma no cuenta con conexión a la red eléctrica. Las temperaturas de la zona pueden llegar hasta por debajo de los -15°C fenómeno conocido como la Helada, sobre todo en las épocas de invierno correspondientes a los meses de junio y julio. Este es un fenómeno adverso a nivel departamental y nacional, de mayor incidencia en el invierno, ante la ocurrencia de las heladas agronómicas y/o meteorológicas que afectan los cultivos de época o actividades humanas; generalmente tienen mayor incidencia en el territorio más cercano a Tarata, por la mayor altitud. (INDECI, 2020)

Como es característico en estas zonas, los materiales utilizados para la autoconstrucción de sus viviendas son aquellos del propio lugar acordes al clima, que en los últimos tiempos se ha ido perdiendo y actualmente recurren a materiales de baja resistencia térmica como las chapas onduladas de zinc. Según el censo realizado por el Instituto Nacional de Estadística e Informática

en el 2017, muestra los materiales que predominan en la construcción de viviendas en zonas altoandinas del Perú ubicadas por encima de los 2500 msnm. En paredes exteriores predomina el adobe, seguida del ladrillo y bloque de cemento. En pisos predomina la tierra natural compacta, y mínimamente se tienen pisos de cemento. Para el caso del techo, el material predominante es la plancha de calamina de zinc ondulada, seguido de fibrocemento o similares (INEI, 2019). Materiales que en la actualidad constituyen la envolvente de las viviendas en Kallapuma

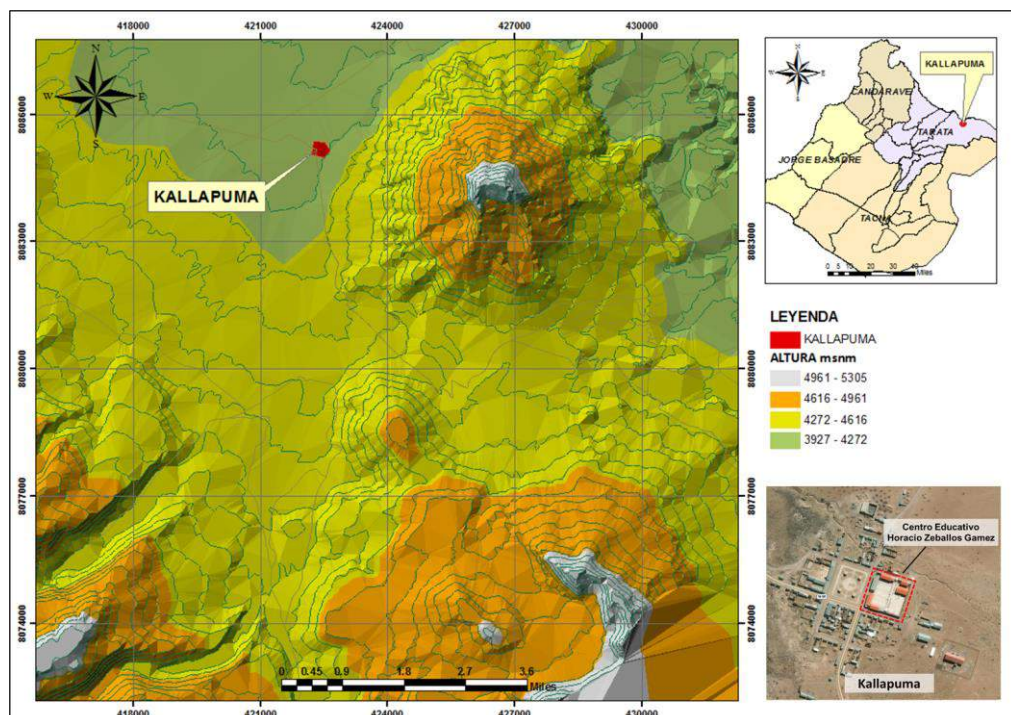


Figura 19. Ubicación geográfica del centro poblado de Kallapuma en la región Tacna.

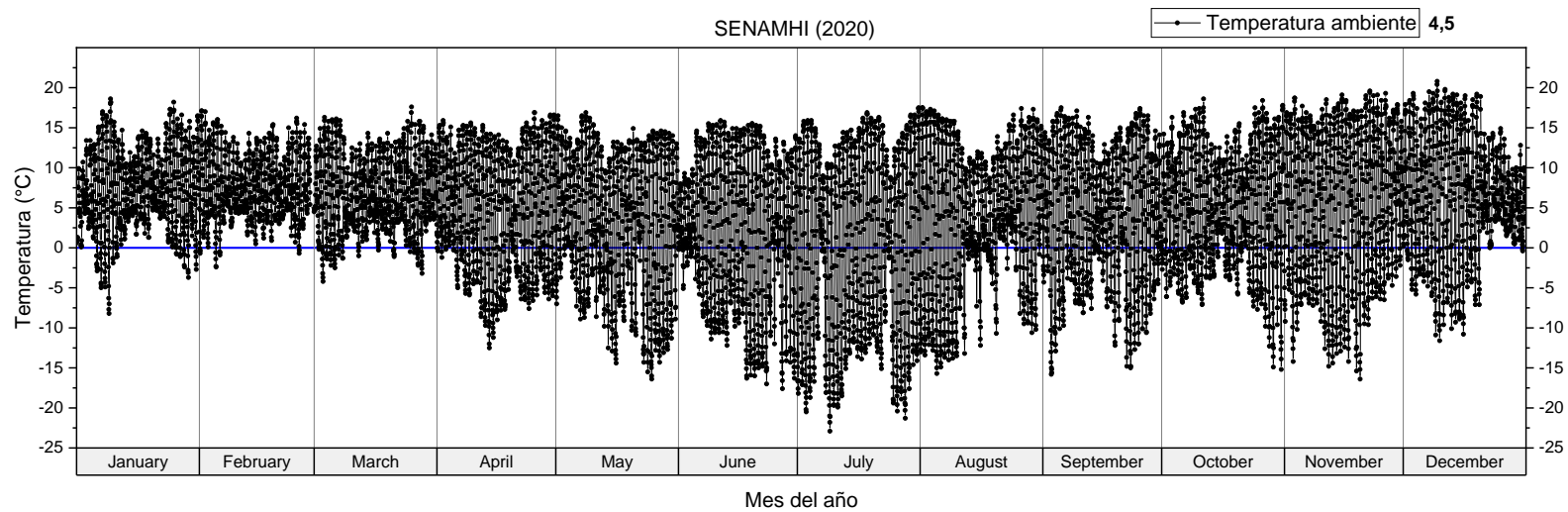


Figura 20. Temperatura ambiente para Kallapuma-Chuapalca a partir de los datos de SENAMHI para el 2020. Grafica elaborada a partir de los datos se SENAMHI (2020).

La figura 20 muestra la temperatura registrada para el año 2020 por la estación SENAMHI ubicada en Chuapalca (Lat.: 17°18'31'' S y Long.: 69°39'42'' O) a 10 Km de Kallapuma y una altitud de 4215 msnm. Estos valores son muy similares a los registrados en Kallapuma por la estación meteorológica Davis Vantage Pro como se muestra en el anexo 1 y se toman como referencia para Kallapuma. Se aprecia como fluctúa las temperaturas a lo largo del año. Las temperaturas máximas se mantienen en promedio en valores altos incluso en los meses de invierno sin embargo las temperaturas mínimas alcanzadas fluctúan bastante siendo los meses de inviernos los más críticos. Las temperaturas mínimas alcanzan fácilmente por debajo de los cero grados Celsius prácticamente todo el año.

La figura 21 muestra las temperaturas promedio mínimas ( $T_{\min p}$ ) y máximas ( $T_{\max p}$ ) diarias mensuales, temperaturas extremas mínimas ( $T_{\min t}$ ) y máximas ( $T_{\max t}$ ) diarias mensuales y temperatura promedio ( $T_{\text{med}}$ ) para el año 2020 generados a partir de los datos de la estación SENAMHI en Chuapalca. Las líneas discontinuas indican el intervalo dentro de la cual se encuentra la zona de bienestar o confort térmico. Se define el confort térmico como aquella condición de la mente que expresa satisfacción con el entorno térmico, cuando la satisfacción no es adecuada la persona siente frío o calor (ISO 7730, 1994).

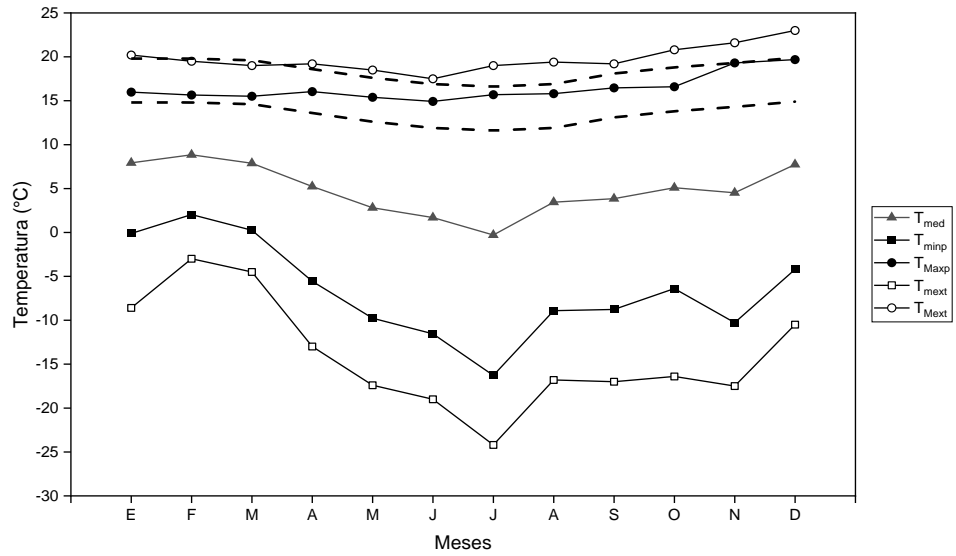


Figura 21. Temperaturas máximas y mínimas para Chuapalca-Kallapuma. Grafica elaborada a partir de los datos de SENAMHI (2020).

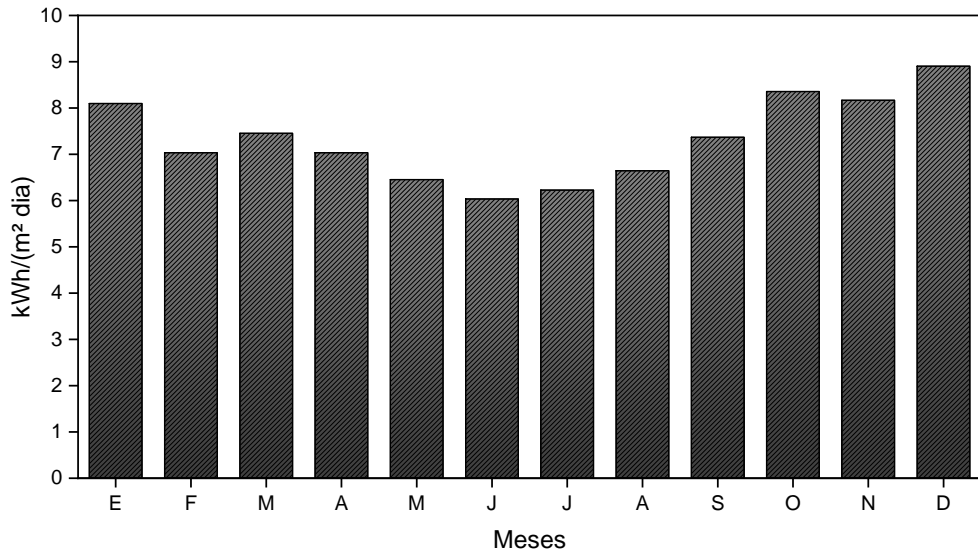


Figura 22. Energía solar media diaria por meses para Kallapuma generado a partir de los datos de Meteonorm 2020.

La figura 22 muestra la energía solar media diaria por mes para Kallapuma que se genera a partir de datos históricos de Meteonorm. Un estudio realizado por Polo (2013) muestra que la región Tacna tiene un potencial energético calculada en un valor promedio de  $(6,04 \pm 0,36)$  kWh/m<sup>2</sup> día, que es superior en 13,46 % al promedio mundial y equivale a 0,51 Kilogramos de petróleo por metro cuadrado por día.

A nivel nacional, la región de Tacna es una de las regiones con mayor potencial energético solar como se muestra en el anexo 3.

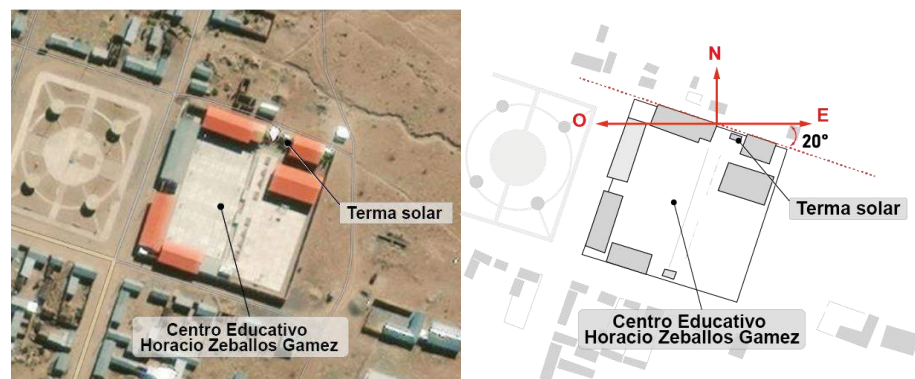
## **4.2. Reinstalación y mejoramiento de la terma solar**

Se realizó un mantenimiento completo de la terma solar que básicamente consistió en la reorientación geográfica adecuada, reinstalación de conexiones de tubería y colocación de aislamiento térmico.

### **4.2.1. Reorientación de la terma solar**

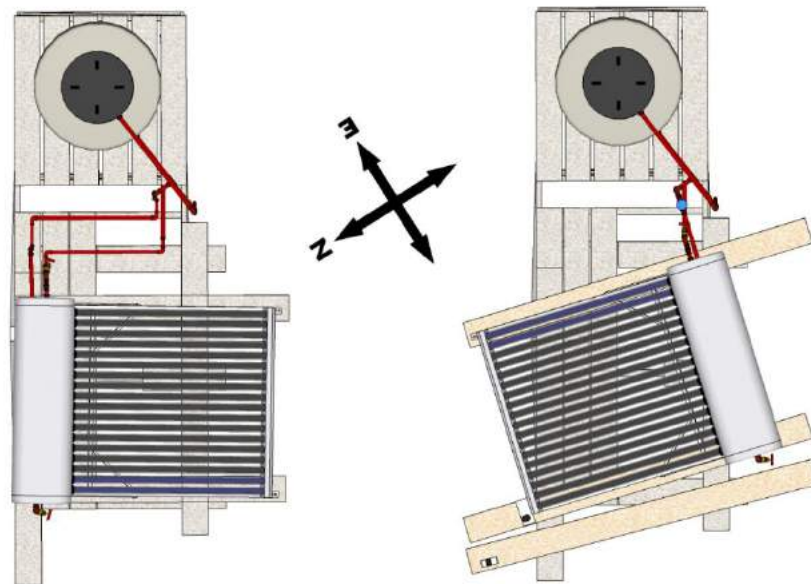
La terma solar objeto de estudio, inicialmente estaba orientada hacia el sur con una rotación de 20° respecto al norte (hacia el SSO aproximadamente) como se muestra en la imagen 23. considerando que el Perú se encuentra en el hemisferio sur terrestre, la orientación adecuada debe ser hacia norte. Esta inadecuada instalación de la terma solar provoca que el agua no se caliente de manera eficiente durante el

día y el año de modo que no es posible suministrar agua caliente. Este error de instalación se debe en parte a la falta de entidades que fiscalicen la construcción, funcionamiento y venta de los SCAES en el Perú. (Flores, 2017)



*Figura 23.* Orientación geográfica de la terma solar inicialmente instalada.

Para su adecuado funcionamiento se reorientó la terma solar hacia el norte con una diferencia de  $5^{\circ}$ . Debido a que la estructura de madera sobre la cual se apoya la terma solar tiene base fija, se usaron dos tablas de madera para girar la terma solar hacia el norte geográfico, faltando únicamente  $5^{\circ}$  para alcanzar la misma. Esto en la práctica consistió en girar  $180^{\circ}$  respecto a su orientación original. Las figuras 24 y 25 muestran el antes y después de los trabajos de reorientación de la terma solar.



*Figura 24.* Orientación geográfica de la terma solar antes (izquierda) y después (derecha) de los trabajos de reinstalación.



*Figura 25.* Fotografía de la terma solar antes (izquierda) y después (derecha) de los trabajos de reinstalación.

La figura 26 muestra el esquema final de la instalación de todo el sistema de suministro de agua caliente que consiste en la terma solar, el tanque elevado y todas las conexiones de tuberías. Se aprecian tres partes principales en las conexiones de las tuberías. El tramo de color negro es la que conduce el agua fría desde la red hacia el tanque elevado. El tramo de color azul es la que conduce el agua fría (que no necesariamente es igual a la temperatura del tramo anterior) desde el tanque elevado hasta el termotanque. El tramo de color rojo es la que conduce el agua caliente desde el termotanque hasta la ducha.

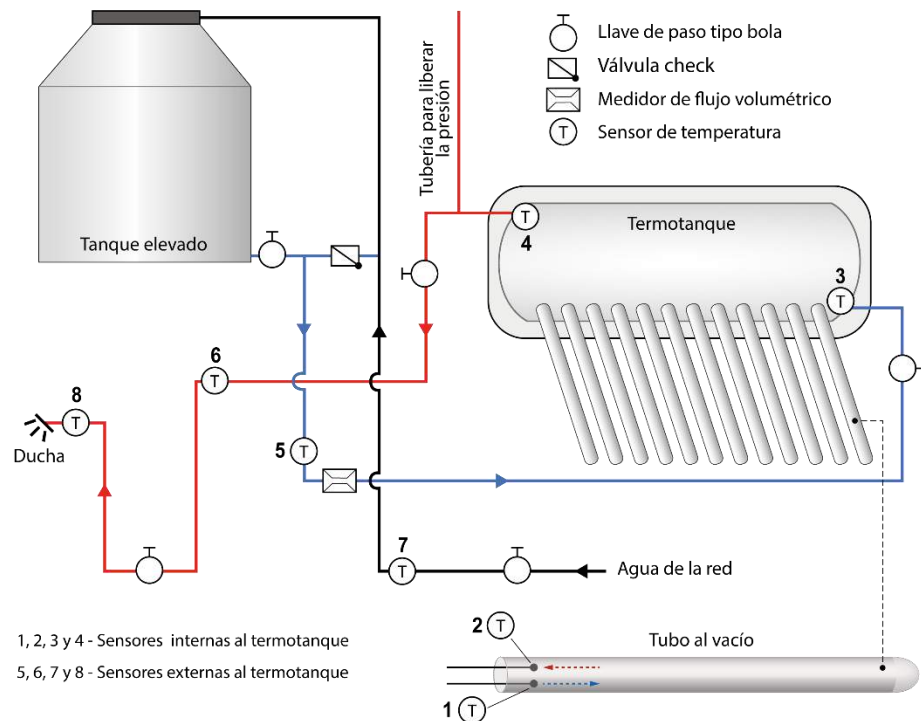


Figura 26. Esquema del sistema de suministro de agua caliente con energía solar reinstalada y mejorada.

#### 4.2.2. Reinstalación y Aislamiento térmico de las tuberías

Se ha reinstalado completamente todas las conexiones de tuberías, se emplearon tubos de PVC de  $\frac{3}{4}$  de pulgada, llaves de paso tipo bola, válvula check, abrazaderas y otros.

Dada las condiciones climáticas extremas de Kallapuma, fue necesario aislar adecuadamente las tuberías para evitar rupturas a causa del congelamiento del agua, para ello se han empleado aislamientos de la marca Hidro con conductividad térmica igual a  $0,041 \text{ W/mK}$  con un rango de aplicación entre  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  y son completamente impermeables al agua y vapor.

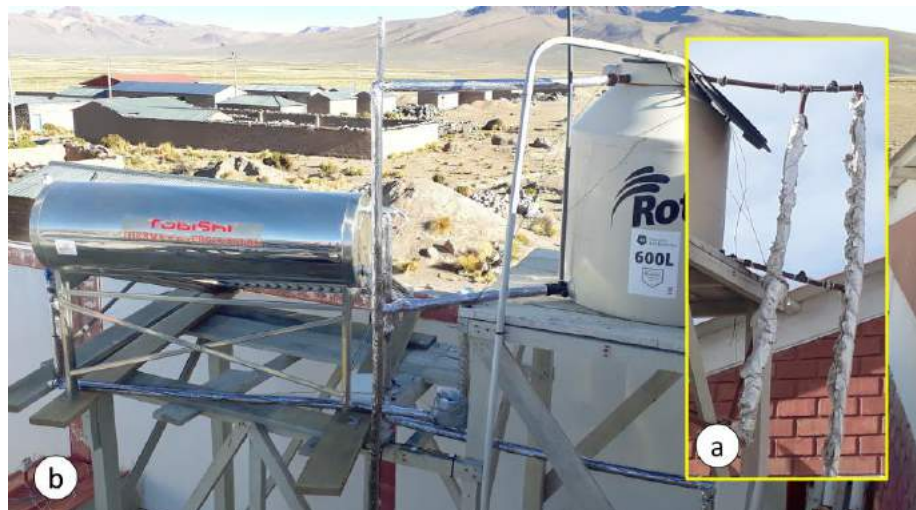


Figura 27. Conexiones de tuberías con aislamiento térmico antes (a) y después (b) de los trabajos de reparación.

### **4.3. Sensores de temperatura**

Para el estudio del comportamiento térmico y los cálculos de la eficiencia se emplearon ocho termopares las cuales se instalaron en diferentes puntos estratégicos y se muestran enumeradas del 1 al 8 en la figura 26.

#### **4.3.1. Instalación**

Los termopares o termocuplas se instalaron dentro de las tuberías y termotanque (figura 26) empleándose para este propósito varillas de inmersión de 20 cm y 30 cm de longitud. También se instalaron dos sensores de temperatura en uno de los tubos de vacío, para esto fue necesario elaborar un fijador especial que mantuviese a los termopares en su posición y no sean expulsados por el fujo y que a su vez no obstruyan en gran medida el flujo natural del agua.

Los termopares se dividen en dos grupos de cuatro, el primer grupo son las llamadas “*sensores internos*”, estas son las termocuplas que están colocadas en el interior del termotanque, consta de tres termocuplas tipo T y una de tipo K. van conectadas al datalogger 1. El segundo grupo se denomina “*sensores externos*” y son aquellas que van fuera del termotanque, todas son del tipo T. van conectadas al datalogger 2. Se registran datos de temperatura cada 30 segundos para todos los casos.

#### 4.3.2. Sensores internos al termotanque

Los sensores que van en la parte interna del termotanque se indican con los números del 1 al 4 en la figura 26 y 28. Los sensores en los puntos 1 y 2 se colocan en la entrada de un tubo al vacío en la parte extrema del colector por la cual ingresa el agua fría al termotanque. El sensor 2 mide la temperatura del agua que ingresa al tubo de vacío ( $T_{in}$ ) y el sensor 1 la salida del agua caliente del tubo de vacío ( $T_{out}$ ). El sensor 3 mide la temperatura del agua en la parte inferior dentro del termotanque ( $T_{inferior}$ ) cerca al punto de ingreso del agua fría proveniente del tanque elevado. El sensor 4 mide la temperatura del agua en la parte superior dentro del termo tanque ( $T_{superior}$ ) justo antes de la salida del agua caliente pasa su uso.

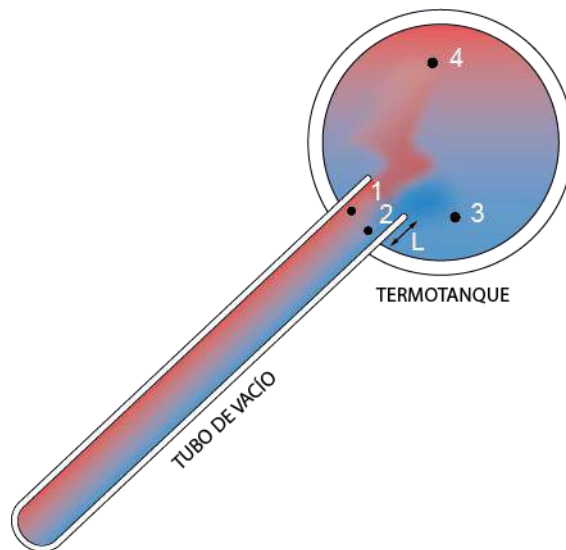


Figura 28. Ubicación de sensores de temperatura en el interior del termotanque.

### 4.3.3. Sensores externos al termotanque

Los sensores que van en la parte exterior al termotanque se indican con los números del 5 al 8 en la figura 26 y 29. El sensor 5 está instalada en la tubería que suministra agua del tanque elevado al termotanque por lo tanto mide la temperatura del agua que ingresa al termotanque ( $T_{ingreso}$ ). El sensor 6 está instalada en la tubería que conduce el agua caliente que sale del termotanque y se dirige hacia su uso (ducha) por lo tanto mide la temperatura del agua de salida ( $T_{salida}$ ). El sensor 7 mide la temperatura del agua de la red ( $T_{red}$ ) y está instalada en una tubería a unos 50 cm de profundidad del suelo. El sensor en el punto 8 mide la temperatura del agua que sale en la ducha ( $T_{ducha}$ ).

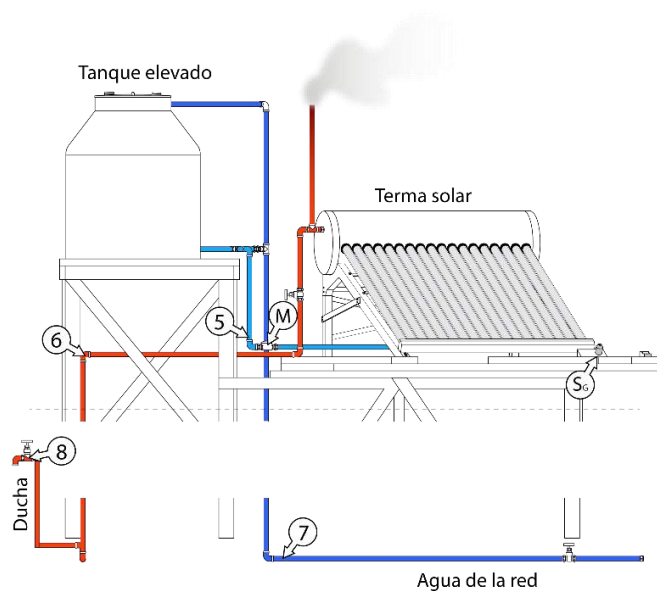


Figura 29. Ubicación de sensores de temperatura fuera del termotanque.

#### 4.3.4. Recopilación y Procesamiento de data

Los sensores de temperatura recopilaron datos con intervalos de 30 segundos, esta data se almacena en los dataloggers 1 y 2, y puede ser descargada a la PC mediante el software HOBOWare proporcionada por la misma empresa. Tiene la ventaja de poder exportar a archivo CSV.

Para el análisis de los datos recopilados se empleó el programa OriginPro en su versión 2018.

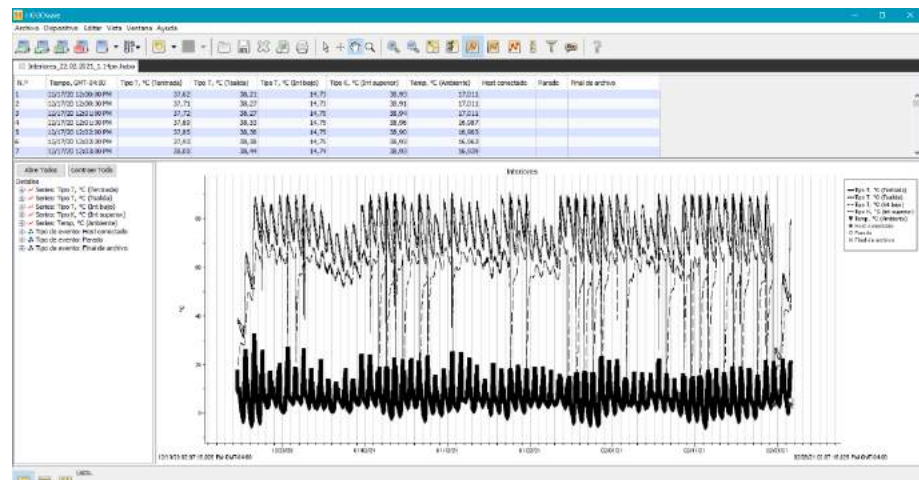


Figura 30. Interfaz del programa HOBOWare para la visualización y descarga de data. (HOBOWare)

#### 4.4. Sensor de irradiancia solar HOBO

Los valores de la irradiancia solar global registrados por este sensor se usan para calcular la eficiencia de la terma solar.

#### 4.4.1. Instalación

El sensor de irradiancia solar global HOBO se instala en un plano con una inclinación igual a la de los tubos de vacío ( $24^\circ$ ) con el objetivo de registrar la irradiancia global que incide en los tubos de vacío. Se instala junto a los tubos de vacío.

#### 4.4.2. Recopilación y análisis de data

Los datos recopilados se almacenan en la estación meteorológica HOBO y se descarga los datos a través de la página de HOBOLink.

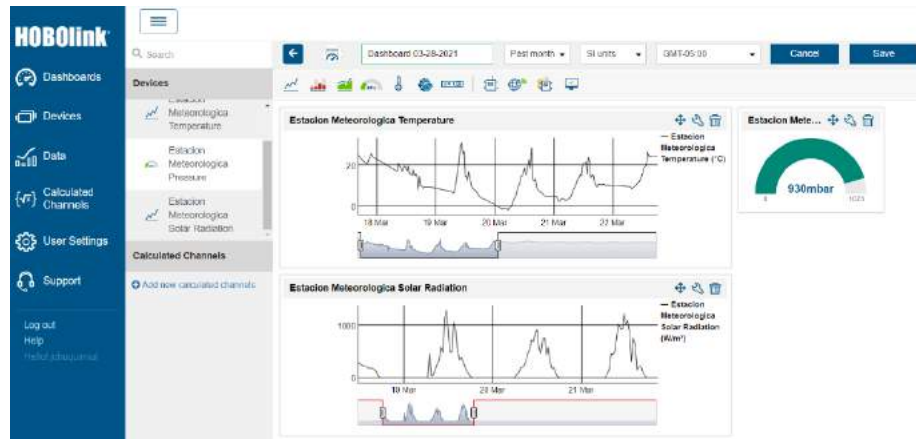


Figura 31. Interfaz de la página HOBOLink para la descarga de data. (HOBOLink, 2021)

#### 4.5. Instalación de medidor de flujo volumétrico

Se instaló un medidor de flujo volumétrico analógico para registrar el consumo y caudal del agua, datos que son necesarios para los cálculos de la eficiencia en estado con consumo. Este medidor de flujo se ubica en una posición entre el tanque elevado y el termotanque como se muestra en la figura 26. No se conectó directamente a la red con el objetivo de que se puede seguir registrando el consumo de agua incluso si hay cortes, debido a que el tanque elevado aún sigue suministrando agua al termotanque.



Figura 32. Medidor de flujo volumétrico analógico.

## CAPÍTULO V

### RESULTADOS

La evaluación térmica y los cálculos de la eficiencia de la terma solar se llevaron a cabo en dos partes, la primera consiste en evaluar la terma en un estado *sin consumo*, es decir, con flujo de agua  $\dot{m}$  igual a cero. La segunda consiste evaluar el sistema en un estado *con consumo*.

El estudio sin consumo está justificado por el hecho de que una terma solar para el suministro de agua caliente para uso doméstico pasa la mayor parte del tiempo sin ser usado [en Kallapuma]. El poblador de zonas altoandinas como Kallapuma, hace uso de la terma solar con menos frecuencia que un ciudadano en ciudades más desarrolladas. Esto porque el poblador pasa la mayor parte del día en sus actividades diarias de agricultura y/o ganadería. Muy temprano por las mañanas y muy al atardecer las temperaturas son tan bajas que el poblador muchas veces prefiere no hacer uso de la ducha. Además, toda terma solar de uso doméstico casi siempre calienta el agua en un estado sin consumo antes de ser usado, sin importar donde esté instalado.

Otra importancia del estudio en estado sin consumo es observar qué ocurre cuando se deja de usar la terma solar por periodos de tiempo muy prolongados (semanas o meses), situación que es bastante común en el centro poblado y el colegio donde está instalada la terma solar del presente estudio.

### 5.1. Comportamiento térmico de la terma solar en estado sin consumo

En un estado con consumo, el agua fluye de la red a la ducha, pasando por la terma solar (figura 26). En un estado sin consumo es de esperar (en teoría) que no haya circulación del agua a través de todo el sistema, con la excepción del termotanque y los tubos al vacío donde el agua se mueve de abajo hacia arriba por el efecto termosifón. En la práctica se presentan pequeños flujos de agua especialmente en el tramo que conecta el tanque elevado con el termotanque, esto se debe a que en el termotanque se pierde agua por evaporación en la tubería para liberar la presión (figura 26), entonces el tanque elevado suministra al termotanque un volumen de agua igual a la que se pierde por evaporación. Aun con las características mencionados hasta ahora es de esperar que este pequeño flujo de agua vaya en la dirección del tanque elevado hacia el termotanque.

Debido a la ausencia de una válvula antirretorno (check) entre el tanque elevado y el termotanque que impida el retorno del agua hacia el tanque elevado y el sobrecalentamiento del agua en el termotanque, se producen un proceso de inversión del flujo de agua, es decir, un flujo de agua que va del termotanque hacia el tanque elevado. este proceso de inversión, en adelante, le llamaremos simplemente *contraflujo*. El contraflujo causa grandes saltos y descensos de temperatura en los sensores  $T_{inferior}$  y  $T_{ingreso}$  (puntos 3 y 5 de la figura 26) y se aprecia notablemente a partir del tercer día en la figura 33.

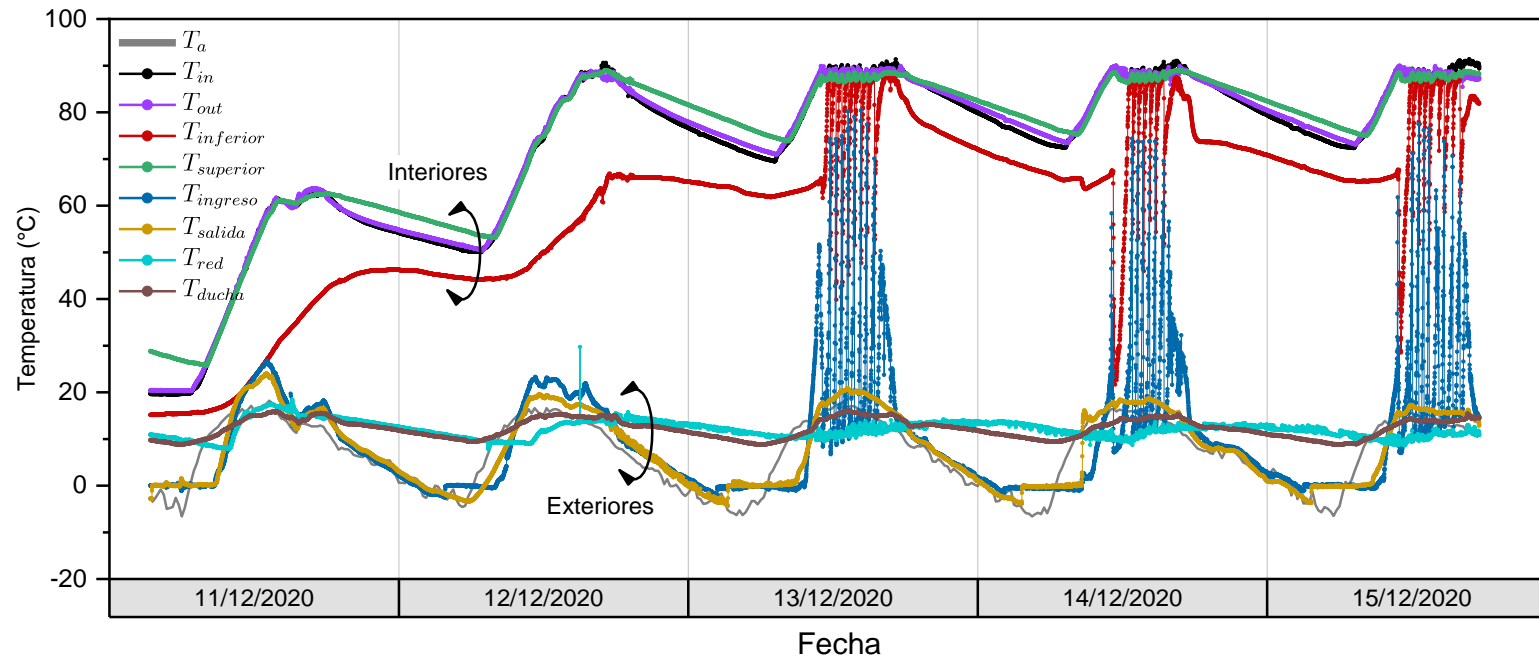


Figura 33. Variación de las temperaturas en los diferentes puntos para la terma solar con tubos de vacío en las condiciones climáticas de Kallapuma.

La figura 33 muestra un comportamiento característico de una terma solar con tubos de vacío bajo el clima de Kallapuma en los meses cálidos y días despejados (figura 35). Al segundo día, la temperatura de la parte superior en el interior del termotanque ( $T_{superior}$ ) alcanza su máximo valor que es igual al punto de ebullición del agua a esa altitud sobre el nivel del mar, para el caso de Kallapuma es aproximadamente igual a 88°C. A partir del tercer día aparece el efecto de contraflujo con mayor intensidad. El comportamiento térmico es idéntico a partir del tercer día en adelante. Esta evaluación se efectuó en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo obteniéndose resultados muy similares.

Cuando los días son nublados y con precipitaciones (figura 36) el comportamiento térmico es como se muestra en la figura 34. en este caso, la temperatura en el punto  $T_{superior}$  alcanza su máximo valor al tercer día y el fenómeno de contraflujo se presenta en menor intensidad.

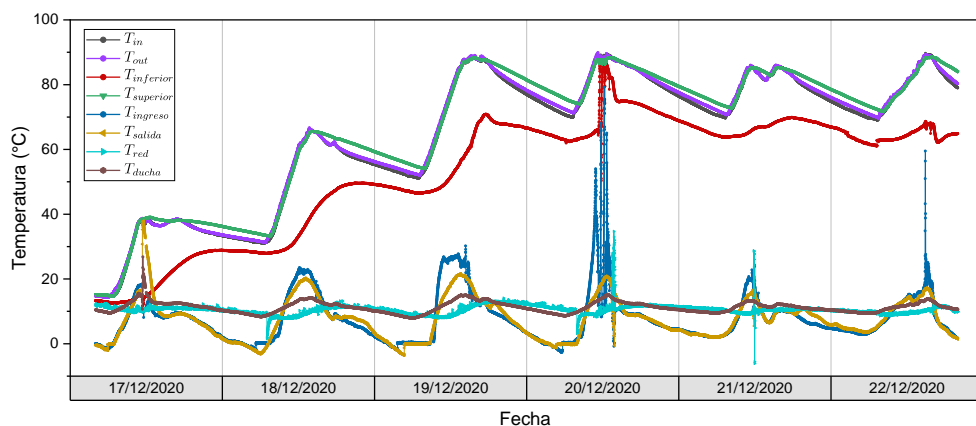


Figura 34. Variación de las temperaturas para días nublados.

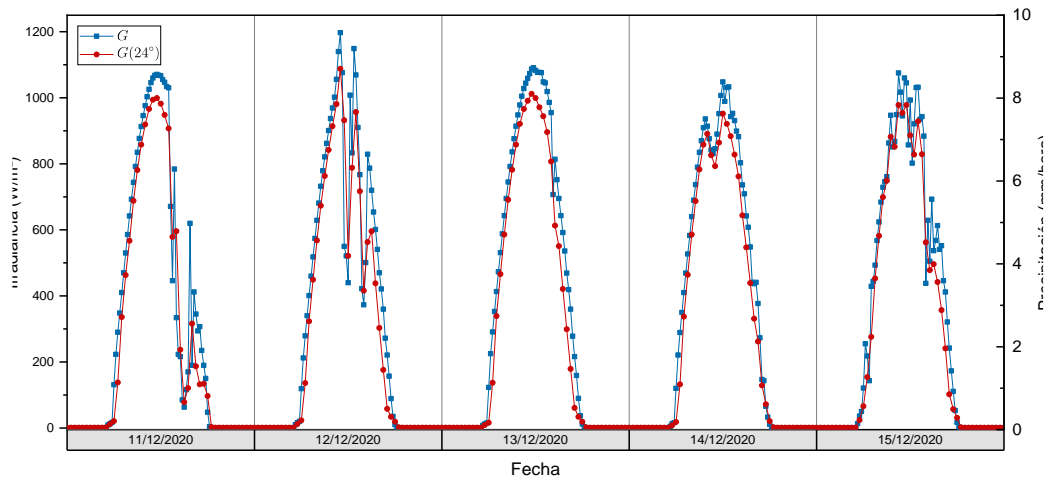


Figura 35. Irradiancia solar global en un plano horizontal  $G$  e inclinado  $G(24^\circ)$  para los días del 11 al 15 de diciembre del 2020. No hay precipitación.

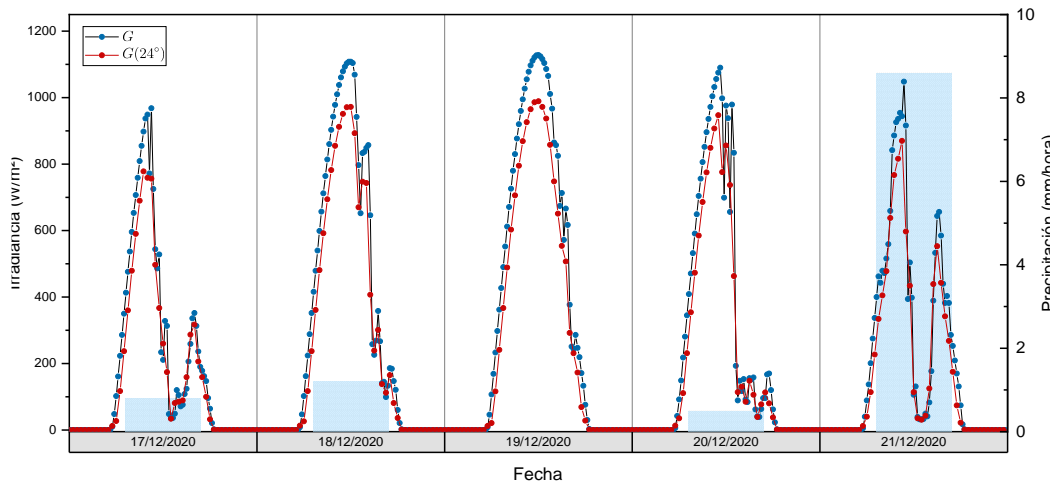


Figura 36. Irradiancia solar global en un plano horizontal  $G$  e inclinado  $G(24^\circ)$  para los días del 17 al 21 de diciembre del 2020. Hay precipitación.

### 5.1.1. Temperaturas internas

La figura 37 muestra el proceso de calentamiento del agua dentro de un tubo al vacío. Se aprecia que hay una diferencia muy pequeña entre la temperatura del agua que entra al tubo  $T_{in}$  y la que sale del tubo  $T_{out}$ . Una vez alcanzada la temperatura máxima de calentamiento (punto de ebullición) igual a  $88^{\circ}\text{C}$  al segundo día, se observa que hay momentos en las que aparentemente el proceso se invierte, es decir que la temperatura del agua que ingresa al tubo de vacío es más alta que la que sale de ella. Este aparente proceso de inversión podría ser a causa del flujo turbulento que se presenta dentro del tubo de vacío como se ve en la figura 12.

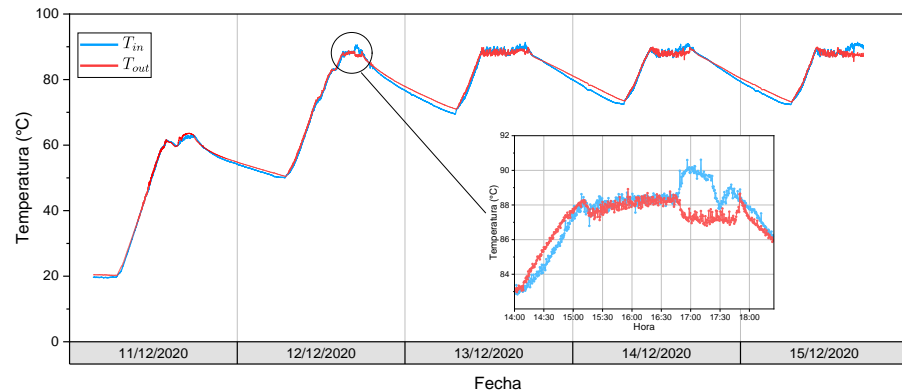


Figura 37. Comportamiento térmico del tubo de vacío.

La figura 38 muestra el proceso de calentamiento del agua que se almacena dentro del termotanque (puntos 3 y 4 de la figura 28), se aprecia también la temperatura ambiente  $T_a$ . Se observa como difieren, siendo la temperatura del agua en la parte superior siempre más caliente que el agua en la parte inferior como es de esperarse. Esto nos demuestra que existe una gradiente de temperatura muy marcada dentro del termotanque.

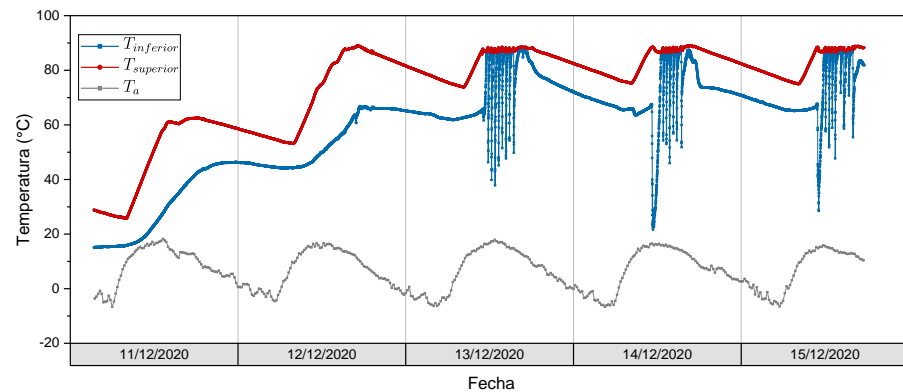


Figura 38. Comportamiento térmico del agua en la parte inferior  $T_{inferior}$  y superior  $T_{superior}$  dentro del termotanque.

Las temperaturas dentro del tubo al vacío y la temperatura en la parte superior en el interior del termotanque  $T_{in}$ ,  $T_{out}$  y  $T_{superior}$  son prácticamente idénticos a medida que ascienden como se aprecia en la figura 33, sin embargo, la temperatura del agua en la parte inferior del termotanque  $T_{inferior}$  (punto 4 de la figura 28) es mucho más bajo. Tang et al. (2011) explica en su estudio que este fenómeno se debe a que en

esta parte del termotanque (parte inferior) el agua es térmicamente inactivo y que el agua en la parte superior está térmicamente mezclada por completo. Por lo tanto, para reducir la región térmicamente inactiva, la longitud de los tubos ( $L$  de la figura 28) solares dentro del termotanque debe ser lo más corta posible.

### 5.1.2. Temperaturas externas

Dado que el sistema se encuentra en estado sin consumo ( $\dot{m} = 0$ ) los valores de temperatura del agua en los puntos denominados *externas* [al termotanque] deben en principio presentar solo pequeñas variaciones debido, principalmente, a los cambios de la temperatura ambiente  $T_a$ . La temperatura registrada en el punto de ingreso  $T_{ingreso}$  muestra grandes fluctuaciones como se ve en la figura 39, esto es causado por el contraflujo en el tramo que une el tanque elevado con el termotanque. Las temperaturas registradas en la red  $T_{red}$  y la ducha  $T_{ducha}$  (puntos 7 y 8 de la figura 26) no presentan mayores variaciones. Esto se explica por el hecho de que  $T_{red}$  se mide en una tubería a unos 50 cm bajo suelo y  $T_{ducha}$  se mide dentro de una habitación y no son afectados significativamente por las variaciones de la temperatura ambiente.

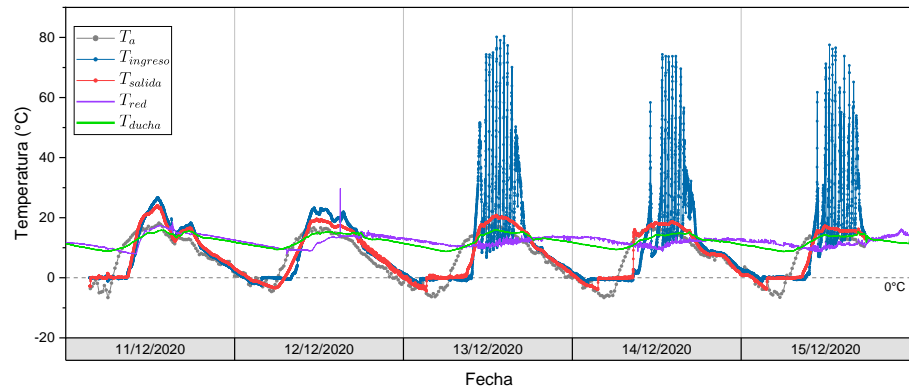


Figura 39. Comportamiento térmico de los puntos exteriores al termotanque.

### 5.1.3. Flujo de retorno o contraflujo

El contraflujo se percibe con intensidad cuando la temperatura del agua registrada en la parte superior en el interior del termotanque  $T_{superior}$  alcanza su punto de ebullición (88°C) y es registrada por el sensor en el punto  $T_{ingreso}$  (figura 39). Es posible evitar este efecto colocando una válvula check en la tubería que une el tanque elevado con el termotanque, evitando así que el agua retorne hacia el tanque elevado. Sin embargo, en termas solares con válvula check en el tramo indicado, presentan fuertes vibraciones en los tubos de vacío y el termotanque cuando el agua alcanza su punto de ebullición.

La figura 40 muestra el contraflujo registrado por los sensores  $T_{inferior}$  y  $T_{ingreso}$ . El agua en la parte inferior del termotanque  $T_{inferior}$  sufre bruscas caídas de temperatura mientras que la temperatura del agua en el punto de ingreso  $T_{ingreso}$  sube a valores muy elevados con periodos de tiempo bastante

regulares en ambos casos de unos 30 minutos la mayor parte del tiempo, en la cual ocurre el fenómeno. Durante este proceso se observa que cantidades considerables de agua son expulsados por la tubería para liberar la presión (figura 26).

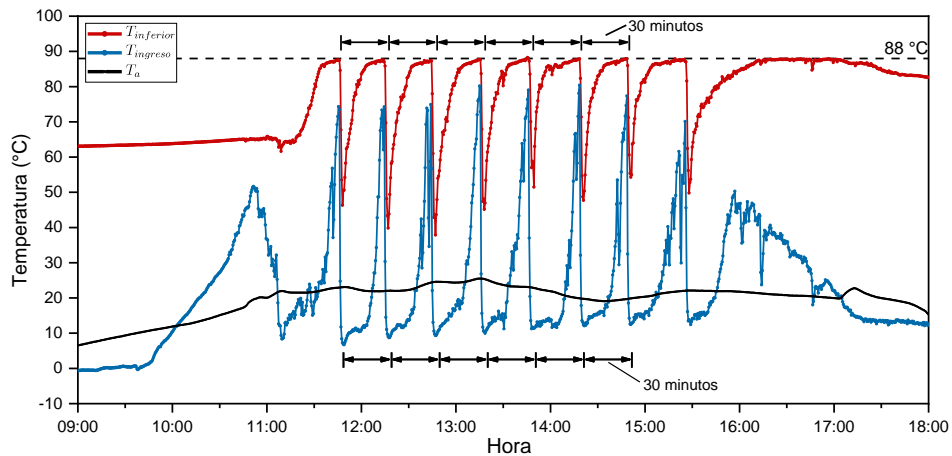


Figura 40. Contraflujo en la tubería que une el tanque elevado con el termotanque.

Este fenómeno de contraflujo se repite mientras no hay consumo que permita disminuir la temperatura dentro del termotanque como se puede ver en la figura 33. cuando hay precipitación y/o los días están bastante nublados este efecto disminuye drásticamente como se aprecia en la figura 34.

La figura 41 muestra el comportamiento térmico de la terma solar para los días nublados y con lluvia para el mes de febrero del 2021. Nuevamente observamos que el contraflujo desaparece mientras la temperatura  $T_{superior}$  no alcance el punto de ebullición del agua de aproximadamente 88 °C para Kallapuma.

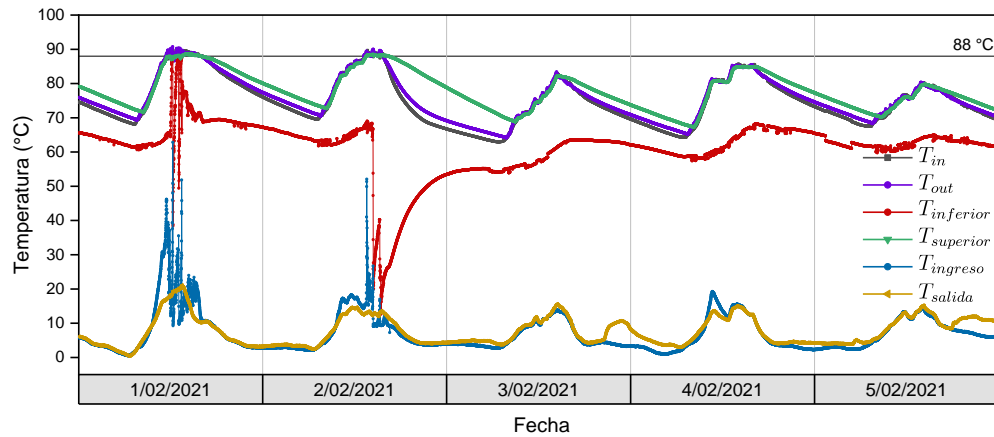


Figura 41. Comportamiento térmico para los días de marzo del 2021. Debido a la presencia de lluvias y días nublados, el fenómeno de contraflujo de hace menos intenso.

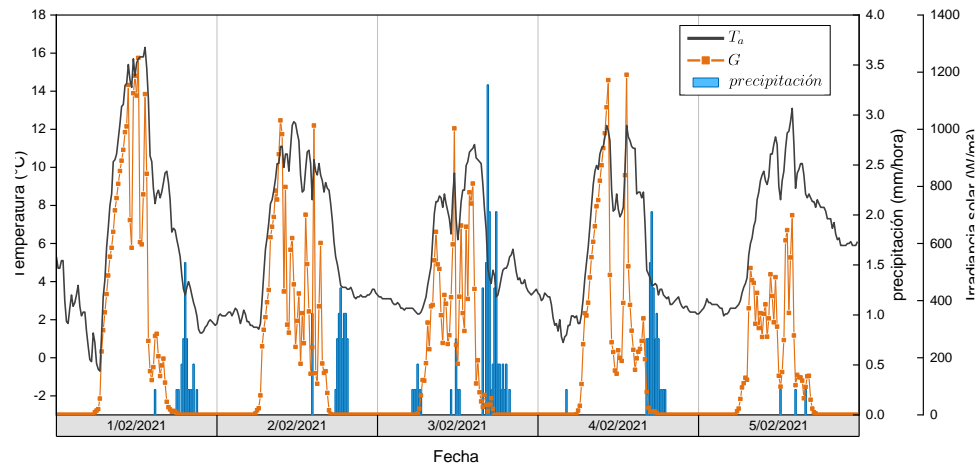


Figura 42. Condiciones meteorológicas para el periodo que dura la evaluación de la gráfica 41. Se aprecia una irradiancia bastante irregular por la presencia de nubosidad, también se observa precipitación.

#### 5.1.4. Ritmo de calentamiento y enfriamiento

En esta sección se estudia el ritmo de calentamiento y enfriamiento del agua dentro del termotanque. Los sensores que registran la temperatura del agua dentro del termotanque son  $T_{inferior}$  y  $T_{superior}$  (puntos 3 y 4 de las figuras 26 y 28). El valor promedio de la temperatura dentro del termotanque se obtiene a partir de:

$$T_m = \frac{T_{inferior} + T_{superior}}{2} \quad (18)$$

Sin embargo, es necesario plantearse si un cálculo del valor promedio de la temperatura dentro del termotanque usando la ecuación 18 es representativo y suficiente para estudiar el comportamiento térmico y hacer los cálculos energéticos, esto debido a que es difícil determinar qué porcentaje de agua tiene la temperatura indicada por el sensor  $T_{inferior}$  y qué porcentaje de agua tiene la temperatura indicada en el punto  $T_{superior}$ , en otras palabras sabemos que la estratificación no se distribuye de manera uniforme y que el porcentaje de agua con temperatura  $T_{superior}$  aumentará a medida que los colectores vayan captando energía solar hasta que en teoría el valor de  $T_{inferior}$  se iguale al valor de  $T_{superior}$ . En la práctica no se ha observado tal igualdad debido al fenómeno de contraflujo.

Para el estudio del ritmo de calentamiento y enfriamiento del agua dentro del termotanque, en esta investigación, solo se considera el valor de la temperatura del agua registrada por  $T_{superior}$  (punto 3 de las figuras 26 y 28) ya que en esta región se encuentra el agua que está lista para su consumo. Se procede al llenando de la terma solar con agua de la red a primeras horas de la mañana antes de que salga el sol, una vez llena el termotanque se cierra la llave de paso en el ducto que lleva el agua para su uso, esto para evitar que haya consumo y se deja en ese estado por varios días (figura 33). La figura 45 muestra que el calentamiento del agua durante el día y el enfriamiento durante la noche tienen un comportamiento lineal. Se hace un ajuste lineal de mínimos cuadrados por tramos sin considerar aquellas regiones en las que la temperatura del agua se mantiene prácticamente constante. Las líneas en rojo representan los ajustes lineales para determinar el ritmo de calentamiento mientras que las líneas azules para determinar los ritmos de enfriamiento para el agua en la parte superior del termotanque.

En el primer día el agua se calienta a un ritmo de  $6,17\text{ }^{\circ}\text{C}$  cada hora hasta alcanzar un valor de  $61,08\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a partir del segundo día el ritmo de calentamiento disminuye a un promedio de  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  por hora hasta alcanzar los  $88\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

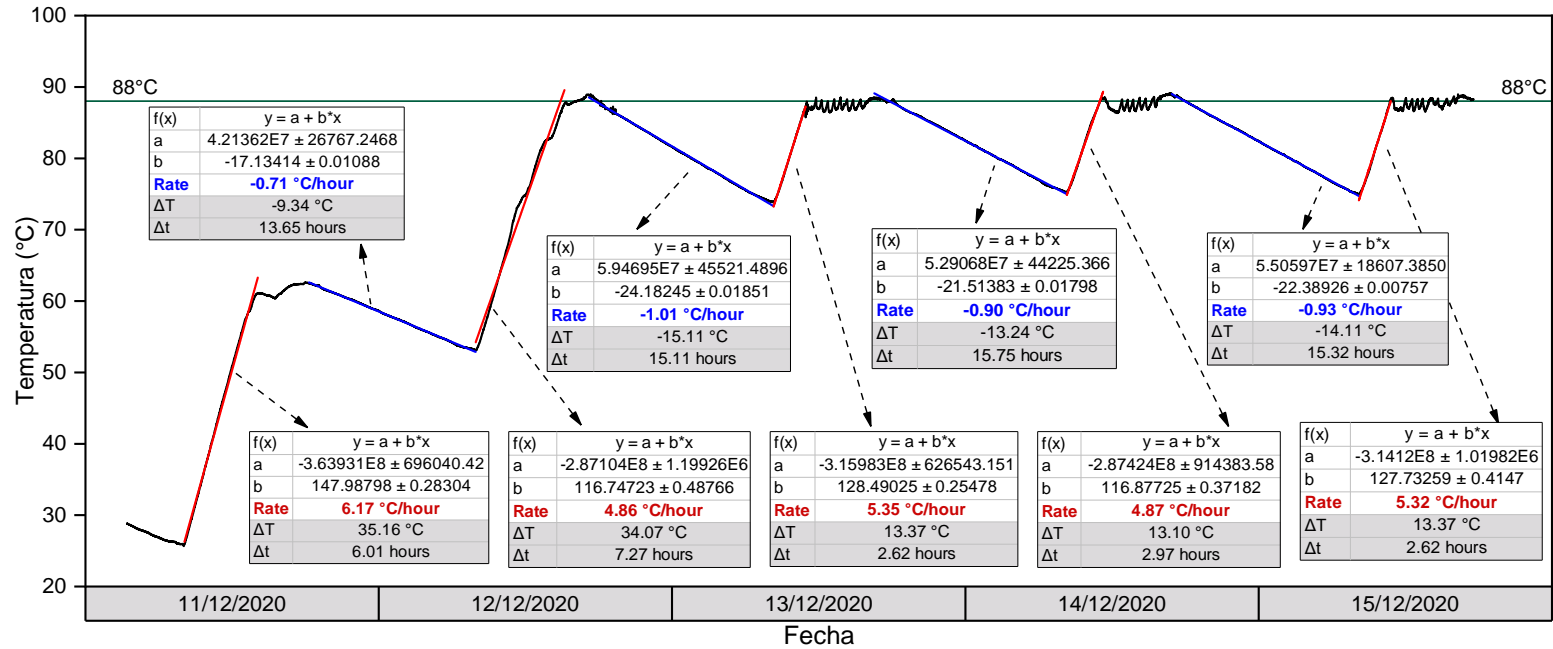


Figura 43. Cálculo del ritmo de calentamiento y enfriamiento para el periodo del 11 al 15 de diciembre del 2020.

Para el caso del enfriamiento, la primera noche se pierde la temperatura a un ritmo de unos  $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  por hora perdiéndose unos  $9,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  en total (la temperatura disminuyó de  $62,47\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $53,07\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). a partir de la segunda noche el ritmo de enfriamiento aumenta a un promedio de  $1^{\circ}\text{C}$  por hora, perdiéndose un promedio de  $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ . la temperatura no desciende de los  $70^{\circ}$  a partir de la segunda noche.

Si consideramos los ritmos de calentamiento y enfriamiento solo a partir del día cuando se alcanza la temperatura máxima de calentamiento del agua (punto de ebullición, unos  $88^{\circ}\text{C}$  para Kallapuma), es decir a partir del segundo día, vemos que el ritmo de calentamiento promedio ( $5\text{ }^{\circ}\text{C/hora}$ ) es muy superior al ritmo del enfriamiento promedio ( $1^{\circ}\text{C/hora}$ ). Estos resultados son a primera vista positivos debido a que el agua en dicho punto se calienta con mayor rapidez de lo que se enfría. Pero una pérdida en promedio de  $14\text{ }^{\circ}\text{C}$  por cada etapa de enfriamiento se debe a que las horas que dura el proceso de enfriamiento es en promedio mucho mayor que las horas de calentamiento. Las horas de enfriamiento duran unas  $13,65$  horas el primer día y un promedio de  $15,4$  horas a partir del segundo día. Para el caso de las horas de calentamiento, los dos primeros días duran un promedio de  $6,6$  horas mientras que a partir del tercer día solo dura un promedio de  $2,7$  horas. El valor de  $6,6$  horas que dura el calentamiento

para los dos primeros días representa las horas que incide la radiación solar directa sobre los colectores (al amanecer y al atardecer la radiación solar ya no incide directamente sobre el colector a causa de las sombras y la posición del sol) y el valor tan pequeño de 2,7 horas de calentamiento a partir del tercer día se explica por el hecho de que a partir de ese día ya no se requiere mucha energía para que el agua alcance su punto de ebullición.

La cantidad de horas de calentamiento y enfriamiento cobra más importancia en épocas de inviernos ya que en estas épocas aumenta las horas de enfriamiento y disminuye las horas de calentamiento.

Para el caso de la figura 44, correspondiente a otro periodo de pruebas, es al tercer día cuando el agua en la parte superior del termotanque  $T_{superior}$  alcanza su punto de ebullición, esto a causa de que esta evaluación se hace para días con bastante nubosidad e incluso días con lluvia como se ha indicado anteriormente y se muestra en la figura 36. Sin embargo, los ritmos de calentamiento y enfriamiento, así como las horas de calentamiento y enfriamiento son muy similares a los obtenidos en la figura 43.

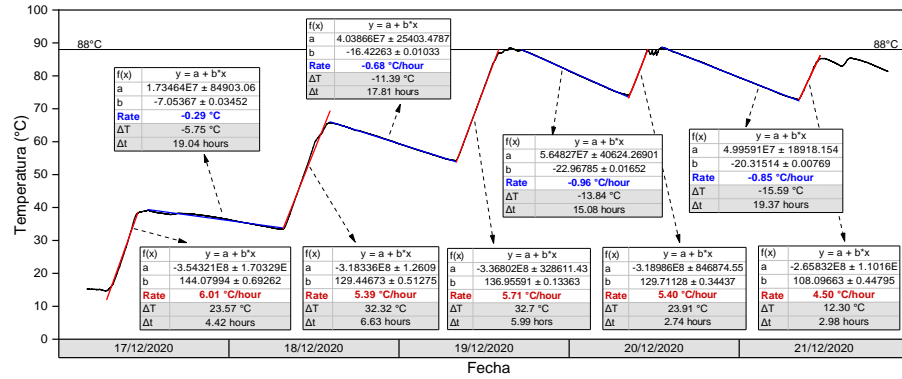


Figura 44. Cálculo del ritmo de calentamiento y enfriamiento para el periodo del 17 al 21 de diciembre del 2020.

La tabla 1 muestra los tiempos  $\Delta t$  de calentamiento para  $T_{superior}$  para los periodos del 11 al 14 de diciembre del 2020 (días despejados) y 17 al 20 de diciembre del 2020 (días con precipitación). Se muestra también la hora de inicio  $t_i$  y hora de finalización  $t_f$  del calentamiento, la temperatura inicial  $T_i$  y final  $T_f$ , así como el incremento de temperatura  $\Delta T$  durante el intercalo de tiempo  $\Delta t$ . La tabla 2 muestra los tiempos de enfriamiento. Se aprecia claramente como la cantidad de horas de calentamiento son menores a las horas de enfriamiento, esta diferencia se hace más grande para días nublados y con precipitación que corresponde al periodo del 17 al 20 de diciembre del 2020.

**Tabla 1***Tiempos de calentamiento del agua para  $T_{superior}$* 

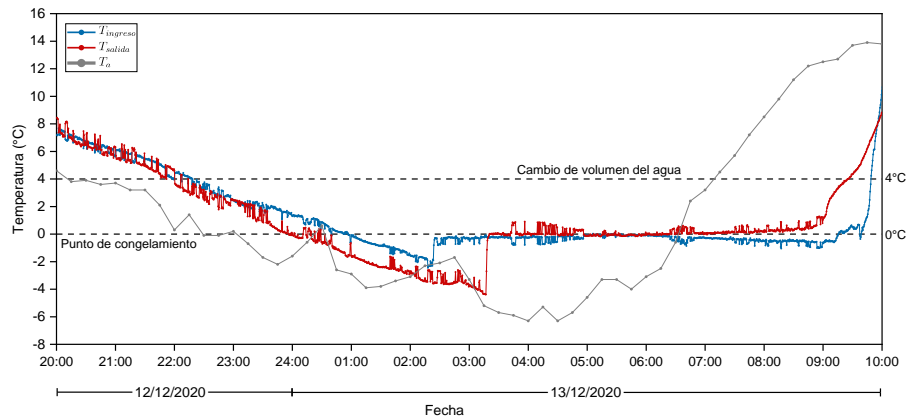
Fecha	$t_i$	$t_f$	$T_i(^{\circ}\text{C})$	$T_f(^{\circ}\text{C})$	$\Delta t$	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$
11/12/2020	08:06	18:17	25,92	61,08	10h11	35,16
12/12/2020	07:56	17:12	53,07	87,14	09h16	34,07
13/12/2020	08:18	16:33	73,81	87,18	08h15	13,37
14/12/2020	08:18	16:53	75,27	88,37	08h35	13,10
17/12/2020	06:45	12:36	14,74	39,13	05h51	24,39
18/12/2020	07:39	14:16	33,38	65,07	06h37	31,69
19/12/2020	08:05	17:19	54,31	87,86	09h14	33,55
20/12/2020	08:23	13:05	74,02	88,46	04h42	14,44

**Tabla 2***Tiempos de enfriamiento del agua para  $T_{superior}$* 

Fecha	$t_i$	$t_f$	$T_i(^{\circ}\text{C})$	$T_f(^{\circ}\text{C})$	$\Delta t$	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$
11/12/2020	18:17	07:56	61,08	53,07	13h39	-08,01
12/12/2020	17:12	08:18	87,14	73,81	15h06	-13,33
13/12/2020	16:33	08:18	87,18	75,20	15h45	-11,98
14/12/2020	16:53	08:12	88,37	74,96	15h19	-13,41
17/12/2020	12:36	07:39	39,13	33,38	19h02	-05,75
18/12/2020	14:16	08:05	65,07	54,31	17h48	-10,76
19/12/2020	17:19	08:23	87,86	74,02	15h40	-13,84
20/12/2020	13:05	08:27	88,46	72,87	19h22	-15,59

### 5.1.5. Congelamiento del agua en las tuberías

A pesar de que todas las conexiones de tuberías están con aislamiento térmico, se ha observado congelamiento del agua dentro de las tuberías. La figura 45 muestra cómo el agua se congela, estos valores fueron medidos por los sensores  $T_{ingreso}$  y  $T_{salida}$  en los puntos 5 y 6 respectivamente de las figuras 26 y 29. La temperatura ambiente desciende por debajo de los cero grados Celsius a partir de las 23 horas aproximadamente (para el periodo considerado en la figura 33); entre la media noche y la 1 de la madrugada la temperatura del agua llega a los cero grados Celsius y continúa descendiendo por algunas horas más, dándose el fenómeno conocido como *super enfriamiento*, en esta etapa el agua aún se mantiene en estado líquido. Una vez formada los primeros cristales de hielo la temperatura de la mezcla Agua-Hielo sube rápidamente a los 0 °C y se mantiene relativamente a esa temperatura hasta que toda el agua se convierte en hielo y la temperatura vuelve a descender por debajo de los cero grados Celsius, para el caso del  $T_{ingreso}$ , o vuelve a elevar su temperatura por encima de los cero grados Celsius al recibir energía solar como en el caso de  $T_{salida}$ .



*Figura 45.* Congelamiento del agua dentro de las tuberías. Aparición del fenómeno conocido como super enfriamiento.

Este fenómeno de congelamiento es bastante común en condiciones como las de Kallapuma donde la temperatura desciende muy por debajo de los cero grados Celsius como se ve en la figura 33 recordando que la evaluación se hizo en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo, considerados como los meses menos fríos para Kallapuma y por supuesto que el fenómeno de congelamiento del agua es mayor un en épocas de invierno (figura 20).

### 5.1.6. Eficiencia

Para calcular la eficiencia de la terma solar hacemos uso de las ecuaciones 14 y 17. Además se considera que:

$$\dot{Q}_{util} = \dot{m}c_p(T_{salida} - T_{ingreso}) \quad (19)$$

Entonces obtenemos:

$$\eta = \frac{\dot{m}c_p(T_{salida} - T_{ingreso})}{N_t A_t G} \quad (20)$$

Como en este caso se tiene un estado sin consumo de la terma solar, es decir no tenemos flujo de agua  $\dot{m} = 0$  y como  $\dot{m} = \frac{m}{\Delta t}$  entonces:

$$\eta = \frac{\frac{m}{\Delta t} c_p (T_{final} - T_{inicial})}{N_t A_t G} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta t} = \frac{m c_p (T_{final} - T_{inicial})}{N_t A_t I} \quad (21)$$

Donde  $I$  es la insolación y es igual a la irradiancia recibida en un intervalo de tiempo ( $G \cdot \Delta t$ ),  $m$  es la masa total de agua contenida dentro del termotanque. Como no hay flujo no se puede tomar las temperaturas de entrada y salida, en su lugar se toma la temperatura al inicio de la evaluación y final de la misma.

Calculamos el área total  $A_t$  sobre la cual incide la radiación solar en uno de los tubos al vacío usando la ecuación 16. sabiendo que

el diámetro del tubo interior ( $d$ ) es de 47 mm y la longitud del tubo ( $l$ ) es de 1,80 m.

$$A_t = 0,33\pi dl$$

$$A_t = 0,33\pi(0,047 \text{ m})(1,70 \text{ m}) = 0,083 \text{ m}^2$$

Para el cálculo anterior se tomó el valor de la longitud del tubo  $l$  igual a 1,70 m y no su valor original de 1,80 m debido a que se pierde aproximadamente 10 cm del tubo al insertan en el termotanque y la parte inferior del tubo que está cubierto por otros elementos.

El valor de la insolación  $I$  se obtiene calculando el área bajo la curva de la irradiancia solar tomando como límites la hora de inicio (08:06) y final (14:06) de la evaluación como se muestra en la figura 46 obteniéndose un valor igual a  $18,36 \text{ MJ/m}^2$  para el primer día de evaluación (11/12/2020). Los valores de temperatura inicial y final se consideran en este caso como el valor promedio (ecuación 18) entre las temperaturas registradas en la parte superior  $T_{superior}$  e inferior  $T_{inferior}$  dentro del termotanque. Siendo estos valores igual a  $20,89 \text{ }^\circ\text{C}$  como temperatura promedio inicial y  $46,02 \text{ }^\circ\text{C}$  como temperatura promedio final.

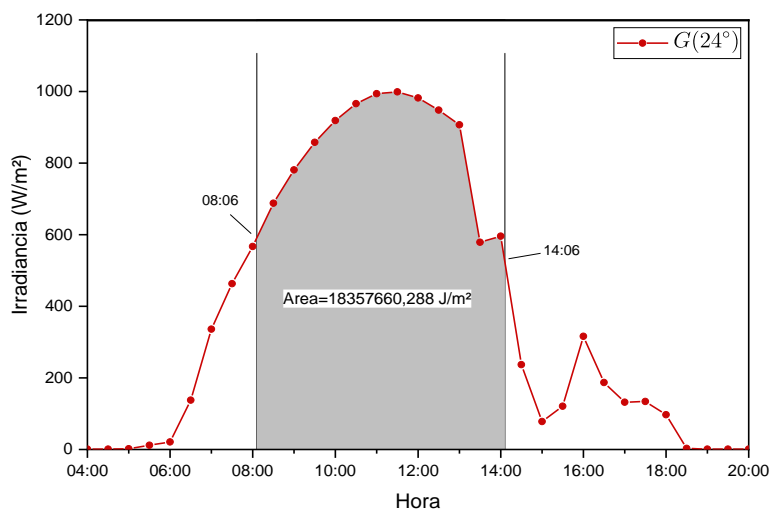


Figura 46. Cálculo de la insolación.

Sabemos que el calor específico del agua  $c_p$  es de 4181,3 J/Kg K y que el volumen del agua dentro del termotanque es de 160 litros entonces la eficiencia  $\eta_{d1}$  para el día 11/12/2020 se obtiene:

$$\eta_{d1} = \frac{160 \text{ kg} \cdot 4181,3 \frac{\text{J}}{\text{Kg} \cdot \text{K}} (46,02 \text{ °C} - 20,89 \text{ °C})}{18 \cdot 0,083 \text{ m}^2 \cdot 18364499,712 \frac{\text{J}}{\text{m}^2}} = 0,61$$

En subíndice  $d1$  hace referencia al día 1 de la evaluación de la eficiencia en estado sin consumo.

Se sigue el mismo procedimiento para los días siguientes, obteniéndose los valores para la eficiencia para el primer periodo de

evaluación correspondientes a los días del 11 al 15 de diciembre del 2020, la irradiancia para este periodo se muestra en la figura 35:

$$\eta_{d1} = 0,61$$

$$\eta_{d2} = 0,54$$

$$\eta_{d3} = 0,44$$

$$\eta_{d4} = 0,40$$

$$\eta_{d5} = 0,45$$

El procedimiento de repite para el segundo periodo de evaluación correspondiente a los días del 17 al 24 de diciembre del 2020.

Abajo se muestra los valores para los primeros 5 días de evaluación. La irradiancia para este periodo se muestra en la figura 36.

$$\eta_{d1} = 0,56$$

$$\eta_{d2} = 0,47$$

$$\eta_{d3} = 0,45$$

$$\eta_{d4} = 0,40$$

$$\eta_{d5} = 0,37$$

Los valores de la eficiencia son muy parecidos en ambos periodos de evaluación, hay que recordar que para el segundo periodo

las condiciones meteorológicas incluían presencia de lluvias como se muestra en la figura 36. El primer día la eficiencia es alta, aproximadamente igual a 0,61 para días despejados y unos 0,56 para días nublados. En los siguientes días la eficiencia desciende hasta alcanzar valores por debajo de los 0,4 pero en ninguno de los casos alcanzado valores menores a 0,3.

La figura 47 muestra los valores de la eficiencia de la terma solar para tres periodos de pruebas, el periodo 1 corresponde a los días del 11 al 15 de diciembre del 2020, el periodo 2 corresponde a los días del 17 al 24 de diciembre del 2020, y el periodo 3 corresponde a los días del 20 al 28 de febrero del 2021.

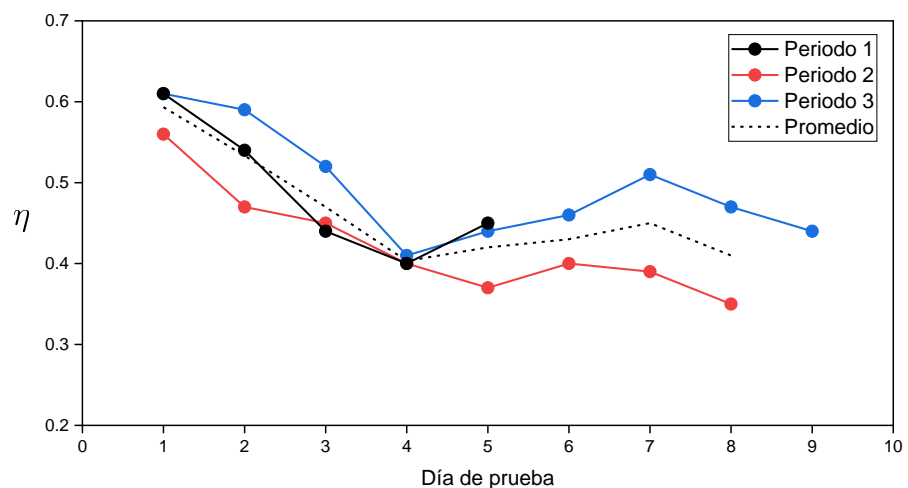


Figura 47. Eficiencia de la terma solar en estado sin consumo para tres periodos de pruebas.

## 5.2. Comportamiento térmico de la terma solar en estado con consumo

En el estudio del comportamiento de la terma solar en estado con consumo aparece una nueva variable, el flujo de agua  $\dot{m}$ , que fluye de la red hacia el punto de consumo (la ducha en este estudio) pasando por la terma solar donde el agua se calienta. Para esto se abre la llave de paso ubicado en el tramo de tubería que va del termotanque hacia la ducha. El flujo  $\dot{m}$  se mide a través del medidor de flujo volumétrico colocado en el tramo de tubería que conecta el tanque elevado con el termotanque (figura 26).

### 5.2.1. Porcentaje de agua lista para su uso

La primera parte de la evaluación consistió en dejar fluir el agua con su máximo valor de caudal  $\dot{m}$  igual a aproximadamente *6,14 litros/minuto* ( $\approx 0,1$  *litros/segundo*) manteniendo el colector tapado. El agua dentro del termotanque se calentó previamente en estado sin consumo los días anteriores a la evaluación.

Se abre la llave de paso a las 10:07 horas y se cierra la misma a las 11:00 horas cuando las temperaturas en todos los puntos hayan alcanzado un valor aproximadamente igual a la temperatura del agua de la red  $T_{red}$ . La figura 48 nos muestra es el comportamiento térmico de la terma solar en este proceso de evaluación.

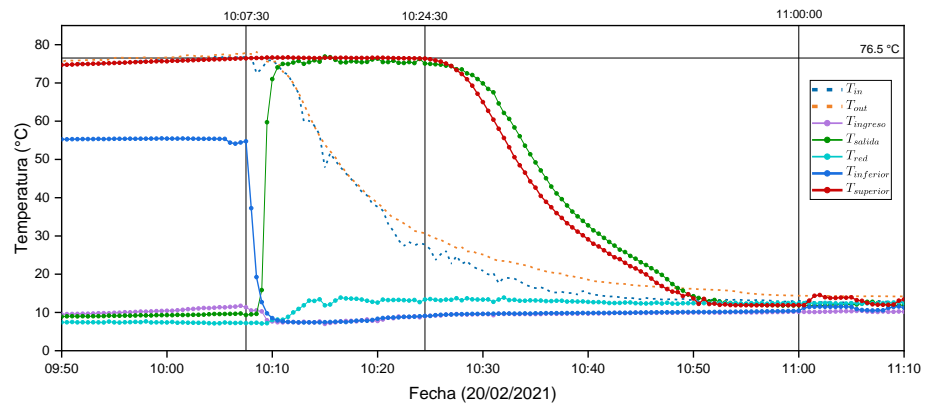


Figura 48. La primera prueba consiste en dejar fluir el agua a su máximo caudal manteniendo el colector tapado.

La figura 48 nos permite también calcular el porcentaje de agua dentro del termotanque que se encuentra a la temperatura medida por el sensor ubicada en la parte superior en el interior del termotanque  $T_{superior}$  (esta vendría ser la cantidad de agua disponible para su uso), punto 4 en las figuras 26 y 28.

En la figura 48 vemos que desde el momento en que se deja fluir el agua a las 10:07 horas hasta alrededor de las 10:24 horas, la temperatura  $T_{superior}$  se mantiene constante a unos 76,5 °C mientras que la temperatura en la parte inferior dentro del termotanque  $T_{inferior}$  cae bruscamente ya que empieza a registrar (por su ubicación según se muestra en la figura 26) el agua fría que proviene de la red.

Entonces, conociendo el caudal  $\dot{m}$  y el intervalo de tiempo en la cual se mantiene constante esta temperatura  $\Delta t$ , podemos calcular el volumen de agua a temperatura iguala a 76,5 °C:

$$V_{agua}(76,5\text{ °C}) = \dot{m} \cdot \Delta t$$

$$V_{agua}(76,5\text{ °C}) = (6,14\text{ litros/minuto})(17\text{ minutos})$$

$$V_{agua}(76,5\text{ °C}) = 104,4\text{ litros}$$

En porcentajes, este valor equivale a un 65,3 % del volumen total de agua (160 litros) contenido dentro del termotanque con  $T_{superior} = 76,5\text{ °C}$  sin considerar el porcentaje de agua que perdió su valor de 76,5°C al mezclarse con el agua fría que ingresa al termotanque.

Este resultado es importante, sobre todo a la hora de calcular la temperatura promedio del agua dentro del termotanque según la ecuación 18 como normalmente se hace en las evaluaciones de una terma solar, ya que la ecuación 18 considera que el valor de la temperatura  $T_{superior}$  representa al 50% del volumen total del agua contenida dentro del termotanque.

Esta evaluación nos permite comprender cómo se comporta la terma solar en Kallapuma cuando se está usando durante la noche (sin

radiación solar) y nos da una idea del porcentaje de agua caliente  $T_{superior}$  que contiene el termotanque.

### 5.2.2. Calentamiento del agua

La segunda parte de la evaluación consistió en estudiar el calentamiento de agua que circula por la terma solar con un caudal  $\dot{m}$ .

En la figura 49 se deja fluir el agua a partir de las 11:10 del día 20 de febrero del 2021 cuando las temperaturas en los diferentes puntos son próximas a la temperatura del agua de la red  $T_{red}$  con un caudal igual a  $\dot{m} = 0,90 \text{ litros/minuto}$ .

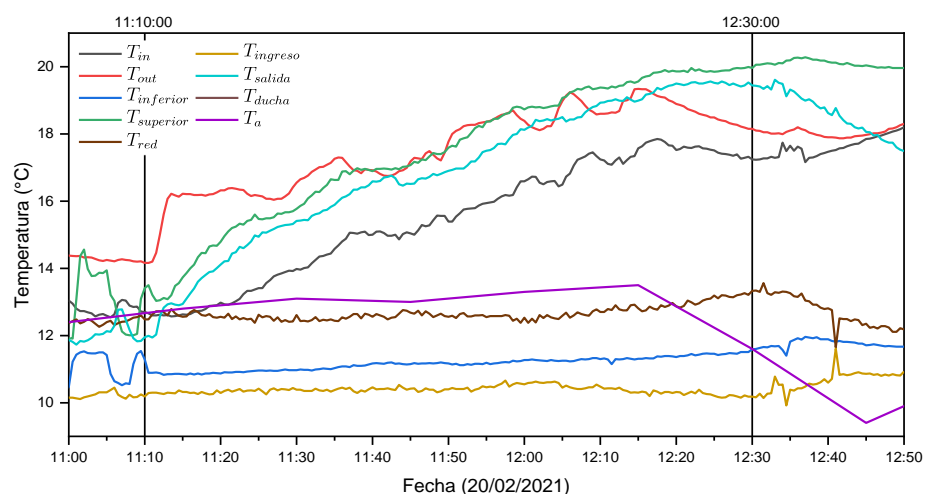


Figura 49. Calentamiento del agua que fluye a través de la terma solar con una caudal  $\dot{m} = 0,90 \text{ litros/minuto}$  evaluado el 20/02/2021.

Observamos que la temperatura de ingreso  $T_{ingreso}$  es menor que la temperatura de la red  $T_{red}$ , esto se explica sabiendo que el tanque elevado esta expuesto al ambiente por lo tanto sufre perdida de energía en forma de calor por las noches de modo que la temperatura del agua almacenada en su interior disminuye por debajo de la temperatura de la red  $T_{red}$ . La temperatura en la parte inferior del termotanque  $T_{inferior}$  es ligeramente mayor a la temperatura que se registra en  $T_{ingreso}$  debido a que al ingresar [el agua] dentro del termotanque se mezcla con el agua caliente que hay dentro de ella elevando así su temperatura.

Las temperaturas de entrada  $T_{in}$  y salida  $T_{out}$  en el tubo de vacío muestran una marcada diferencia algo que no se observa cuando se calienta el agua en estado estático como muestran las figuras 37 y 52. La temperatura registrada en  $T_{salida}$  es ligeramente menor a la registrada en la parte superior dentro del termotanque  $T_{superior}$ , esto se debe principalmente a la distancia que hay entre ambos puntos de medida habiendo un desfase de tiempo empleado al recorrer el tramo, además se puede considerar las perdidas térmicas que sufre durante el recorrido en la tubería.

El estudio se repite para los días 19 y 21 del marzo del 2021 y se muestran en las figuras 50 y 51 respectivamente ambos casos con caudal  $\dot{m} = 0,33 \text{ litros/segundo}$ . Para el caso de la figura 19 de deja

fluir el agua desde las 11:00 horas hasta las 15:59 horas, considerando como el tiempo inicial aquella cuando las temperaturas sean lo más cercano posible a la temperatura del agua de la red  $T_{red}$ . El comportamiento térmico es muy similar al observado en la figura 49; en este caso observamos la temperatura registrada en la ducha  $T_{ducha}$  la cual tiene valores de temperatura bajas con respecto a las que se mide en la salida  $T_{salida}$ . Esta caída de temperatura se puede explicar considerando la distancia que debe recorrer el agua antes de llegar a la ducha de unos 10 metros, además, aproximadamente la mitad del tramo no cuenta con aislamiento térmico y está directamente en contacto con el concreto de las paredes en las cuales está instalada, perdiéndose calor por transferencia hacia las paredes.

En la figura 51 se deja fluir el agua desde las 11:00 horas hasta las 16:00 horas. En este caso las temperaturas iniciales de aquellos que se miden dentro del termotanque ( $T_{in}$ ,  $T_{out}$ ,  $T_{inferior}$ , y  $T_{superior}$ ) tienen valores muy elevados respecto a la temperatura del agua de la red  $T_{red}$ .

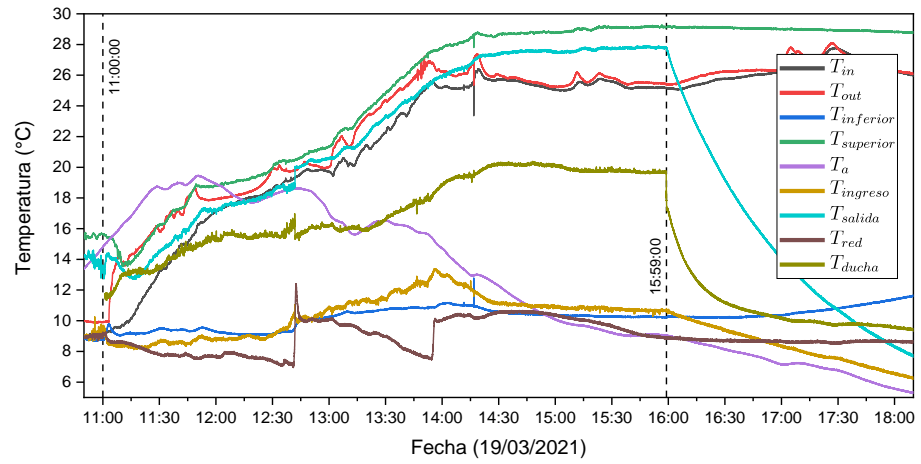


Figura 50. Calentamiento del agua que fluye a través de la terma solar con una caudal  $\dot{m} = 0,33$  litros/minuto evaluado el 19/03/2021.

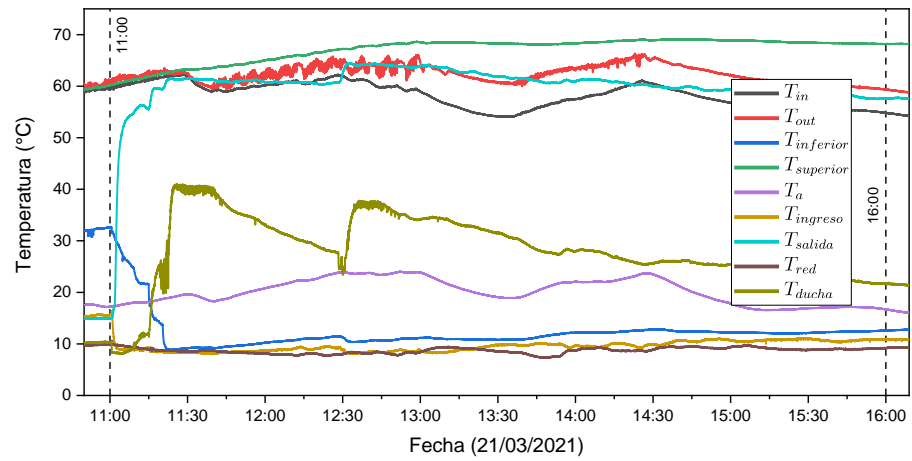


Figura 51. Calentamiento del agua que fluye a través de la terma solar con una caudal  $\dot{m} = 0,33$  litros/minuto evaluado el 21/03/2021.

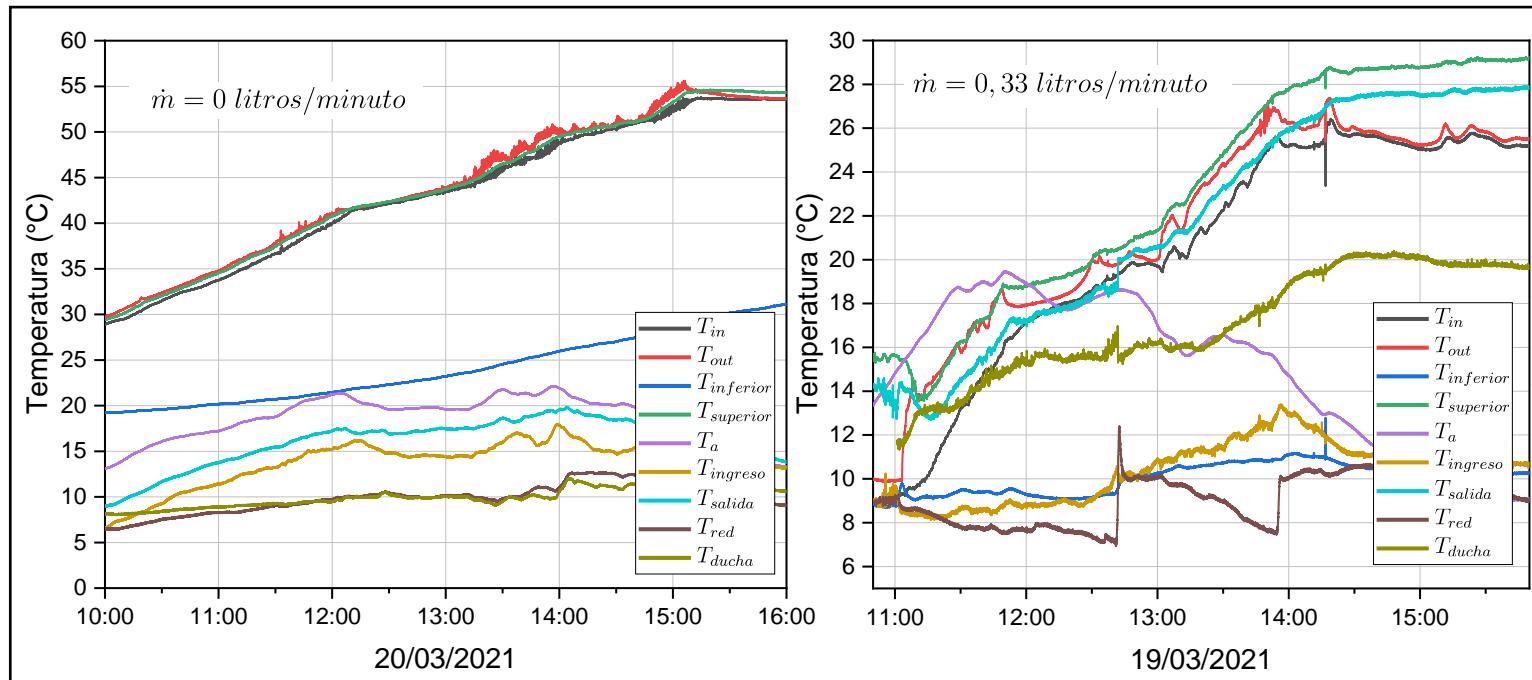


Figura 52. Comparación del comportamiento térmico de calentamiento del agua en estado sin consumo (izquierda) y en estado con consumo (derecha). En el primer caso hay un caudal diferente de cero mientras que en la segunda el caudal es igual a cero.

Finalmente, en la figura 52 se hace una comparación del comportamiento térmico para calentar el agua en la terma solar en las evaluaciones cuando está en estado *sin consumo* y en estado *con consumo*. La principal diferencia es, evidentemente, que las temperaturas que se llegan a alcanzar en el estado sin consumo son mucho mayores. Otro aspecto es con relación a las temperaturas medidas en el tubo de vacío  $T_{in}$  y  $T_{out}$ , en el caso del estado con consumo la diferencia de temperaturas es fácil de distinguir; sin embargo, en un estado sin consumo la diferencia es poco apreciable.

### 5.2.3. Eficiencia

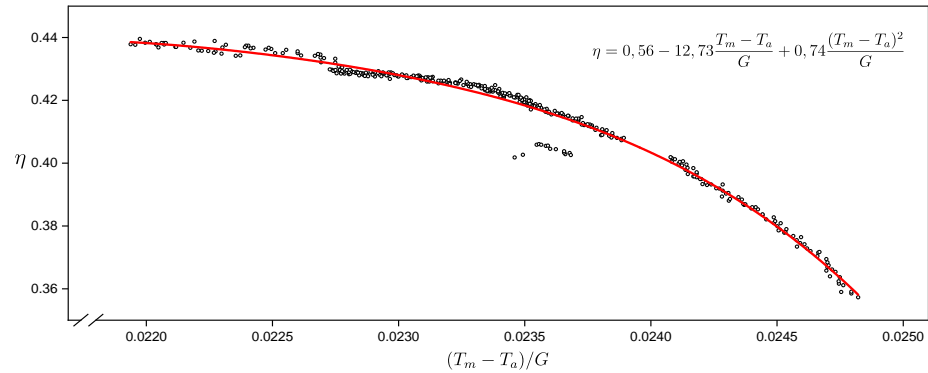
La eficiencia de la terma solar con tubos de vacío en estado con consumo se obtiene a partir de las ecuaciones 14 y 15. Se toman como valores del eje de las ordenadas los resultados de  $\eta$  obtenidos a partir de la ecuación 14 y los valores de las abscisas igual a  $\frac{T_m - T_a}{G}$  de la ecuación 15,  $T_m$  se obtiene a partir de la ecuación 18 y  $T_a$  es la temperatura ambiente. Los valores se toman de los resultados obtenidos en el apartado anterior, estos valores corresponden a los medidos cerca al medio día solar cuando el valor de la irradiancia solar global en plano inclinado  $G_\beta$  es prácticamente constante ( $\beta$  es el ángulo de inclinación del colector), además en el periodo que se toma los datos (para

determinar la eficiencia en este estado) debe ser completamente despejado.

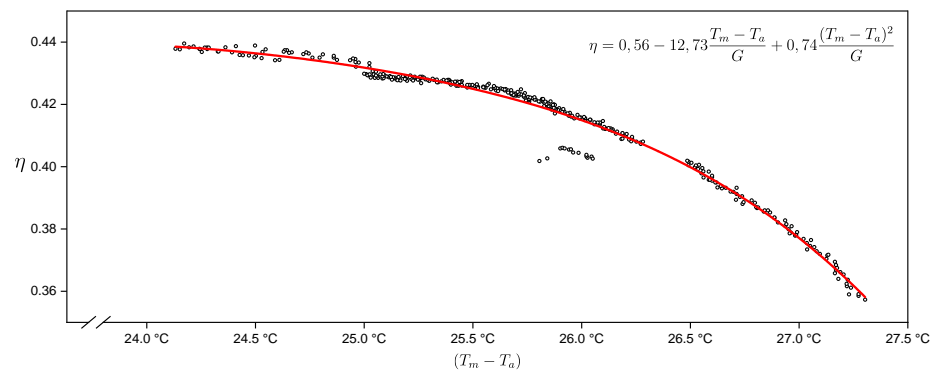
En la figura 53 se hace un ajuste polinomial de grado 2 obteniéndose la ecuación de la eficiencia igual a:

$$\eta = 0,56 - 12,73 \frac{T_m - T_a}{G_\beta} + 0,74 \frac{(T_m - T_a)^2}{G_\beta} \quad (22)$$

A partir de la ecuación 22 obtenemos la eficiencia óptica  $\eta_o$  que es igual a 0,56. La eficiencia óptica es la relación entre la potencia térmica entregada y la potencia solar disponible en el área total del colector sobre la cual incide la radiación solar, también se entiende  $\eta_o$  como aquello que indica qué porcentaje de los rayos solares que inciden sobre el material absorbedor de los tubos de vacío son absorbidos. El valor que hemos obtenido es similar a la eficiencia obtenida en estado sin consumo para los primeros días de evaluación como se muestra en la figura 47, La figura 54 muestra la misma curva de la eficiencia, pero considerando esta vez al eje de las abscisas como los valores de la diferencia entre la temperatura promedio del agua en el termotanque y la temperatura ambiente.



*Figura 53.* Curva de la eficiencia para una terma solar con tubos de vacío en condiciones climáticas de Kallapuma. Se obtiene una ecuación de grado 2.



*Figura 54.* Curva de la eficiencia para una terma solar con tubos de vacío en condiciones climáticas de Kallapuma. Los valores del eje de las abscisas son la diferencia entre la temperatura del agua promedio dentro del termotanque y la temperatura ambiente, dándole un significado mucho más intuitivo.

## CAPÍTULO VI

### DISCUSIÓN

- La figura 33 y 34 muestran que en el comportamiento térmico de la terma solar sin consumo hay una marcada diferencia de temperaturas entre las que se registra dentro del termotanque  $T_{in}$ ,  $T_{out}$ ,  $T_{inferior}$  y  $T_{superior}$ , y fuera de la misma  $T_{red}$ ,  $T_{ducha}$ ,  $T_{ingreso}$  y  $T_{salida}$ . El agua dentro del termotanque permanece a altas temperaturas a pesar de que el agua en las tuberías fuera del termotanque se congela. Para el día que se obtiene la mayor eficiencia (11/12/2020) se observa que la temperatura máxima del agua que alcanza dentro del termotanque y se registra en el punto  $T_{superior}$  es 61,08 °C a las 14:06 horas partiendo con un valor inicial igual a 25,92 °C a las 08:06 horas, con un total de energía de la radiación solar acumulada de 18,36 MJ/m<sup>2</sup> (5,01 kWh/m<sup>2</sup>). Otro aspecto importante es que durante las noches la temperatura del agua almacenada dentro del termotanque desciende en promedio 14 °C considerando que las horas de enfriamiento es mucho mayor que las horas de calentamiento. La aparición del contraflujo es bastante común alcanzando su máxima intensidad cuando la temperatura del agua dentro del termotanque alcanza su punto de ebullición a unos 88 °C. La terma solar permanece la mayor parte del tiempo es este estado, sin consumo.

- Las figuras 48, 49, 50 y 51 muestran que en el comportamiento térmico de la terma solar con consumo solo las temperaturas  $T_{red}$ ,  $T_{ingreso}$  y  $T_{inferior}$  permanecen con valores bajos cercanos a la temperatura del agua de la red  $T_{red}$ . las temperaturas  $T_{in}$ ,  $T_{out}$ ,  $T_{superior}$ ,  $T_{salida}$  y  $T_{ducha}$  muestran un aumento progresivo a medida que transcurre el tiempo y los colectores van captando más energía solar. Para el día con mayor tiempo de evaluación en estado con consumo (19/03/2021) se observa que la temperatura  $T_{superior}$  empieza con un valor inicial de 15,55 °C a las 11:00 horas y comienza a aumentar su valor a medida que transcurre el tiempo hasta alcanzar un valor máximo de aproximadamente 29,0 °C a las 16:00 horas, teniéndose una energía de radiación solar acumulada de 11,32 MJ/m<sup>2</sup> (3,14 kWh/m<sup>2</sup>) y flujo de agua igual a 0,33 *litros/minuto*. El tiempo que permanece la terma solar en este estado es mucho menor con relación a un estado sin consumo.
- En la figura 47 se observa que la eficiencia de la terma solar con tubos de vacío evaluada en un estado sin consumo presenta su valor máximo de aproximadamente 0,6 el primer día en cada periodo de evaluación. Sin embargo, la eficiencia empieza a disminuir en los días sucesivos. El estudio realizado por Montoya. (2011), quien emplea la misma metodología de cálculo de la eficiencia empleada en este estudio, obtiene resultados muy similares, calculando una eficiencia máxima igual a 0,67 para el primer día.

El descenso progresivo de la eficiencia para los días posteriores al primer día de evaluación se debe, principalmente, a las pérdidas de energía por evaporación dado que la temperatura del agua dentro del termotanque ( $T_{superior}$ ) y los tubos de vacío ( $T_{out}$ ) llegan a su punto de ebullición a partir del segundo día de evaluación como se muestra en figura 33. A partir del instante en que el agua llega a su punto de ebullición aparece el efecto de contraflujo con frecuencias muy regulares como se detalla en la figura 40, este fenómeno provoca la aparición de un caudal que cambia su sentido de flujo periódicamente, en tal contexto ya no es posible calcular la eficiencia de la terma solar con gran fiabilidad, por esta razón los valores representativos de eficiencia solo se han tomado aquellos que se obtuvieron los primeros días en cada periodo de evaluación y se les ha asignado como “eficiencia máxima”.

- La grafica 53 y la ecuación 22 nos muestra que los valores de la eficiencia tienen un comportamiento cuadrático y no lineal. Algunos estudios como el de Hayek (2011), Juanicó (2018), Majid et al. (2015), Mohammadkarima (2014), y Zambolin & Del Col (2010); obtienen una curva de eficiencia con comportamiento lineal por lo tanto sugieren el uso de la ecuación 15 eliminando el término cuadrático cuando se trata de colectores solares con tubos de vacío sin un sistema de seguimiento solar. El comportamiento

cuadrático de la curva de la eficiencia la terma solar del presente estudio se debe probablemente a las condiciones climáticas extremas de Kallapuma. Otro aspecto importante y que difiere de los autores mencionados es que esta curva de eficiencia cuadrática de la terma solar decae rápidamente cuando la diferencia de temperaturas del agua entre el promedio en el interior del termotanque  $T_m$  y ambiente  $T_a$  crece y por lo tanto la eficiencia empieza a disminuir. Según las figuras 33, 34 y 41 esta diferencia de temperaturas puede llegar a ser mayor a 30 °C.

- Los valores de la eficiencia de la terma solar en estudio muestran que la instalación de una terma solar con tubos de vacío es aprovechable y es capaz de suministrar agua caliente para su uso doméstico en el centro educativo y cualquier vivienda en zonas altoandinas ya sea Kallapuma u otros similares. Esta afirmación se refuerza con el hecho de que las evaluaciones muestran que el agua dentro de la terma solar alcanza su punto de ebullición en tan solo dos días. Por lo tanto, desde un punto de vista energético, este tipo de termas solares son muy convenientes para suministrar agua caliente de uso doméstico. Por otro lado, el sistema en su conjunto (Termas solar, tanque elevado y conexiones de tuberías) presenta problemas de funcionamiento debido a las condiciones de clima tan extremas que presenta Kallapuma, a pesar de que los valores de la eficiencia obtenidos muestran resultados óptimos. Esto se ve reflejada en el comportamiento térmico tan particular

de la terma solar como se ha mostrado en los resultados. Superar estos inconvenientes, implica el uso de materiales de alta calidad y trabajos de mantenimiento constante, elevando así el costo de instalación muy por encima de lo que normalmente cuesta hoy en día en el mercado. Por lo tanto, desde un punto de vista económico, es poco recomendable que un poblador de zonas altoandinas adquiera esta tecnología. En consecuencia, su uso estaría, por el momento, limitado a centros de estudio o centros médicos donde los gastos son cubiertos por el estado.

## CAPÍTULO VII

### CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

#### 7.1. Conclusiones

- Se ha logrado determinar experimentalmente que bajo las condiciones climáticas del centro poblado Maure – Kallapuma, la eficiencia máxima promedio de una terma solar con tubos de vacío sin consumo de agua caliente es del 59 % y 56 % cuando la terma está en un estado con consumo. Valores similares e incluso superiores a los reportados se han obtenido en otros estudios realizados en nuestro país.
- Bajo el estudio del comportamiento térmico de la terma solar con tubos de vacío, se ha estimado que ante una temperatura promedio del agua de la red de 10 °C, la temperatura promedio que alcanza en el tanque de almacenamiento sin consumo es de 60 °C para días despejados y 40 °C para días nublados. Para un estado con consumo se alcanza en promedio 20 °C cuando el caudal es aproximadamente igual a un litro por minuto.

- El funcionamiento de la terma solar con tubos de vacío, se ve influenciada fuertemente por el clima del centro poblado Maure – Kallapuma. La temperatura ambiental por debajo de los cero grados Celsius congela el agua dentro de los tubos generando rupturas por lo que requiere un aislamiento térmico impermeable y de alta calidad para evitar infiltraciones por lluvia y resista la intensa radiación solar de la zona.

## **7.2. Sugerencias**

- Las instalaciones de termas solares en lugares altoandinos como Kallapuma no pueden basarse únicamente en los procedimientos de instalación adoptados en las ciudades más desarrolladas como Tacna. Estos procedimientos empleados en las ciudades muchas veces son simples instrucciones mecánicas y rutinarias y no toman en consideración otros factores como las condiciones climáticas del lugar [donde se realiza la instalación] que influye significativamente en el empleo de materiales adecuados con el fin de garantizar el funcionamiento óptimo de la terma solar. A esto se suma la falta de entidades que fiscalicen a las empresas que realizan los trabajos de instalación para que cumplan las normas nacionales existentes para los

SCAES (Sistemas de calentamiento de agua con energía solar), evitándose así las inadecuadas instalaciones como el caso de las termas solares del Centro Educativo Horacio Zeballos Gamez de Kallapuma.

- Se sugiere evaluar las características térmicas de la terma solar en invierno, cuando las temperaturas son muy bajas. Esto permitiría obtener más datos sobre el congelamiento del agua y sus efectos en las tuberías, también permitiría observar la efectividad de los distintos aislamientos térmicos que envuelven las tuberías con mayor detalle.
- Usar aislamientos térmicos con mayores espesores u otro tipo de aislamiento para evitar el congelamiento del agua en las tuberías que podrían generar rupturas; Además, el aislamiento debe ser impermeable evitándose de ese modo la filtración de agua ocasionada por las lluvias.
- Para futuros estudios se recomienda colocar más sensores de temperatura dentro del termotanque para observar a mayor detalle la estratificación de la temperatura del agua.
- Se sugiere evaluar la terma solar bajo las siguientes configuraciones durante la noche: haciendo circular el agua de la red, haciendo recircular

el agua entre el tanque elevado y el termotanque, y vaciar agua en los tubos durante la noche empleando un sistema automático o similar. Estudio que será de gran importancia considerando que el Gobierno Regional de Tacna ha instalado en toda la zona altoandina e interandina más de 100 termas solares similares al evaluado en esta tesis.

- Es recomendable usar un medidor de flujo volumétrico digital para obtener un registro automático de datos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anaya, C. (2015). *Características de las Zonas Altoandinas en el Perú*. Informe temático N°154/2014-2015, Congreso de la República del Perú.
- Ari rabl. (1985). *Active Solar Collectors and Their Applications*. New York: Oxford university press.
- Budihardjo, I. (2005). *Evacuated tubular solar water heaters*. (Doctoral thesis), University of New South Wales.
- Budihardjo, I., & Morrison, G. (2009). Performance of water-in-glass evacuated tube solar water heaters. *Solar Energy*, 83(1), 49–56.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.06.010>
- Cisneros C. & Recalde C. (2015). *Modelación matemática de un colector solar de tubos evacuados todo cristal*. *Ingeniería Mecánica*. 19, 10-16.
- Colque, O., & Condori, Á. (2016). *Determinación de la eficiencia térmica de una terma solar de tubos al vacío en Puno*. Puno. (Tesis de licenciatura), Universidad Nacional del Altiplano.
- Duffie, J. A. & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. (4ta ed.). New Jersey: University of Wisconsin-Madison.
- Enteria, N. (2014). *Solar Energy Sciences and Engineering Applications*. New York: CRC Press/Balkema.

- Essa, M. A., & Mostafa, N. H. (2017). Theoretical and experimental study for temperature distribution and flow profile in all water evacuated tube solar collector considering solar radiation boundary condition. *Solar Energy*, *142*, 267–277. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.035>
- Evangelisti, L., De Lieto Vollaro, R., & Asdrubali, F. (2019). Latest advances on solar thermal collectors: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *114*, 109318. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109318>
- Fasulo, T. (2020). Solar radiation. *Advanced Remote Sensing*, 157–191. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815826-5.00005-2>
- Flores, L. (2017). *Avances del estudio experimental de la eficiencia de los colectores de los scaes en laboratorio de energia solar del daime*. Huaraz: XXIV Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente (XXIV- SPES).
- Flores Zamalloa, C. J. (2018). *Diseño de una terma solar de tubos al vacío para las condiciones ambientales de puno*. (Tesis de Grado), Universidad Nacional del Altiplano. Puno.
- Flores, F. (2017). *Sistema de Acondicionamiento Solar Pasivo para Calefacción de Viviendas Altoandinas del Perú*. Universidad de Ingeniería y Tecnología.
- Foster et al. (2010). *Solar Energy Renewable Energy and the Environment*. New Mexico: CRC press.

Gueymard, C. A. (2018). A reevaluation of the solar constant based on a 42-year total solar irradiance time series and a reconciliation of spaceborne observations. *Solar Energy*, *168*, 2–9.

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.04.001>

Hayek, M., Assaf, J., & Lteif, W. (2011). Experimental Investigation of the Performance of Evacuated-Tube Solar Collectors under Eastern Mediterranean Climatic Conditions. *Energy Procedia*, *6*, 618–626.

<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.05.071>

HOBO. (2020). ONSET-HOBO. Obtenido de <https://www.onsetcomp.com/>

HOBO. (2021). HOBOLink. Obtenido de <https://www.hobolink.com/>

HOBOWare. (3.7.21). [software].

Instituto Nacional de Defensa Civil - INDECI. (2020). Obtenido de <https://www.gob.pe/indeci>

Instituto Nacional de Estadística e Informática - INEI. (2019). Atlas de Población y Vivienda . 71-81.

ISO 7730. (1994). *Moderate thermal environments -- Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort*. *Int. Organ. Stand.* Obtenido de <https://www.iso.org/standard/14567.html>

- Juanicó, L. E. (2018). Modified vacuum tubes for overheating limitation of solar collectors: A dynamical modeling approach. *Solar Energy*, 171, 804–810.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.07.021>
- Kalogirou, S. (2009). *Solar energy*. United States of America: British Library.
- Karttunen et al. (2016). *Fundamental Astronomy*. Helsinki, Finland: Springer.
- Kiehl, J. T. (1997). *Earth's Annual Global Mean Energy Budget*. Colorado: National Center for Atmospheric Research.
- Kudish, A., Santamaura, P., & Beaufort, P. (1985). Direct measurement and analysis of thermosiphon flow. *Solar Energy*, 35(2), 167–173.  
[https://doi.org/10.1016/0038-092x\(85\)90006-4](https://doi.org/10.1016/0038-092x(85)90006-4)
- Kurpaska, S., Latała, H., Malinowski, M., & Kiełbasa, P. (2019). Efficiency of solar conversion in flat plate and vacuum tube solar collectors. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 214, 012033.  
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/214/1/012033>
- Lobato, G. R., & Barrena M. A. *Eficiencia de una terma solar con colector de cobre y colector de CPVC para zonas altoandinas*. Junín. XXIII Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente (XXIII - SPES).
- Lobato, G. R. (2019). *Evaluación de la eficiencia de una terma solar con colector de Cobre y colector de CPVC para zonas alto andinas*. Junin. (Tesis de Doctorado), Universidad Nacional del Centro del Perú.

- Lozano, M. A. (2019). *Colectores solares térmicos*. DIM.
- Majid et al. (2015). Simulation and Optimization of Vacuum Tube Solar Collector Water Heating System in Iran. *Journal of Science and Engineering*. 07 (01). 01-019
- Martínez, C. S. (2014). *Efecto de los colectores solares con tubos de vacío en el ahorro de energía eléctrica en zonas alto andinas*. (Tesis de Maestría), Universidad Nacional del Centro del Perú. Huancayo.
- Mendoza et al. (2018). *Eficiencia térmica de un calentador solar doméstico de agua hecho con botellas plásticas, Chachapoyas – Amazonas, 2014*.
- Mendoza, J. (2014). *Eficiencia térmica de un calentador solar doméstico de agua hecho con botellas plásticas, chachapoyas-amazonas*. (Tesis de Grado), Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas. Chachapoyas.
- Mercado, C. M. (2015). *Evaluación de parámetros de operación de colector solar de tubos al vacío para generación de agua caliente en huancayo*. (Tesis de Maestría), Universidad Nacional del Centro del Perú. Huancayo.
- Messel, H. (1975). *Solar energy*. Oxford. Pergamon Press.
- Meteonorm. (2020). Obtenido de <https://meteonorm.com/en/>

Ministerio de Desarrollo e Inclusión Social - MIDIS. (2020). *¡Bienvenido a*

*KALLAPUMA!* Obtenido de:

[https://www.pais.gob.pe/tambo/tambo/perfiltambo/index/id\\_tambo/19802](https://www.pais.gob.pe/tambo/tambo/perfiltambo/index/id_tambo/19802)

Ministerio de Salud - MINSA. (2017). *Situación Epidemiológica de las IRA y*

*Neumonías en el Perú.* Obtenido de

<http://www.dge.gob.pe/portal/docs/tools/teleconferencia/SE272017/05.pdf>

Morrison, G., Budihardjo, I., & Behnia, M. (2005). Measurement and simulation

of flow rate in a water-in-glass evacuated tube solar water heater. *Solar*

*Energy*, 78(2), 257–267. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.09.005>

Mohammadkarima, A. (2014). Performance Investigation of Solar Evacuated Tube

Collector Using TRNSYS in Tehran Ahmadreza. *International Journal of*

*Renewable Energy Research*, 4(2), 497-503.

Molina, I. A. & Hanco I. C. (2020). *Caracterización de la radiación solar en puno*

*para el diseño de un sistema térmico solar de agua caliente sanitaria para*

*un hotel de 50 personas.* (Tesis de Grado), Universidad Nacional del

Altiplano, Puno

Montoya, P. A. (2011). *Estudio de evaluación de eficiencia de un calentador solar*

*de tubos al vacío con tanque acumulador, de la empresa d'sol.* Arequipa:

Unsa Lera.

- National Renewable Energy Laboratory - NREL. (2020). *2000 ASTM Standard Extraterrestrial Spectrum Reference E-490-00*. Obtenido de: <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-astm-e490.html>
- Polo, C. A. (2013). *Potencial energético solar y su impacto ambiental en la región tacna*. (Tesis de Maestría), Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Tacna.
- Polo, C. & Torres H. (2013). *Metodos experimentales para la evaluación de colectores y termas solares*. Tacna.
- Rondan et al. (2016). *Determinación de la eficiencia de un tubo de vacío de baja presión y alta presión de un colector solar. XXIII Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente (XXIII- SPES)*. Huancayo.
- Sabiha, M., Saidur, R., Mekhilef, S., & Mahian, O. (2015). Progress and latest developments of evacuated tube solar collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1038–1054. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.016>
- Sayigh, A. A. M. (1977). *Solar Energy Engineering*. London NW1 7DX: Cademicpress, I N C .
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI. (2020). *Datos historicos*. Obtenido de <http://www.senamhi.gob.pe/?p=data-historica>

- Sifuentes, L. (s.f.). *Las regiones geográficas de Perú*. Obtenido de <https://cutt.ly/FegGoj7>
- Sokolik, I. (2008). Radiation Balance and Solar Radiation Spectrum. *Encyclopedia of Ecology*, 2951–2955.  
<https://doi.org/10.1016/b978-008045405-4.00607-8>
- Speyer, E. (2016). *Solar Energy Collection With Evacuated Tubes*. American Machine & Foundry.
- Tang, R., Yang, Y., & Gao, W. (2011). Comparative studies on thermal performance of water-in-glass evacuated tube solar water heaters with different collector tilt-angles. *Solar Energy*, 85(7), 1381–1389.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.03.019>
- Walker, A. (2013). *Solar energy Technologies and the Project Delivery Process for Buildings*. New Jersey: Published by John Wiley & Sons, Inc.,.
- Wang, R. Z. (2016). *Advances in Solar Heating and Cooling*. Cambridge, MA 02139. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-03661-1>
- Wright, J. (2008). *Cálculo espectral de la radiación solar directa, difusa y global en Heredia, Costa Rica*. Uniciencia.

Zambolin, E., & Del Col, D. (2010). Experimental analysis of thermal performance of flat plate and evacuated tube solar collectors in stationary standard and daily conditions. *Solar Energy*, 84(8), 1382–1396. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.04.020>

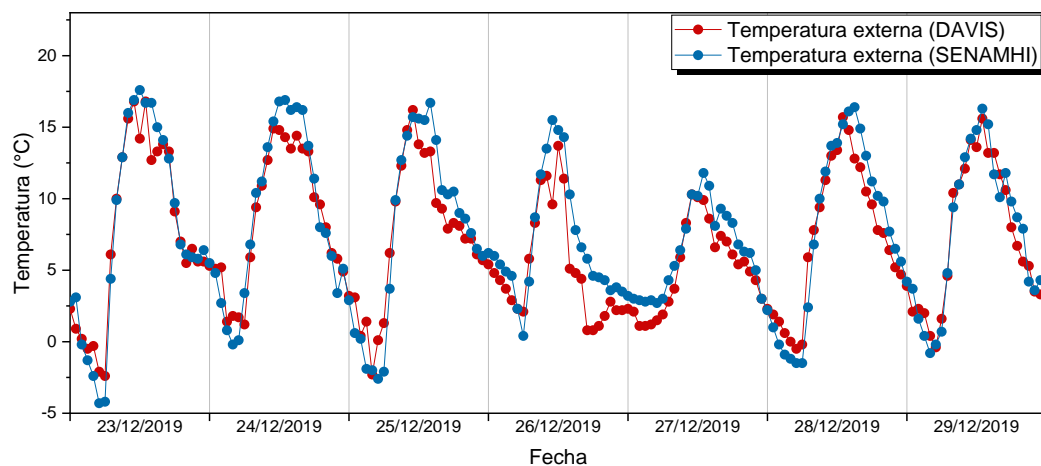
Zubriski, S. E., & Dick, K. J. (2012). measurement of the efficiency of evacuated tube solar collectors under various operating conditions. *Journal of Green Building*, 7(3), 114–130. <https://doi.org/10.3992/jgb.7.3.114>

## **ANEXOS**

## ANEXO 1

### COMPARACIÓN DE LA TEMPERATURA AMBIENTE ENTRE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA DAVIS Y SENAMHI

Debido a que no se cuenta con datos históricos de los parámetros meteorológicos para Maure – Kallapuma es que se ha usado los datos que registra la estación meteorológica automática del SENAMHI ubicada en Chuapalca a 10 km de Kallapuma. La figura de abajo es una comparación directa de los valores registrados por la estación meteorológica Davis y los de la SENAMHI. La estación meteorológica Davis está instalada en el Tambo del centro poblado Maure – Kallapuma. La similitud observada nos permite emplear los registros del SENAMHI de la temperatura ambiente con bastante precisión para Kallapuma.



*Figura 55.* Comparación de los valores de temperatura obtenidos por la estación meteorológica Davis en Kallapuma y los datos obtenidos por la SENAMHI a 10km de Kallapuma.

## ANEXO 2

### IRRADIANCIA SOLAR PARA LOS PERIODOS DE PRUEBA EN ESTADO CON CONSUMO

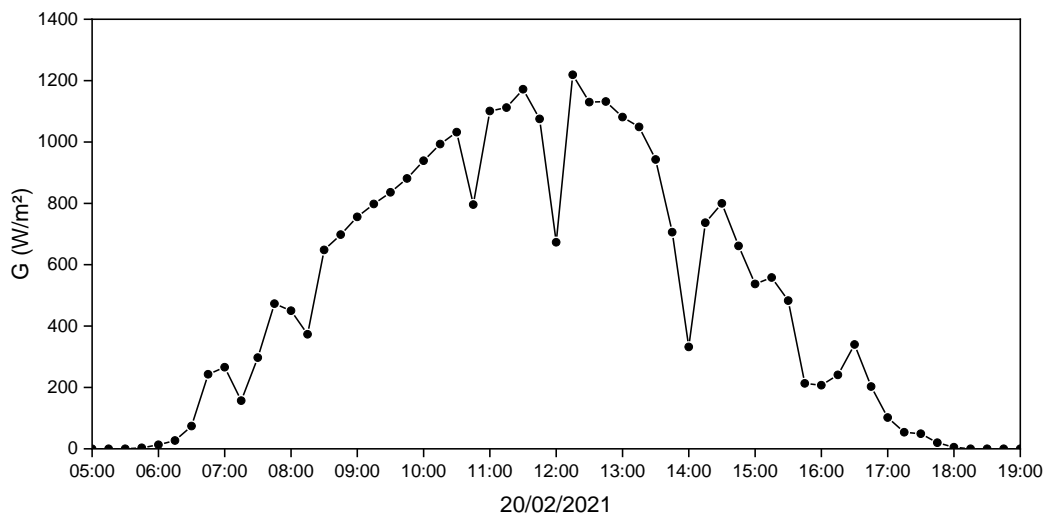


Figura 56. Irradiancia solar en plano horizontal para el 20/02/2021

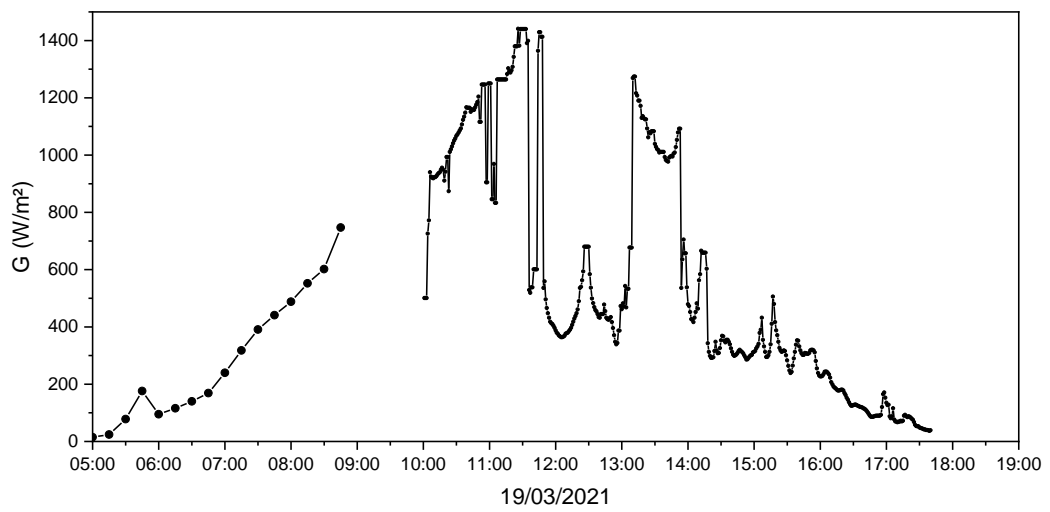


Figura 57. Irradiancia solar en plano horizontal para el 19/03/2021

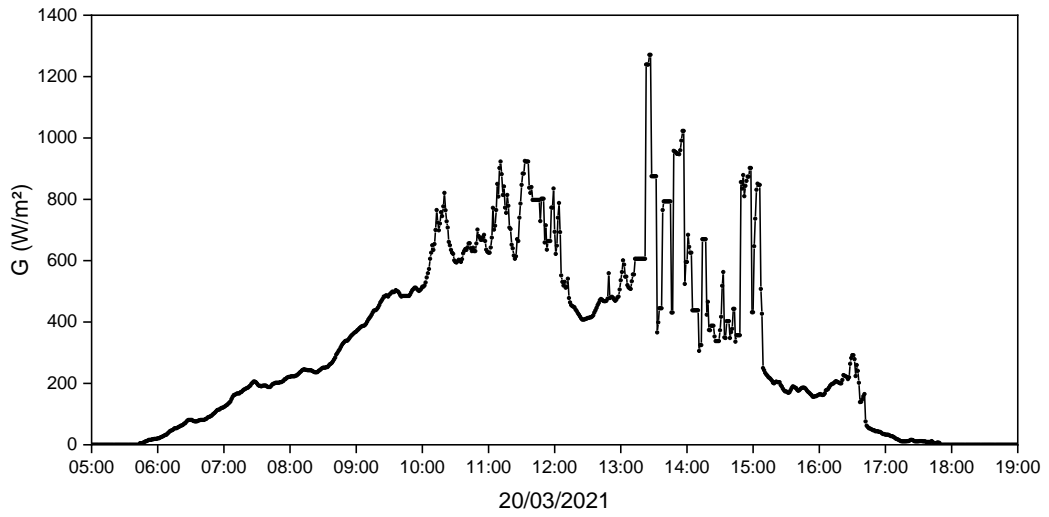


Figura 58. Irradiancia solar en plano horizontal para el 20/03/2021

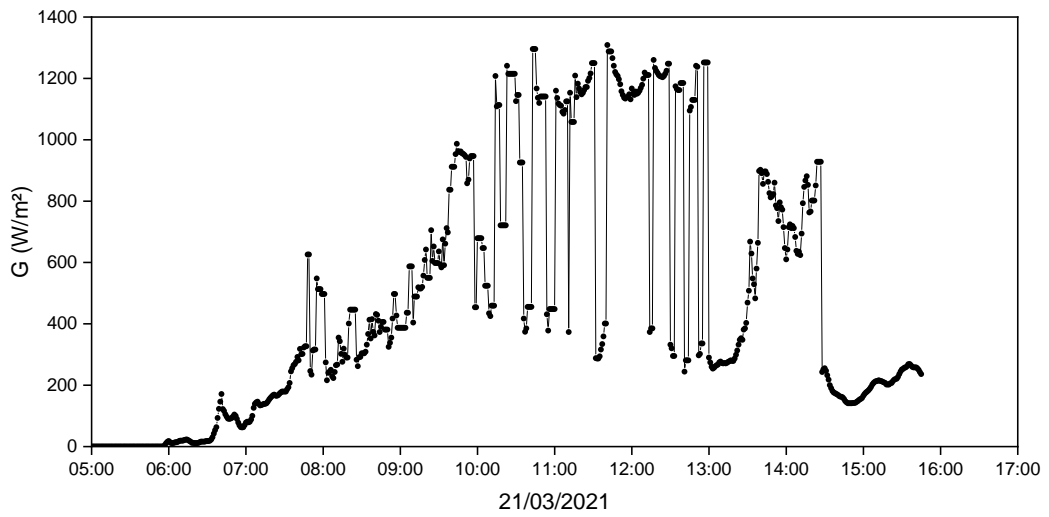


Figura 59. Irradiancia solar en plano horizontal para el 21/03/2021

### ANEXO 3

## MAPA DE LA IRRADIACIÓN SOLAR GLOBAL HORIZONTAL DEL PERÚ

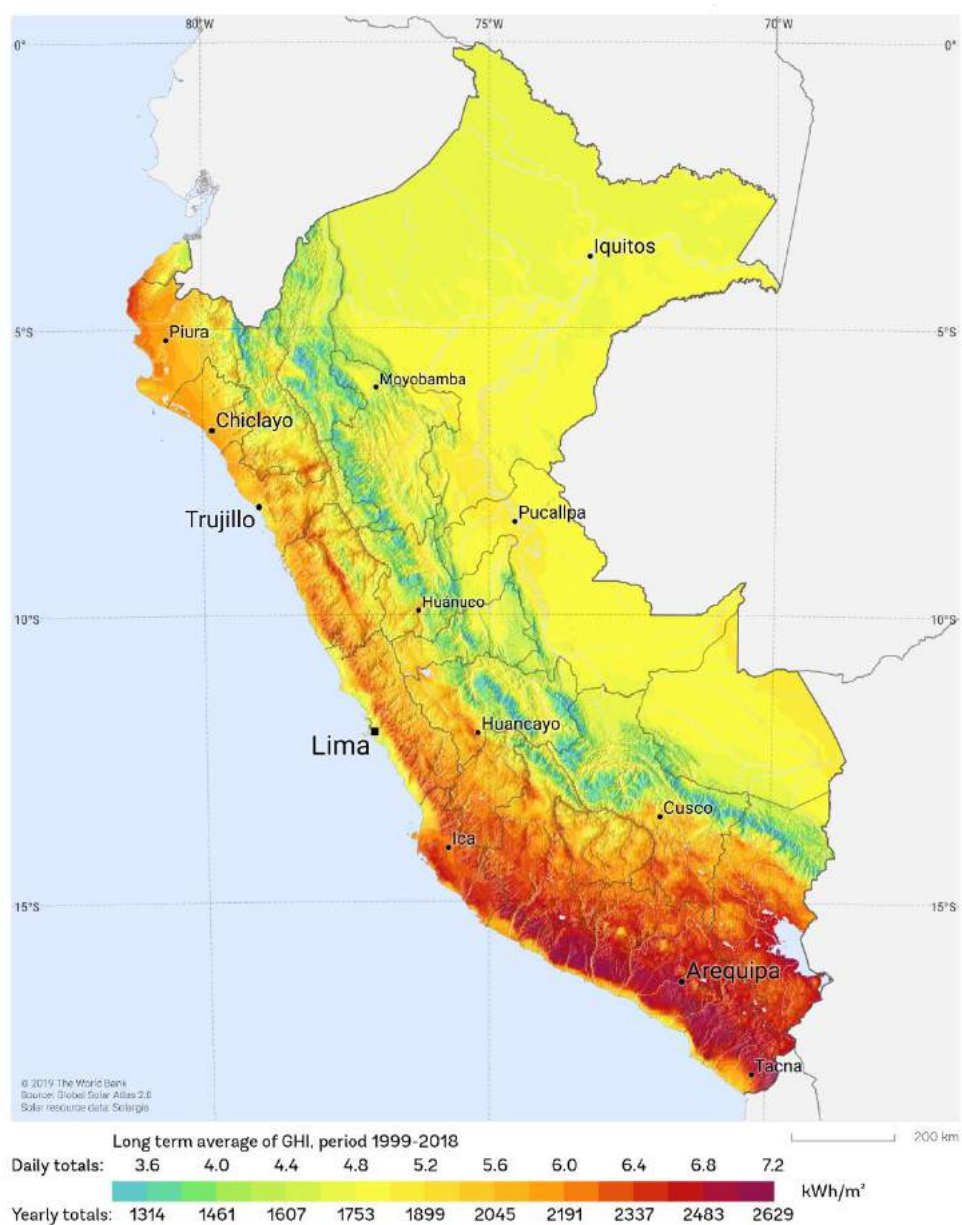


Figura 60. Mapa de la irradiación solar global horizontal del Perú. Banco mundial, (2020)

## ANEXO 4

### TERMOCUPLAS HOBO

TC6-T

**Termocupla Tipo T 6 FT de 5m**

Marca: ONSET  
Modelo: TC6-T

Rango y precisión:  
-200 a -85 ° C /  $\pm 1,5$  % de precisión  
-85 a 130 ° C /  $\pm 1,0$  ° C precisión  
130 a 180 ° C /  $\pm 0,75$  % de precisión  
Aislamiento: Tipo T Teflon®  
Longitud: 5 metros

**Nota:**

El aislamiento de teflón tiene una clasificación de hasta 200 ° C continuos y + 250 ° C durante 24 horas.  
El porcentaje está en grados por encima o por debajo del punto de hielo (0 ° C o 32 ° F)



TCP6-K12

**Termocupla Tipo K 12" de 5m**

Marca: ONSET  
Modelo: TCP6-K12

Rango y precisión:  
-0 a 293 ° C /  $\pm 2,2$  ° C precisión  
-293 ° C a 900 ° C /  $\pm 0,75$  % de precisión  
-Sonda de acero inoxidable para alta temperatura: Tipo K  
-Dimensiones: Sonda de acero inoxidable 304 de 12", 3/16" de diámetro con termopar aislado  
-1" Mango con alivio de tensión tipo resorte  
-6" Cable de 19 AWG  
Longitud: 5 metros

NOTA: La sonda tiene una clasificación de hasta 900 ° C continuos y 1235 ° C para exposiciones de una hora



## ANEXO 5

### RXW Silicon Pyranometer Sensor (RXW-LIB-xxx)



#### RXW Silicon Pyranometer Sensor

##### Models:

- RXW-LIB-900 (US)
- RXW-LIB-868 (Europe)
- RXW-LIB-921 (Taiwan)
- RXW-LIB-922 (Australia/NZ)

##### Included Items:

- Cable ties
- Screws

##### Accessories:

- Light sensor mounting bracket (M-LBB)
- Light sensor level (M-LLA)

This sensor measures solar radiation and is designed to work with the HOBONet (HOB0® RX) Wireless Sensor Network in which data is transmitted wirelessly from the sensor mote across the network to the station and then uploaded to HOBOLink® web-based software. With HOBOLink, you can monitor sensor readings, view graphs, set up alarms, download data, and more.

#### Specifications

Sensor	
Measurement Range	0 to 1280 W/m <sup>2</sup>
Spectral Range	300 to 1100 nm (see Plot A)
Accuracy	Typically within $\pm 10$ W/m <sup>2</sup> or $\pm 5\%$ , whichever is greater in sunlight; Additional temperature induced error $\pm 0.38$ W/m <sup>2</sup> /°C from 25°C ( $\pm 0.21$ W/m <sup>2</sup> /°F from 77°F)
Angular Accuracy	Cosine corrected 0 to 80 degrees from vertical (see Plot B); Azimuth Error $\leq 2\%$ error at 45 degrees from vertical, 360 degree rotation
Resolution	1.25 W/m <sup>2</sup>
Drift	$\leq \pm 2\%$ per year
Wireless Mote	
Operating Temperature Range	-25° to 60°C (-13° to 140°F) with rechargeable batteries -40° to 70°C (-40° to 158°F) with lithium batteries
Radio Power	12.6 mW (+11 dBm) non-adjustable
Transmission Range	Reliable connection to 457.2 m (1,500 ft) line of sight at 1.8 m (6 ft) high Reliable connection to 609.6 m (2,000 ft) line of sight at 3 m (10 ft) high
Wireless Data Standard	IEEE 802.15.4
Radio Operating Frequencies	RXW-LIB-900: 904–924 MHz RXW-LIB-868: 866.5 MHz RXW-LIB-921: 921 MHz RXW-LIB-922: 916–924 MHz
Modulation Employed	OQPSK (Offset Quadrature Phase Shift Keying)
Data Rate	Up to 250 kbps, non-adjustable
Duty Cycle	<1%
Maximum Number of Motes	Up to 50 wireless sensors or 326 data channels per one HOB0 RX station
Logging Rate	1 minute to 18 hours
Number of Data Channels	2
Battery Type/ Power Source	Two AA 1.2V rechargeable NiMH batteries, powered by built-in solar panel or two AA 1.5 V lithium batteries for operating conditions of -40° to 70°C (-40° to 158°F)
Battery Life	With NiMH batteries: Typical 3–5 years when operated in the temperature range -20° to 40°C (-4°F to 104°F) and positioned toward the sun (see <i>Deployment and Mounting</i> ), operation outside this range will reduce the battery service life With lithium batteries: 1 year, typical use
Memory	16 MB
Dimensions	Sensor: 4.1 cm height x 3.2 cm diameter (1.61 x 1.26 inches) Cable length: 2 m (6.56 ft) Mote: 16.2 x 8.59 x 4.14 cm (6.38 x 3.38 x 1.63 inches)
Weight	Sensor and cable: 109 g (3.85 oz) Mote: 223 g (7.87 oz)
Materials	Sensor: Anodized aluminum housing with acrylic diffuser and O-ring seal Mote: PC/PBT, silicone rubber seal
Environmental Rating	Sensor and cable: Weatherproof Mote: IP67, NEMA 5

## ANEXO 6

### HOBO® 4-Channel Thermocouple Data Logger (UX120-014M)



#### HOBO 4-Channel Thermocouple Data Logger

UX120-014M

#### Included Items:

- Command™ strip
- Double-sided tape
- Hook & loop strap
- Two AAA 1.5 V alkaline batteries

#### Required Items:

- HOBOWare 3.5 or later
- USB cable (included with software)
- Thermocouple sensor type J, K, T, E, R, S, B, or N

#### Accessory:

- Protective case (CASE-4X-2)

The HOBO 4-Channel Thermocouple data logger records temperature in indoor environments using up to four J, K, T, E, R, S, B, or N type thermocouple sensors (sold separately). The logger also has an internal 10K thermistor for cold-junction compensation of the thermocouple output. The four thermocouple channels have a 20-bit resolution while the internal 10K thermistor has a 12-bit resolution. Using HOBOWare®, you can easily configure the logger alarm to trip for specific high or low temperatures. Or, you can set up burst logging in which the logger records data at a different interval during certain conditions. The logger can also calculate minimum, maximum, average, and standard deviation statistics. This easy-to-use data logger has a built-in LCD screen to monitor temperature, logging status, battery use, and memory consumption between readouts. An optional protective case (CASE-4X-2) is also available for this logger.

#### Specifications

##### Thermocouple

Type	Range	Accuracy	Resolution
J	-210° to 760°C (-346° to 1,400°F)	±0.6°C (±1.08°F) ± thermocouple probe accuracy	0.03°C (0.05°F)
K	-260° to 1,370°C (-436° to 2,498°F)	±0.7°C (±1.26°F) ± thermocouple probe accuracy	0.04°C (0.07°F)
T	-260° to 400°C (-436° to 752°F)	±0.6°C (±1.08°F) ± thermocouple probe accuracy	0.02°C (0.03°F)
E	-260° to 950°C (-436° to 1,742°F)	±0.6°C (±1.08°F) ± thermocouple probe accuracy	0.03°C at (0.05°F)
R	-50° to 1,550°C (-58° to 2,822°F)	±2.2°C (±3.96°F) ± thermocouple probe accuracy	0.08°C (0.15°F)
S	50° to 1,720°C (58° to 3,128°F)	±2.2°C (±3.96°F) ± thermocouple probe accuracy	0.08°C (0.15°F)
B	550° to 1,820°C (1,022° to 3,308°F)	±2.5°C (±4.5°F) ± thermocouple probe accuracy	0.1°C (0.18°F)
N	-260° to 1,300°C (-436° to 2,372°F)	±1.0°C (±1.8°F) ± thermocouple probe accuracy	0.06°C (0.11°F)

##### Internal 10K Thermistor (Temperature)

Range	-20° to 70°C (-4° to 158°F)
Accuracy	±0.21°C from 0° to 50°C (±0.38°F from 32° to 122°F), see Plot A
Resolution	0.024°C at 25°C (0.04°F at 77°F); see Plot A
Drift	<0.1°C (0.18°F) per year

##### Logger

Logger Operating Range	Logging: -20° to 70°C (-4° to 158°F); 0 to 95% RH (non-condensing); Launch/Readout: 0° to 50°C (32° to 122°F) per USB specification
Logging Rate	1 second to 18 hours, 12 minutes, 15 seconds
Logging Modes	Fixed interval (normal), burst, or statistics
Memory Modes	Wrap when full or stop when full
Start Modes	Immediate, push button, date & time, or next interval
Stop Modes	When memory full, push button, or date & time
Restart Mode	Push button
Time Accuracy	±1 minute per month at 25°C (77°F), see Plot B
Power Source	Two AAA 1.5 V alkaline batteries, user replaceable, and USB cable
Battery Life	1 year, typical with logging rate of 1 minute and sampling interval of 15 seconds or greater
Memory	4 MB (1.6 million measurements, maximum)

## ANEXO 7

### FOTOS



*Figura 61.* Centro educativo Horacio Zeballos Gamez del centro poblado de Kallapuma.



*Figura 62.* Plaza central del centro poblado de Kallapuma.



*Figura 63.* Estado inicial de las tuberías. Las rupturas en las tuberías causadas por el congelamiento del agua fueron parchadas con plástico y tela.



*Figura 64.* Estado inicial de las tuberías. El aislamiento térmico se encontraba en malas condiciones.



*Figura 65.* Estado inicial de la terma solar. Mala orientación geográfica.



*Figura 66.* Trabajos de reparación y mantenimiento de la terma solar.



*Figura 67.* Sensores de temperatura que registran las temperaturas en puntos interiores del termotanque conectados al datalogger HOBO 1



*Figura 68.* Sensores de temperatura que registran las temperaturas en puntos fuera del termotanque conectados al datalogger HOBO 2.



*Figuras 69 y 70.* Todas las conexiones de tubería fueron completamente cubiertos con aislamiento térmico. Se muestran también algunos puntos de acceso de los sensores de temperatura.



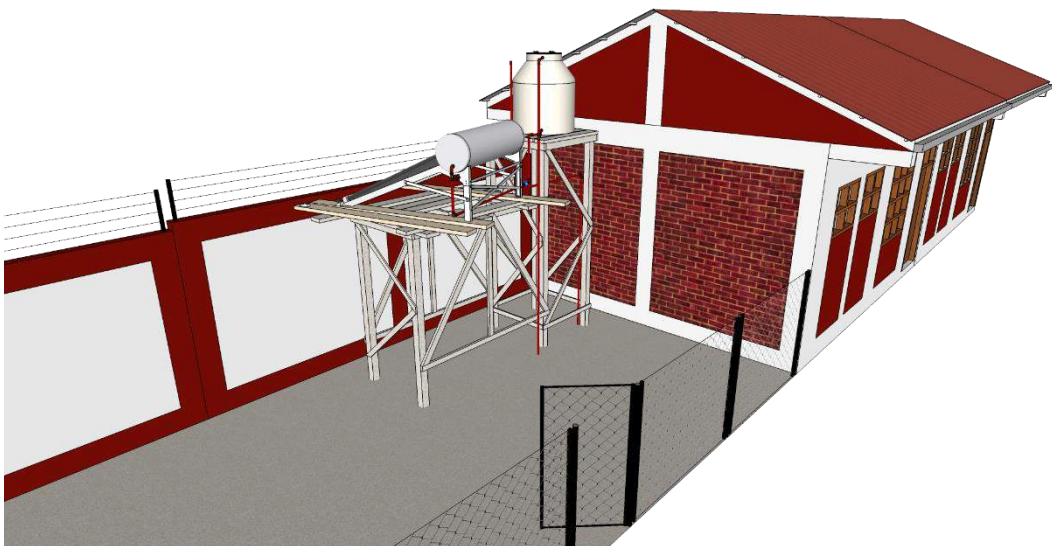
*Figura 71.* Días con precipitación en el segundo periodo de evaluación.



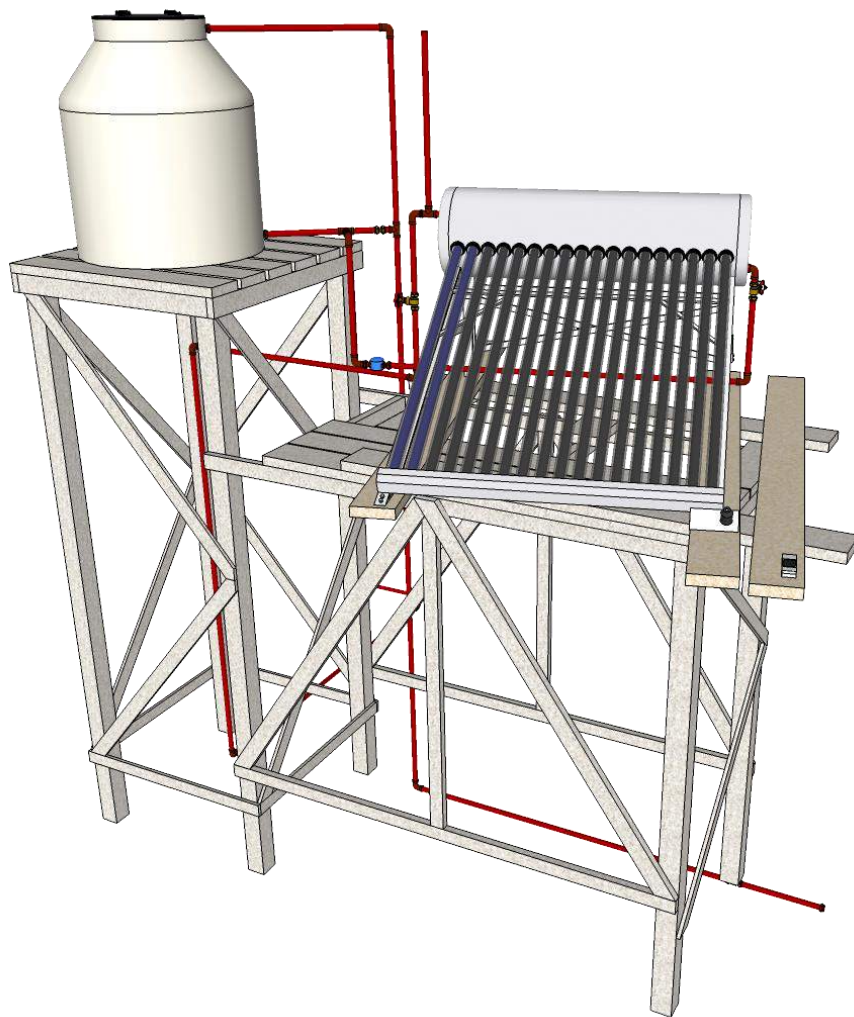
*Figura 72.* Ubicación de la terma solar, al fondo a la izquierda.



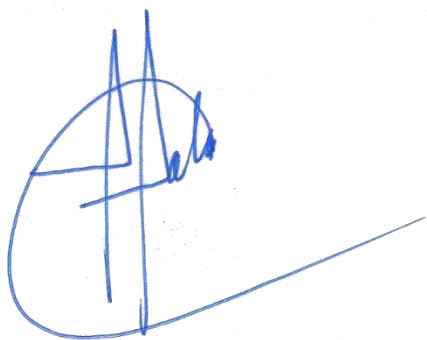
*Figura 73.* Ubicación de la terma solar con tubos de vacío



*Figura 74.* Ubicación de la Terma solar con tubos de vacío graficado en SketchUp.



*Figura 75.* Configuración final del sistema para el calentamiento de agua a través del uso de una terma solar con tubos de vacío.



---

MSc. Carlos Armando Polo Bravo  
**Asesor**



---

Bach. John Alfredo Chuquimia López  
**Tesista**