

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO - PUNO

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA Y SISTEMAS**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA



TESIS

**“DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA TÉRMICA DE UNA TERMA
SOLAR DE TUBOS AL VACÍO EN PUNO”**

PRESENTADO POR:

OMAR ALEX COLQUE MONJE

ÁNGEL HUGO CONDORI ALANOCA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

PUNO - PERÚ

2016

Universidad Nacional Del Altiplano-Puno

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y SISTEMAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

“DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA TÉRMICA DE UNA TERMA SOLAR DE TUBOS AL VACÍO EN PUNO”

TESIS PRESENTADA POR:

OMAR ALEX COLQUE MONJE

ÁNGEL HUGO CONDORI ALANOCA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

APROBADA POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:

PRESIDENTE


.....
Ing. LEONEL MARINO CASTILLO ENRIQUEZ

PRIMER MIEMBRO


.....
M.Sc. Ing. ANGEL MARIO HURTADO CHAVEZ

SEGUNDO MIEMBRO


.....
Ing. LEONIDAS VILCA CALLATA

DIRECTOR DE TESIS


.....
M.Sc. Ing. JOSE MANUEL RAMOS CUTIPA

ASESOR DE TESIS

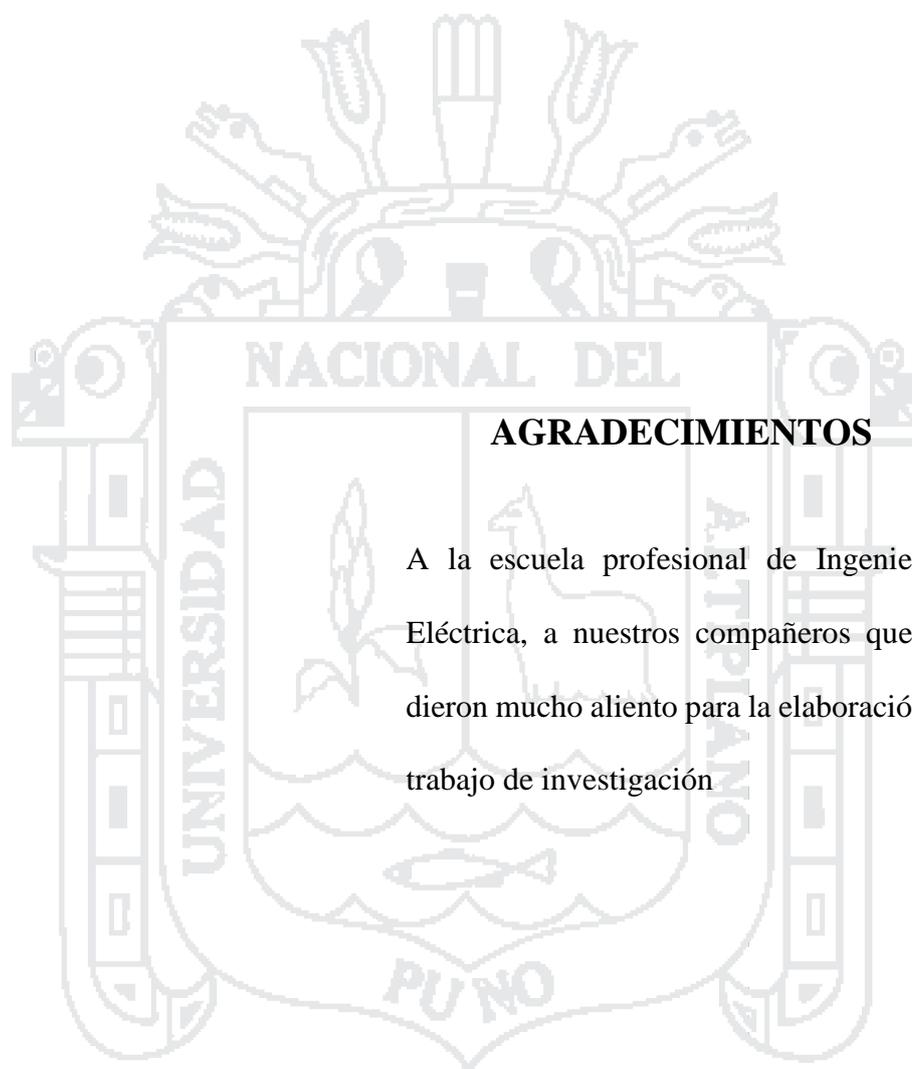

.....
Ing. JULIO ALBERTO CONDORI ARGANDOÑA

Puno –Perú

2016

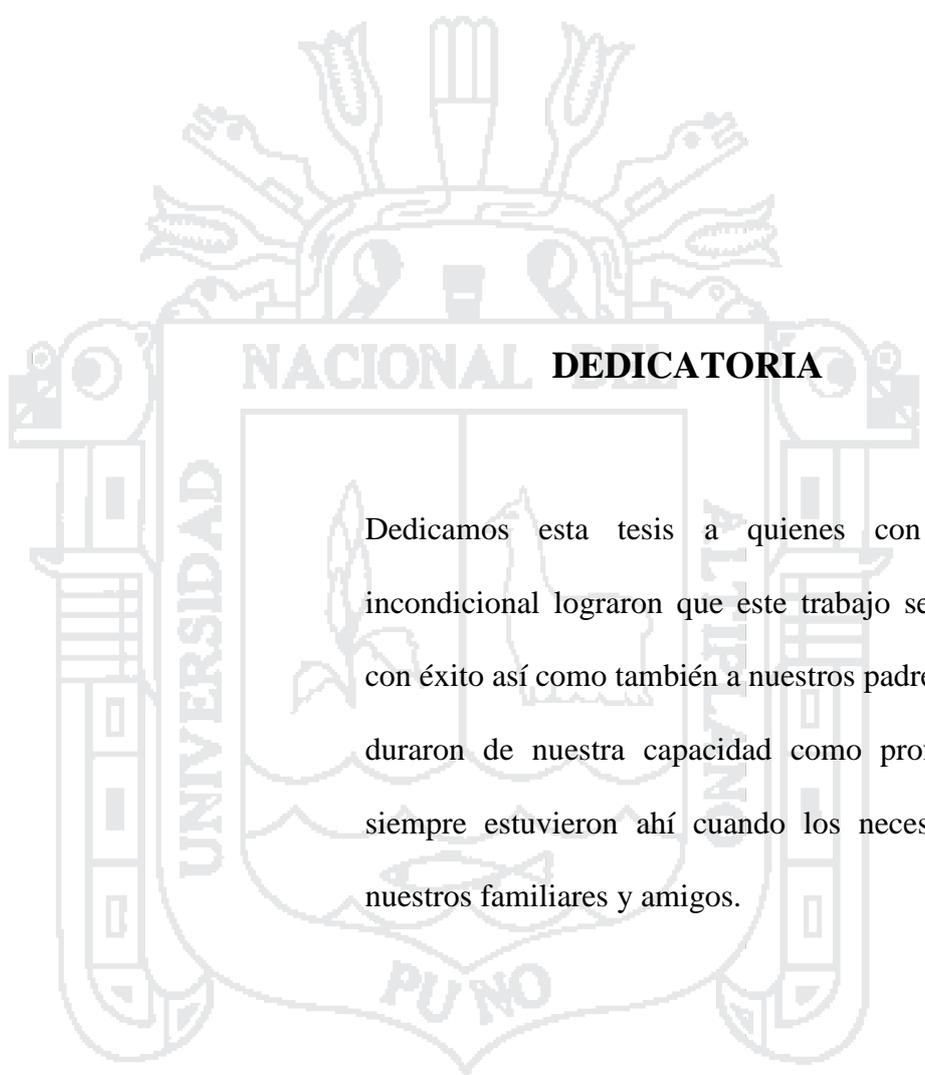
Área: Energías renovables

Tema: Energía solar térmica



AGRADECIMIENTOS

A la escuela profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica, a nuestros compañeros que siempre nos dieron mucho aliento para la elaboración del presente trabajo de investigación



DEDICATORIA

Dedicamos esta tesis a quienes con su apoyo incondicional lograron que este trabajo se concluyera con éxito así como también a nuestros padres que nunca duraron de nuestra capacidad como profesionales y siempre estuvieron ahí cuando los necesitábamos, a nuestros familiares y amigos.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS

DEDICATORIA

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCION

CAPÍTULO I

| | |
|--|-----------|
| PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 16 |
| 1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA..... | 16 |
| 1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA..... | 18 |
| 1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN | 19 |
| 1.3.1. OBJETIVO GENERAL..... | 19 |
| 1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 19 |

CAPÍTULO II

| | |
|---|-----------|
| MARCO TEÓRICO | 21 |
| 2.1. ANTECEDENTES DE INVESTIGACIÓN | 21 |
| 2.2. SUSTENTO TEÓRICO..... | 24 |
| 2.2.1. Energía Solar ¿Por qué?..... | 24 |
| 2.2.2. Tecnologías Solares existentes..... | 24 |
| 2.2.3. Radiación Solar | 25 |
| 2.2.4. Terma Solar..... | 30 |
| 2.2.5. Efectos de la orientación de la superficie receptora del sol | 34 |
| 2.2.6. Variables Experimentales | 38 |
| 2.2.7. Instrumentos de medición | 40 |
| 2.3. GLOSARIO DE TÉRMINOS BÁSICOS..... | 444 |
| 2.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN..... | 46 |
| 2.5. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES | 47 |

CAPÍTULO III

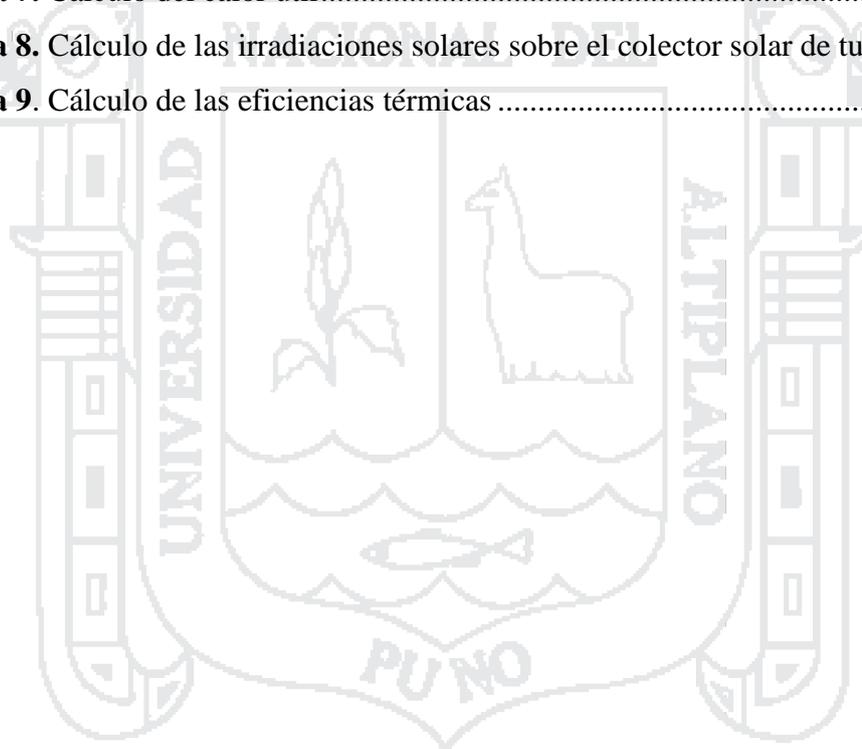
| | |
|--|----|
| DISEÑO METODOLÓGICO DE INVESTIGACIÓN | 49 |
| 3.1. TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN | 49 |
| 3.1.1. Tipo de Investigación..... | 49 |
| 3.1.2. Diseño de la Investigación..... | 49 |
| 3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA DE INVESTIGACIÓN | 55 |
| 3.3. UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA POBLACIÓN..... | 55 |
| 3.4. MATERIAL EXPERIMENTAL | 55 |
| 3.5. PROCEDIMIENTO DEL EXPERIMENTO | 57 |
| 3.5.1. Montaje de la terma solar de tubos de vacío..... | 57 |
| 3.5.2. Determinación de la capacidad de volumen de agua del tanque de almacenamiento..... | 59 |
| 3.5.3. Diseño del formato para la toma de datos experimentales..... | 60 |
| 3.6. ENSAYO TÉCNICO EXPERIMENTAL | 61 |
| 3.6.1. Toma de datos experimentales para la determinación de la capacidad de volumen de tanque de almacenamiento..... | 62 |
| 3.6.2. Toma de datos experimentales en el módulo de investigación..... | 66 |

CAPÍTULO IV

| | |
|---|-----|
| ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN . | 86 |
| 4.1. CÁLCULO DE MASA DEL AGUA DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DEL AGUA | 86 |
| 4.2. CÁLCULO DE LA MASA DEL AGUA EN LOS TUBOS DEL COLECTOR DE TUBOS DE VACÍO | 87 |
| 4.3. CÁLCULO DE LA EFICIENCIA TÉRMICA..... | 88 |
| 4.3.1. Cálculo del calor útil (Q_u)..... | 89 |
| 4.3.2. Cálculo de la Irradiación sobre el colector solar..... | 92 |
| 4.3.3. Cálculo de la Eficiencia Térmica..... | 100 |
| CONCLUSIONES | 107 |
| RECOMENDACIONES..... | 109 |
| BIBLIOGRAFÍA | 110 |
| ANEXOS | 111 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 1. Radiación Solar del Perú – Centro de Estudios de la Energía Solar – CENSOLAR (Energía Solar en Megajules que como media, incide sobre cada metro cuadrado de superficie horizontal en un día – Valores medios de irradiación solar sobre suelo horizontal) | 29 |
| Tabla 2. Inclinaciones recomendadas. | 38 |
| Tabla 3. Cálculo del Volumen de agua en el tanque de almacenamiento..... | 64 |
| Tabla 4. Cálculo del Volumen de agua en el tanque de almacenamiento..... | 65 |
| Tabla 5. Datos experimentales tomados en el módulo experimental..... | 68 |
| Tabla 6. Datos experimentales tomados en el módulo experimental..... | 69 |
| Tabla 7. Cálculo del calor útil..... | 91 |
| Tabla 8. Cálculo de las irradiaciones solares sobre el colector solar de tubos al vacío. | 94 |
| Tabla 9. Cálculo de las eficiencias térmicas | 101 |

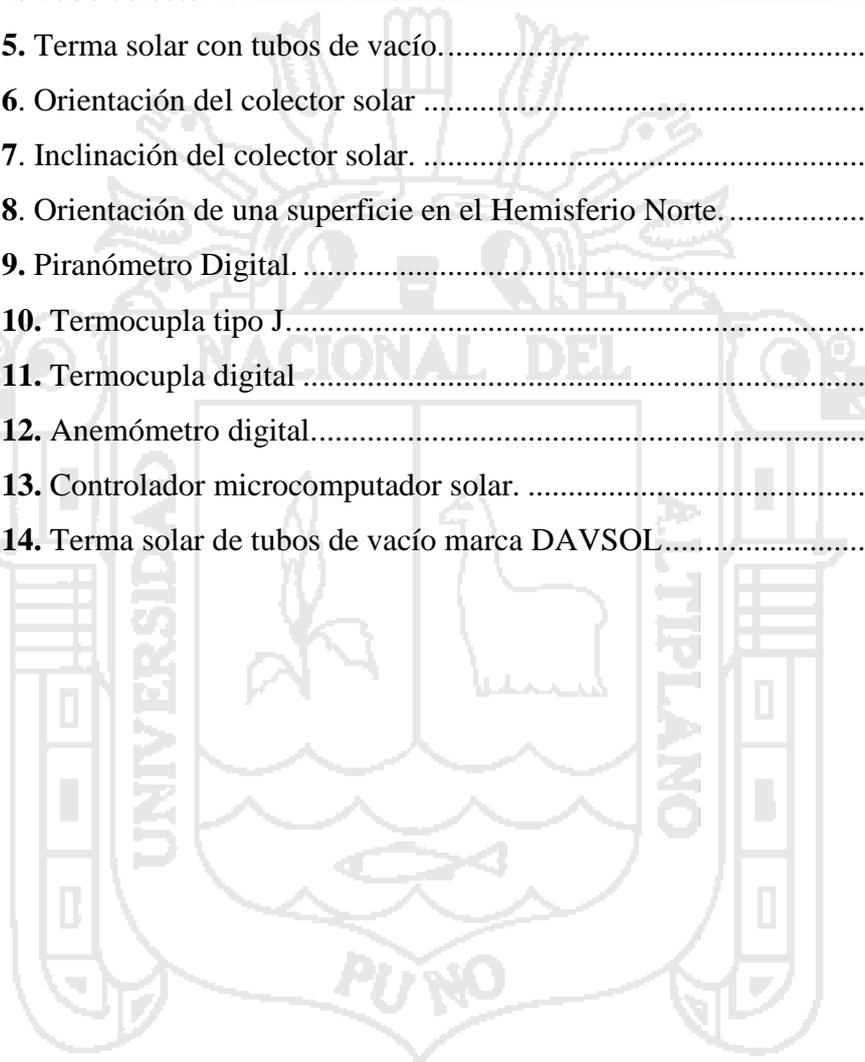


ÍNDICE DE GRÁFICOS

| | |
|--|-----|
| Gráfico 1. Temperatura ambiente en función del tiempo (horas del día)..... | 70 |
| Gráfico 2. Temperatura ambiente en función del tiempo (horas del día)..... | 71 |
| Gráfico 3. Temperatura ambiente en función del tiempo (horas del día)..... | 72 |
| Gráfico 4. Temperatura ambiente en función del tiempo (horas del día)..... | 73 |
| Gráfico 5. Temperatura ambiente en función del tiempo (horas del día)..... | 74 |
| Gráfico 6. Temperatura del agua a la entrada (T_{ent}) y Temperatura del agua en el tanque (T_{tanq}) en función del tiempo (horas del día)..... | 75 |
| Gráfico 7. Temperatura del agua a la entrada (T_{ent}) y Temperatura del agua en el tanque (T_{tanq}) en función del tiempo (horas del día)..... | 76 |
| Gráfico 8. Temperatura del agua a la entrada (T_{ent}) y Temperatura del agua en el tanque (T_{tanq}) en función del tiempo (horas del día)..... | 77 |
| Gráfico 9. Temperatura del agua a la entrada (T_{ent}) y Temperatura del agua en el tanque (T_{tanq}) en función del tiempo (horas del día)..... | 78 |
| Gráfico 10. Temperatura del agua a la entrada (T_{ent}) y Temperatura del agua en el tanque (T_{tanq}) en función del tiempo (horas del día)..... | 79 |
| Gráfico 11. Irradiancia solar en función del tiempo (horas del día)..... | 80 |
| Gráfico 12. Irradiancia solar en función del tiempo (horas del día)..... | 81 |
| Gráfico 13. Irradiancia solar en función del tiempo (horas del día)..... | 82 |
| Gráfico 14. Irradiancia solar en función del tiempo (horas del día)..... | 83 |
| Gráfico 15. Irradiancia solar en función del tiempo (horas del día)..... | 84 |
| Gráfico 16. Calor útil (Q_u) e Irradiación sobre el colector (I_c) en función del tiempo.. | 95 |
| Gráfico 17. Calor útil (Q_u) e Irradiación sobre el colector (I_c) en función del tiempo .. | 96 |
| Gráfico 18. Calor útil (Q_u) e Irradiación sobre el colector (I_c) en función del tiempo .. | 97 |
| Gráfico 19. Calor útil (Q_u) e Irradiación sobre el colector (I_c) en función del tiempo... | 98 |
| Gráfico 20. Calor útil (Q_u) e Irradiación sobre el colector (I_c) en función del tiempo .. | 99 |
| Gráfico 21. Eficiencia Térmica η_E (%) en función del tiempo (horas del día)..... | 102 |
| Gráfico 22. Eficiencia Térmica η_E (%) en función del tiempo (horas del día)..... | 103 |
| Gráfico 23. Eficiencia Térmica η_E (%) en función del tiempo (horas del día)..... | 104 |
| Gráfico 24. Eficiencia Térmica η_E (%) en función del tiempo (horas del día)..... | 105 |
| Gráfico 25. Eficiencia Térmica η_E (%) en función del tiempo (horas del día)..... | 106 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Espectro electromagnético de la radiación solar extra-atmosférico..... | 25 |
| Figura 2. Flujo de energía solar en un colector solar (tubos al vacío)..... | 27 |
| Figura 3. Diferentes mecanismos de transferencia de calor. | 30 |
| Figura 4. Tubo colector..... | 32 |
| Figura 5. Terma solar con tubos de vacío..... | 34 |
| Figura 6. Orientación del colector solar | 36 |
| Figura 7. Inclinación del colector solar. | 36 |
| Figura 8. Orientación de una superficie en el Hemisferio Norte..... | 37 |
| Figura 9. Piranómetro Digital..... | 41 |
| Figura 10. Termocupla tipo J..... | 41 |
| Figura 11. Termocupla digital | 42 |
| Figura 12. Anemómetro digital..... | 43 |
| Figura 13. Controlador microcomputador solar. | 43 |
| Figura 14. Terma solar de tubos de vacío marca DAVSOL..... | 50 |



ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo N° 01.....112



RESUMEN

La tesis titulada “Determinación de la eficiencia térmica de una terma solar de tubos al vacío”, fue desarrollado en la ciudad de Puno, los últimos días del mes de octubre del año 2015, el objetivo de la tesis es determinar la eficiencia térmica instantánea de una terma solar de tubos al vacío de flujo directo, la metodología emplea para determinar la eficiencia térmica instantánea está explicada concretamente a través de la siguiente expresión matemática que evalúa la cantidad de energía solar útil (Q_u) que es absorbida por el agua con respecto a la cantidad de energía solar que llega al colector solar de tubos al vacío ($I_{\mu} \cdot A_c \cdot \alpha_s$). Los resultados obtenidos de la eficiencia térmica promedio diaria de la terma solar marca “DAVSOL” de 6 tubos al vacío de flujo directo de fabricación china está en el rango de 66 - 74% con un promedio general diario de 69,98%, cuyas mediciones experimentales se realizaron de las 11:00 A.M. a las 14:30 P.M. del 23 al 27 de octubre del 2015. La conclusión más importante de la tesis es que la eficiencia térmica de la terma solar de tubos al vacío experimentada es en promedio 13,02% más eficiente con respecto a la eficiencia térmica de termas solares de colectores solares de placa plana (55,70%).

Palabras clave: Eficiencia térmica, irradiación solar, tubos al vacío, terma solar.

ABSTRACT

The project of thesis experimental titled "Determination of the thermal efficiency of a solar term of tubes to the hole", it was developed in the city of Puno, the last days of the month of October of the year 2015, the objective of the thesis is to determine the thermal instantaneous efficiency from a solar term of tubes to the hole of direct flow, the methodology uses to determine the thermal instantaneous efficiency it is explained concretely through the mathematical following expression that evaluates the quantity of solar useful (Q_{μ}) energy that is absorbed by the water with regard to the quantity of solar energy that arrives to the solar collector of tubes to the hole ($I_{\mu} \cdot A_c \cdot S \cdot \alpha$). The obtained results of the daily efficiency thermal average of the solar term mark "DAVSOL" from 6 tubes to the hole of direct flow of Chinese production it is in the range of 66 - 74% with a general daily average of 69,98% whose experimental mensurations were carried out of those 11:00 A.M. to those 14:30 P.M. of the 23 at October 27 of the one 2015. The most important conclusion in the thesis is that the thermal efficiency of the solar term of tubes to the experienced hole is on the average 13,02 more efficient% with regard to the thermal efficiency of solar thermal baths of solar collectors of flat (55,70%) badge.

Key words: Thermal efficiency, solar irradiation, tubes to the hole, solar term.

INTRODUCCION

En la ciudad de Arequipa existían más de 30 empresas que se dedicaban a la fabricación de termas solares con colectores de placa plana, ninguna de ellas proporcionaba datos técnicos sobre su eficiencia térmica como sucede actualmente con las empresas que fabrican termas solares con colectores de tubos al vacío; aspecto que motivó la realización de esta tesis de investigación denominada “Determinación de la eficiencia térmica de una terma solar de tubos al vacío en Puno”.

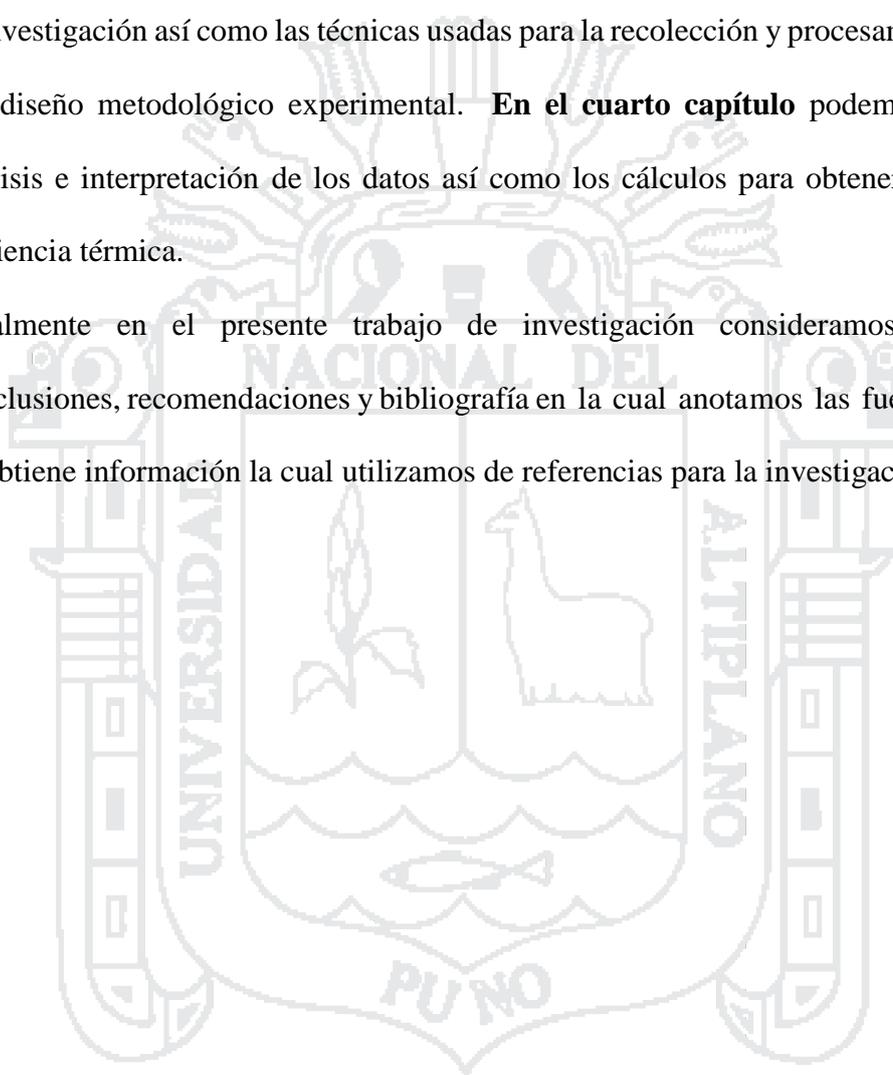
Los colectores de tubos al vacío, aparentemente son los más apropiados para climas desfavorables por tener como aislante térmico el vacío, sin embargo aún no se conoce su comportamiento térmico y eficiencia de estos colectores de tubos de vacío de manera que nos permita proponer su uso para zonas de altura. El comportamiento térmico de los tubos de vacío depende de la velocidad de calentamiento del fluido el cual se puede determinar analizando la evolución de la temperatura en un tanque acumulador. 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.

En el presente trabajo de investigación se realizó el montaje del módulo de ensayo para el desarrollo de la tesis, con los instrumentos; necesarios para realizar las mediciones respectivas.

Las pruebas fueron realizadas en los días del mes de octubre del año 2015, se diseñó algunos formatos que faciliten la lectura de las mediciones de los parámetros necesarios para determinar la eficiencia térmica de la terma solar de tubos de vacío.

En el primer capítulo describimos el problema de investigación así como los objetivos el cual describe a la perfección de lo que trata la investigación. **El segundo capítulo** contiene el sustento teórico de la investigación, la hipótesis a investigar así como la operacionalización de variables. **El tercer capítulo**, indica la metodología empleada para la investigación así como las técnicas usadas para la recolección y procesamiento de datos del diseño metodológico experimental. **En el cuarto capítulo** podemos observar el análisis e interpretación de los datos así como los cálculos para obtener finalmente la eficiencia térmica.

Finalmente en el presente trabajo de investigación consideramos también las conclusiones, recomendaciones y bibliografía en la cual anotamos las fuentes de donde se obtiene información la cual utilizamos de referencias para la investigación.





PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La energía que recibimos del sol es más que suficiente para cubrir toda la demanda energética mundial. En realidad la energía que recibimos es 9000 veces aproximadamente el actual consumo de energía en todo el mundo. Fuera de la atmósfera, la irradiación del sol tiene una intensidad de 1350 watt/m^2 . La atmósfera (nubes, polvo, vapor de agua) absorbe, refleja y dispersa la irradiación; en la tierra, la intensidad máxima es de aproximadamente 1000 watt/m^2 , pero en días muy despejados (aire seco, sin polvo ni nubes, atmósfera de Puno en días soleados) puede ser un poco más alta. La irradiación no se distribuye equitativamente sobre la superficie terrestre. En primer lugar, debido a la forma de la tierra, las zonas cercanas al ecuador reciben más energía solar que otras. En segundo lugar, debido a las diferencias en la humedad del aire, el despeje del cielo y la nubosidad, hay variaciones de país en país, aún si estos se encuentran en la misma latitud. Aún más, hay fluctuaciones originadas por la rotación de la tierra alrededor de su propio eje (fluctuación diaria) y alrededor del sol (fluctuación estacionaria). En días claros, la energía solar se distribuye a lo largo del día en una especie de distribución de Gauss (forma de campana).

Considerando la ecología y los problemas de cambios climáticos en el mundo; por culpa del hombre, hoy en día, solo cerca del 40% de los continentes están cubiertos de bosques y solo un 7% de ellos constituyen bosques tropicales (selva). A nivel global los bosques tropicales constituyen la única defensa natural ante el peligro latente de erosión y desertificación; siendo a su vez un importante elemento regulador del clima a nivel mundial (aspecto fundamental en la coyuntura actual del mundo) y la base existencial de un cuarto de la población mundial.

El gobierno del Perú en los últimos años ha considerado este problema en su política energética, dando mayor importancia a la generación y utilización de las energías no convencionales en zonas rurales donde, por el costo económico no hay líneas de transmisión de electricidad, lo cual es fundamental para elevar el nivel socioeconómico de estas comunidades.

En este contexto y considerando que es una línea de investigación de la Escuela Profesional la energía solar, por las ventajas competitivas naturales y técnicas que se tiene con respecto a otras regiones del país, a saber, Arequipa, Cajamarca y Puno son los departamentos con mayor irradiación solar y, en la región del sur del Perú, se han desarrollado empresas que investigan tecnologías sobre el calentamiento del agua utilizando la energía solar. Actualmente China a revolucionado el aspecto de las termas solares, con el desarrollo e invención de los tubos al vacío, tecnología que a desplazado a los colectores planos de captación de la irradiación solar, por haber elevado la eficiencia en aproximadamente 25%; en ese sentido hemos aplicado los conocimientos de la ingeniería mecánica eléctrica para determinar experimentalmente la eficiencia de una terma solar que se compró en el mercado comercial de Puno, considerando las condiciones climáticas particulares de nuestra ciudad. Un aspecto limitante fueron las limitaciones de investigación en nuestra universidad, como el no contar con laboratorios, módulos de experimentación ni instrumentos para la medición de parámetros concernientes a la energía solar, importantes para la investigación, las cuales fueron suplidos con inteligencia para la ejecución óptima de nuestra tesis de investigación.

1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La tesis de investigación que se realizó se justifica porque:

En la coyuntura mundial de cambio climático, la elevación de la temperatura de la atmósfera se debe principalmente al uso indiscriminado de las energías convencionales (petróleo, árboles, etc.); para atenuar este problema se debe dar énfasis a la utilización de energías renovables como la energía solar, recursos considerables en el Perú que no tienen utilización actual significativa, la radiación solar promedio es estimada en 5 Kwh/m² por día; considerando que el proyecto desarrollado está en la línea de investigación de la Escuela Profesional y su desarrollo se justifica por las ventajas competitivas que tiene Puno, al ser uno de los tres departamentos con mayor radiación solar en el Perú y por este aspectos se debe motivar el desarrollo de la industria solar con un nivel competitivo desde el punto de vista de la ingeniería.

La ejecución de nuestra tesis se justifica ampliamente porque en el mercado del sur del país e incluso a nivel nacional, las diferentes marcas de termas solares de tubos al vacío (e incluso las termas de colectores planos) que se ofertan, ninguna especifica en sus características técnicas, su eficiencia térmica a determinadas condiciones ambientales.

A través del desarrollo de la tesis se desarrolló una metodología de determinación experimental de la eficiencia térmica de una terma solar a tubos al vacío, lo que puede ser utilizada por otros investigadores y experimentada en los laboratorios del curso de energías no convencionales para que sea un paso importante en la iniciación de la investigación de alumnos y docentes, aspecto importante en el proceso actual de acreditación de nuestra universidad.

Los resultados obtenidos en la tesis pueden servir para que la universidad se proyecte a la sociedad, ofertando a las diferentes marcas de termas solares el servicio de la determinación experimental de la eficiencia térmica de sus termas a través de convenios de investigación financiados por las industrias de la región.

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar la eficiencia térmica de una terma solar de tubos al vacío en Puno.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar una metodología experimental para la determinación de la eficiencia térmica de una terma solar de tubos al vacío en Puno.
- Cuantificar experimentalmente la eficiencia térmica de una terma solar de tubos al vacío en Puno.



MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES DE INVESTIGACIÓN

Respecto al problema de investigación que se desarrolló en la Tesis, en las bibliotecas de la Universidad e Instituciones de la región de Puno, no se tienen antecedentes específicos sobre la determinación experimental de la eficiencia térmica de una terma solar de tubos al vacío. Se mencionan los antecedentes siguientes que sirvieron de marco referencial para el desarrollo de la tesis:

1. Orbezo C. – Schulte B. – Hoogenstrijd G.; Calentamiento de agua mediante el uso de termas solares, Amsterdam/Lima 1997, manual elaborado por ingenieros del SENATI, CENERGÍA y TOOLCONSULT; para un programa de entrenamiento teórico gracias al aporte económico de la Fundación Hulsebosch Prior, Holanda; cuyo objetivo del programa es capacitación en las aplicaciones de la energía solar, fuentes de energía solar, ¿Cómo opera una terma solar? y; el aspecto relacionado al tema de la tesis, que en las páginas 43-49 desarrolla la eficiencia de una terma solar, cuya conclusión principal es que, la eficiencia depende de cuánta de la energía suministrada por el sol se convierte en energía útil:

$$\text{Eficiencia (\%)} = \frac{\text{Energía útil (Q}_u\text{)} \times 100}{\text{Energía Suministrada (Q}_{\text{sum}}\text{)}}$$

La energía suministrada a las termas solares es la irradiación solar que cae sobre la superficie del colector. La energía útil es la energía sustraída de la terma solar en forma de agua caliente.

2. Polo Bravo Carlos – Torres Moro, Hugo; Métodos experimentales para la evaluación de colectores y termas solares, 2003, Centro de Energías Renovables

de Tacna, el estudio se centra en el estudio de la eficiencia de un colector de placa plana, diseño que ha sido desplazado por las termas solares de tubos al vacío. Experimentalmente se ha evaluado un colector solar fabricado por la ex-empresa TECNOSOL, de un área total de $1,10 \text{ m}^2$, con doble cobertor de vidrio semidoble (3 mm) revestimiento de la placa absorbente con pintura negro mate, dicho colector viene funcionando en la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann de Tacna bajo condiciones reales desde 1993.

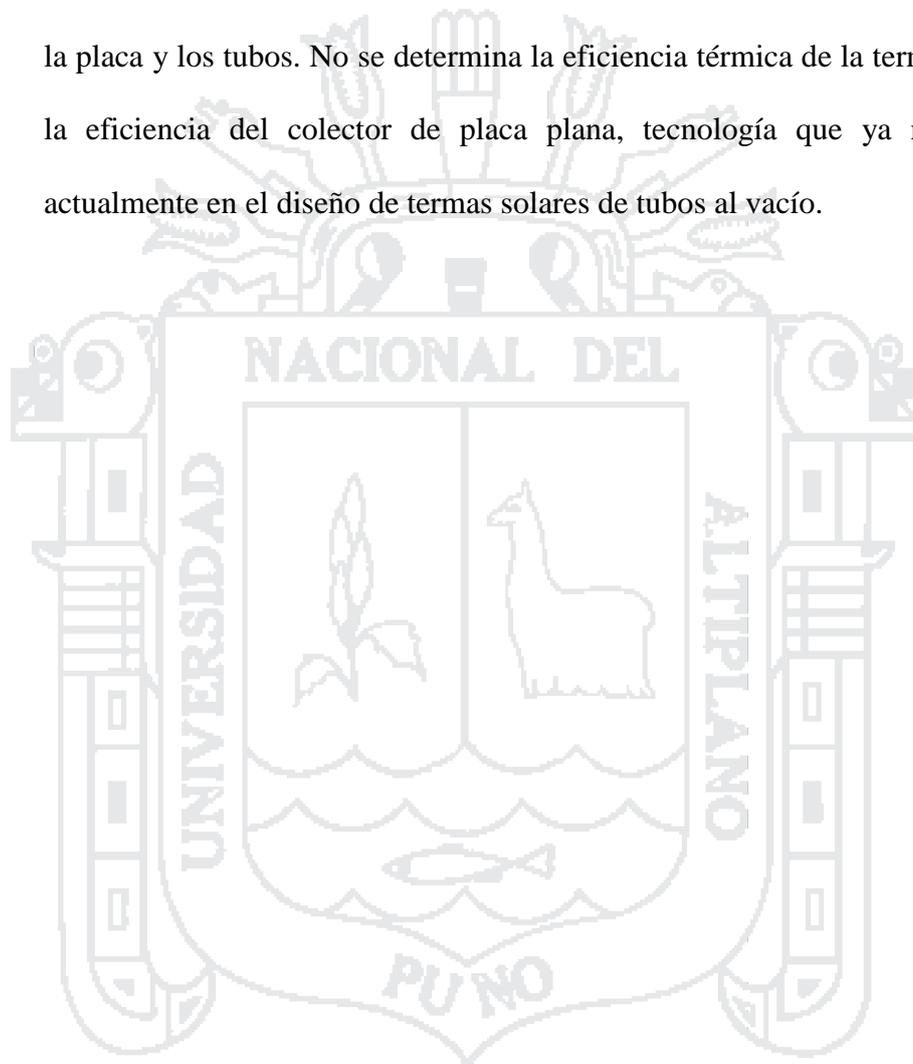
Las conclusiones de la investigación indican que los colectores solares son de buena calidad térmica, para el caso de la evaluación realizada al colector solar fabricado por la ex-empresa TECNOSOL, se ha encontrado que dicho coeficiente es de $4,5 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$. Y que gran parte de nuestro país, cuenta con un buen recurso energético solar promedio anual, que lo convierte en una zona para un uso masivo de los sistemas termosolares en general; no se determina la eficiencia térmica de la terma solar, solo se evalúa la capacidad que tiene el colector plano para absorber la irradiación solar en Tacna.

3. Montoya Portugal Luis –Cabana Hanco Wilson – Sonia Guia Lourdes: Evaluación de un calentador solar de agua, 2011, Investigación presentada al XVIII Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente, del 14 al 19 de Noviembre del 2011, Lima.

En el trabajo se hace una evaluación de un tipo de calentador solar comercializado en la región Arequipa, el calentador tiene el colector de placa plana con la unidad de almacenamiento de agua integrado, la evaluación se realiza en un banco de pruebas de colectores solares, construido en la Escuela Profesional de Física de la Universidad Nacional de San Agustín, de Arequipa, con ayuda de

la Cooperación Alemana en el marco del Acuerdo de Cooperación – Energiezing Development – Endev Perú.

En las conclusiones se especifica que en el colector de placa plana evaluada se ha obtenido una eficiencia de 60,4% con un deficiente contacto térmico entre la placa y los tubos. No se determina la eficiencia térmica de la terma solar, solo la eficiencia del colector de placa plana, tecnología que ya no se utiliza actualmente en el diseño de termas solares de tubos al vacío.



2.2 SUSTENTO TEÓRICO

2.2.1 Energía Solar ¿Por qué?

La energía que es consumida cotidianamente en el mundo civilizado es la que se denomina energía convencional (hidroeléctrica, petróleo, gas, carbono), la misma que o es limitada regionalmente o es agotable. La energía solar, siendo una fuente inagotable y disponible, se presenta como alternativa para reemplazar a las convencionales. En el Perú, a cada metro cuadrado de superficie horizontal llega cada día cerca de 5 Kwh de energía solar; por tanto no existe problema en la disponibilidad de esta energía. Comparando este valor con otras formas de energía.

2.2.2 Tecnologías Solares existentes

Las tecnologías para la transformación de energía solar más desarrolladas son:

- a) Conversión foto térmica, transforma energía solar en calor útil, es la técnica más simple y difundida; consiste en colectores solares que absorben la radiación solar en una superficie negra.

El calor solar útil extraído representa el 30-80% de la energía solar disponible.

Esta tecnología es usada en los secadores y termas solares.

- b) Conversión fotovoltaica, transforma directamente la radiación solar en electricidad con dispositivos llamados paneles solares, compuesto de celdas solares semiconductoras, cuya fabricación requiere tecnología avanzada.

Actualmente un panel solar transforma alrededor del 15% de la radiación solar en electricidad y su precio es de 5 – 10 dólares por cada watt eléctrico (bajo iluminación de pleno sol).

2.2.3 Radiación Solar

La radiación solar es un tipo de energía que se propaga a través del espacio, a la velocidad de la luz y en forma de ondas electromagnéticas; dicha radiación se distribuye sobre un rango de longitudes de onda a la que se le reconoce como espectro de radiación electromagnética. Dentro del espectro, la radiación solar que llega a la superficie de la tierra está ubicada en el rango de longitud de onda comprendido entre 0,39 a 3,0 μm (Figura 1).

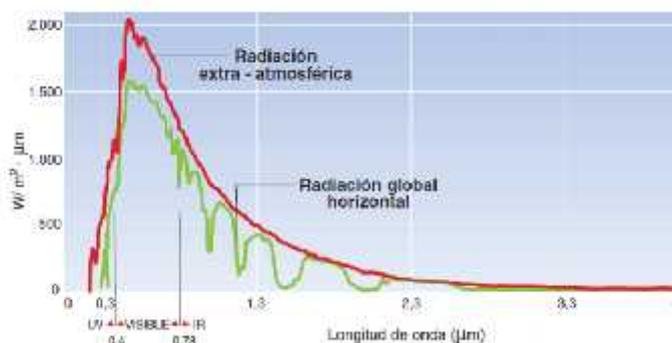


Figura 1. Espectro electromagnético de la radiación solar extra-atmosférica

Fuente: Gonzalo, L. (2016). Modulos fotovoltaicos. [Figura]. Recuperado de <http://slideplayer.es/slide/10187144/>

La parte del espectro que va de 0,40 μm a 0,78 μm forma el espectro visible que denominamos comúnmente luz. El resto del espectro, que no es visible, lo forman las radiaciones con longitudes de onda inferiores a 0,4 μm denominados radiaciones ultravioletas (UV) y con longitudes superiores a 0,75 μm denominados radiaciones infrarrojas (IR). Ver figura 1.

2.2.3.1 Componentes de la radiación solar

No toda la radiación solar que incide sobre la atmósfera llega hasta la superficie del planeta tierra; los rayos solares al entrar en contacto y atravesar

el obstáculo que supone la atmósfera, sufren una serie de fenómenos físicos entre los que se destacan los siguientes:

- I. **Reflexión.** Una parte de la radiación se refleja en la parte superior de las nubes (como en un espejo).
- II. **Difusión.** Los rayos solares chocan con las moléculas gaseosas y partículas de polo difundiéndose en todas direcciones, de forma que una parte vuelve al espacio.
- III. **Absorción.** Una parte de la radiación es absorbida por las moléculas presentes en la atmósfera.

Debido a los anteriores fenómenos físicos, un objeto situado en la superficie terrestre recibirá los siguientes tipos de radiación (ver figura 2).

- a) **Radiación directa.** Aquellos rayos que alcanzan la superficie terrestre sin ser desviados. Esta radiación en días nublados es muy pequeña y provoca sombras.
- b) **Radiación difusa.** La que llega a la superficie terrestre después de haber cambiado varias veces de dirección al atravesar la atmósfera. A mayor nubosidad más importante es la radiación difusa.
- c) **Radiación reflejada.** La parte de radiación reflejada por el terreno y otros elementos de la superficie terrestre y que puede ser reabsorbida por otros objetos. Al cociente entre la radiación reflejada y la incidente en la superficie terrestre se le llama albedo. A la suma de los tres tipos de radiación recibida se le llama radiación total. A lo largo del año la

radiación difusa supone aproximadamente un tercio de la radiación total que llega a la superficie terrestre.

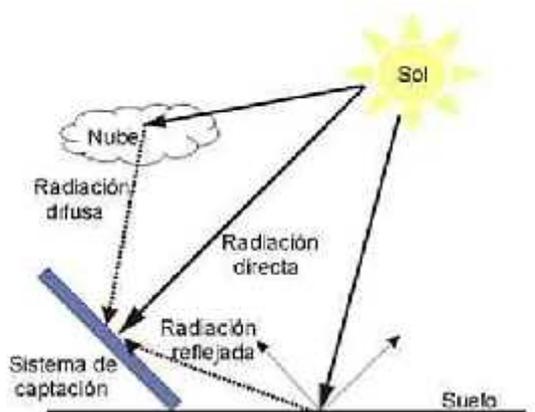


Figura 2. Flujo de energía solar en un colector solar (tubos al vacío).

Fuente: Hernandez, P. (2016). Radiación. [Figura]. Recuperado de <https://pedrojhernandez.com/2014/03/08/radiacion-directa-difusa-y-reflejada/>

2.2.3.2 Radiación Solar en el Perú

En el Perú, la irradiación solar promedio es una de las más altas en todo el mundo, comparado con Holanda, el Perú recibe el doble de energía solar. La fluctuación por estaciones en el Perú es mucho menor que la de las regiones nórdicas. En Holanda por ejemplo, la radiación promedio en invierno puede llegar a índices tan bajos como $0,5 \text{ Kwh/m}^2/\text{día}$, mientras que en el verano alcanza los $5 \text{ Kwh/m}^2/\text{día}$ (como en el Perú)

| | LAT | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
|------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| ABANCAY | -13.6 | 19.5 | 17.6 | 18.1 | 17.8 | 17 | 16.4 | 17.3 | 18.4 | 18.3 | 21.1 | 21.5 | 19.2 |
| ANGOSTURA | -15.1 | 19.7 | 17.7 | 17.6 | 17.9 | 17.4 | 17.2 | 17.6 | 19.3 | 19.5 | 21.8 | 22.1 | 20.3 |
| ATACOCHA | -10.5 | 17.2 | 16 | 17.1 | 18.3 | 18 | 17,8 | 18.4 | 19 | 17.8 | 19.9 | 19.6 | 18.4 |
| BAMBAMARCA | -6.6 | 17.1 | 16.8 | 17.6 | 16.7 | 16.9 | 16.4 | 17.8 | 18.4 | 18.6 | 18.6 | 19.9 | 19.4 |
| CAJAMARCA | -7.1 | 16.4 | 17.6 | 15.3 | 16 | 16.5 | 15.4 | 16 | 18.3 | 17 | 17.1 | 18.4 | 18.3 |
| CALAÑA | -17.9 | 23.2 | 22.3 | 20.6 | 18.4 | 15.6 | 14.5 | 14.8 | 16.9 | 19 | 23 | 23.2 | 23.1 |
| CAMPO DE MARTE | -12 | 17.8 | 20.1 | 18.6 | 19.4 | 14.6 | 10.4 | 9.2 | 10.2 | 12.8 | 12.6 | 19 | 18.3 |
| CAPACHICA | -15.6 | 19.7 | 19.6 | 18.7 | 19.1 | 17.6 | 17.4 | 18.1 | 19.6 | 20.8 | 22.2 | 22.6 | 20.3 |
| CAÑETE | -13.1 | 18.7 | 18.7 | 18.5 | 17.9 | 14.1 | 10.7 | 10.5 | 11.4 | 12.8 | 15.3 | 17.1 | 18.8 |
| CARTAVIO | -7.9 | 19.9 | 19.6 | 19.8 | 18 | 17.6 | 14.6 | 14.9 | 14.7 | 16.2 | 18.2 | 20.4 | 20.4 |
| CASA GRANDE | -7.7 | 19.4 | 19.2 | 19.4 | 18 | 18.7 | 14.1 | 14.6 | 15.4 | 15.9 | 17.9 | 18.5 | 19.9 |
| CAYLLOMA | -15.1 | 20 | 17.7 | 17.2 | 17.5 | 17.1 | 17.2 | 17.9 | 19.6 | 19.1 | 21.8 | 22.1 | 21.1 |
| CAYALTI | -6.8 | 19.3 | 20.9 | 19.8 | 19.4 | 18.9 | 16 | 17 | 18.3 | 18.8 | 20.8 | 21.1 | 21.7 |
| CHARACATO | -16.4 | 22.1 | 19.2 | 20 | 19.8 | 18.8 | 17.3 | 18.7 | 20.3 | 22 | 24.9 | 25.4 | 23.7 |
| CONOCOCHA | -10.1 | 17.5 | 15.6 | 16 | 17 | 17.2 | 17.6 | 18.6 | 19.5 | 18.9 | 17.6 | 19.9 | 18.3 |
| CUENCA RIO VERDE | -15.4 | 19.7 | 17.3 | 18 | 18.5 | 17.6 | 17.4 | 17.9 | 19.3 | 19.5 | 21.4 | 21.3 | 19.9 |
| CUZCO | -13.5 | 18.7 | 16.9 | 17.7 | 18.1 | 17.3 | 17.2 | 18.2 | 18.4 | 18.6 | 20.3 | 20.7 | 18.8 |
| DESAGUADERO | -16.6 | 20.6 | 20 | 20.1 | 19.9 | 17.7 | 16.8 | 17.3 | 19.4 | 19.7 | 22.2 | 21.8 | 20.4 |
| DON MARTIN | -11 | 19.2 | 18.2 | 18.2 | 17.5 | 14.4 | 11.7 | 12.1 | 12.9 | 14.3 | 15.7 | 18.1 | 19.6 |
| EL FRAILE | -16.1 | 19.4 | 15.8 | 16.1 | 16.4 | 17.1 | 16.8 | 17.3 | 18.8 | 20.4 | 21.8 | 21.4 | 20.4 |
| FUNDO IBERIA | -11.3 | 17.3 | 16.8 | 16.7 | 15.5 | 15.3 | 15.5 | 16.9 | 18.9 | 18.1 | 18 | 18.2 | 16.6 |
| GRANJA M SASSAPE | -6.5 | 20.7 | 20.9 | 22.4 | 22.6 | 21 | 18 | 17.5 | 19.1 | 20.9 | 21.6 | 21.4 | 21.2 |
| GUAYABAMBA | -3.7 | 16 | 15.2 | 15.3 | 15.7 | 15.4 | 14.9 | 15.7 | 16.7 | 18.1 | 19.2 | 17.2 | 18.8 |
| HACIENDA MAJORO | -14.8 | 20 | 20.6 | 20.9 | 18.2 | 18.1 | 15.4 | 16.3 | 18.2 | 20.9 | 23.7 | 22.9 | 21.4 |
| HACIENDITA | -17 | 23.1 | 20.1 | 21.3 | 19.2 | 15.8 | 14.6 | 14.2 | 16.2 | 17.2 | 21.9 | 23.1 | 20 |
| HUARAZ | -9.5 | 18.2 | 17.4 | 18.3 | 18.4 | 18.9 | 18.4 | 19.4 | 20.6 | 19.7 | 19 | 20.6 | 19.8 |
| HUANCAYO | -12.1 | 22.7 | 20.9 | 20.6 | 20.1 | 20 | 20 | 20.3 | 21.4 | 22.1 | 23.1 | 24.5 | 22.7 |
| HUANUCO | -9.9 | 16.8 | 16.3 | 16.7 | 16.7 | 17.2 | 16.5 | 17.3 | 18.5 | 17.5 | 18.3 | 19.2 | 17.6 |
| HURAYA-MOHO | -15.3 | 18.9 | 16.9 | 18 | 19.1 | 17.4 | 17.4 | 18.5 | 20 | 20.5 | 21.1 | 21.7 | 19.1 |
| ICA | -14 | 21.1 | 18 | 19.5 | 18.4 | 17.2 | 20.7 | 15 | 17.3 | 18.9 | 22.2 | 23.2 | 22.1 |
| IMATA | -15.8 | 18.9 | 17.3 | 17.2 | 17.8 | 17.3 | 17 | 18 | 19.2 | 19.1 | 21.1 | 21.4 | 19.9 |
| JULI | -16.2 | 19.8 | 17.3 | 16.1 | 18.9 | 18.4 | 17.2 | 17.9 | 17.9 | 19.7 | 21.8 | 21.8 | 19.2 |
| KAYRA | -13.5 | 18 | 16.1 | 16.6 | 17.5 | 16.7 | 17.2 | 17.6 | 18.1 | 18.3 | 19.2 | 20 | 17.6 |
| LAGUNILLAS | -15.5 | 20.4 | 18.8 | 18.4 | 18.1 | 16.8 | 16.3 | 17.6 | 19.9 | 20.1 | 22.6 | 23 | 20.7 |
| LAMBAYEQUE | -6.7 | 18.6 | 20.2 | 19.8 | 19.1 | 18.3 | 16.7 | 15.8 | 17 | 18.1 | 19.7 | 20.3 | 20.9 |

| | LAT | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
|----------------|-------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| LA. MOLINA | -12 | 18.1 | 18.6 | 18.9 | 18 | 14.3 | 12 | 11.9 | 12.8 | 13.5 | 15.7 | 17.4 | 18.3 |
| LAMPAS ALTO | -10 | 17.2 | 14.8 | 16.4 | 16.4 | 17.2 | 17 | 18.9 | 19.5 | 18.9 | 16.8 | 19.6 | 17.9 |
| LAMPAS BAJO | -10 | 17.5 | 16 | 16.4 | 16.7 | 17.3 | 17.7 | 19.3 | 19.5 | 15.1 | 17.9 | 20.3 | 19.9 |
| LA PUNTA | -12 | 16.2 | 18.3 | 17.8 | 17 | 14 | 10.6 | 10.4 | 10.8 | 11.4 | 13 | 15.4 | 17.5 |
| LA SALLE | -16.4 | 22.1 | 19.2 | 20.1 | 19.2 | 18.8 | 17 | 18.4 | 20.3 | 21.4 | 23.7 | 25.4 | 23.7 |
| LLAUCAN | -6.6 | 16.7 | 17.6 | 16.4 | 14.7 | 14.9 | 16.1 | 15.8 | 17 | 18.1 | 19 | 19.9 | 20.5 |
| LOS CEDROS | -3.1 | 17.2 | 19.4 | 19.6 | 18.9 | 19 | 16.3 | 16.6 | 16.8 | 15.8 | 16.5 | 17.5 | 19.4 |
| MOQUEGUA | -17.2 | 27.6 | 18.7 | 21.2 | 21.3 | 18.5 | 17.7 | 18 | 20.7 | 23.4 | 25.3 | 26.4 | 26.2 |
| NESHUYA | -8.6 | 17.3 | 17 | 14.9 | 13.5 | 13.6 | 12.7 | 15.4 | 18.1 | 18.6 | 18.3 | 18.6 | 20.4 |
| PAMPA BLANCA | -17.1 | 19 | 17.1 | 18.7 | 17.2 | 13.2 | 11.2 | 12.3 | 12.3 | 11.8 | 15.9 | 17.5 | 18.4 |
| PAMPA DE MAJES | -16.3 | 23.7 | 21.5 | 21.9 | 20.5 | 18.8 | 17.5 | 19.3 | 20.9 | 22.4 | 25.3 | 26.3 | 24.9 |
| PANE | -15.4 | 18.1 | 16.9 | 16.5 | 16.8 | 15.6 | 16.6 | 16.7 | 17.4 | 17.4 | 18.8 | 20.6 | 19.1 |
| PUNO | -15.8 | 20.5 | 18.8 | 19 | 19 | 17.9 | 17.2 | 18 | 20.2 | 20.8 | 23 | 23.8 | 20.4 |
| PUNTA DE COLES | -17.6 | 24 | 22.9 | 23.8 | 18.7 | 14.9 | 11.7 | 10.8 | 13.2 | 12.3 | 16.5 | 22.9 | 22.6 |
| QUEROCOCHA | -9.6 | 15.6 | 15.2 | 16.4 | 17.4 | 17 | 16.6 | 18 | 18.9 | 18.6 | 16.8 | 19.1 | 16.7 |
| QUILLABAMBA | -12.8 | 16 | 15.6 | 17 | 15.3 | 15.6 | 15.2 | 16 | 16 | 16.2 | 17.6 | 17.9 | 16.4 |
| SALCEDO | -15.3 | 19.7 | 18.4 | 18.4 | 18.5 | 17.4 | 16.6 | 17.6 | 19 | 19.8 | 22.2 | 22.9 | 20.3 |
| SAN JACINTO | -9.1 | 18.2 | 15.6 | 18.6 | 17.8 | 17.1 | 14.4 | 15.6 | 16.2 | 17.9 | 20.6 | 21 | 21 |
| SAN JORGE | -8.5 | 17.3 | 16.6 | 16.8 | 16.2 | 15.9 | 15.7 | 17.7 | 19.4 | 18 | 18.7 | 16.3 | 16.6 |
| SAN LORENZO | -9.7 | 17.5 | 16 | 16.4 | 17.7 | 17 | 17.1 | 19 | 19.5 | 19.3 | 18.7 | 20.7 | 18.7 |
| SAN RAMÓN | -11.1 | 16.2 | 15.6 | 16 | 16.2 | 16.3 | 15.3 | 16.7 | 16.9 | 17 | 18.7 | 18.5 | 18.5 |
| SI BAYO | -15.4 | 19.3 | 16.9 | 16.9 | 17.8 | 17.3 | 17.1 | 17.6 | 18 | 18.8 | 21.1 | 21.4 | 19.9 |
| TABLAZO | -5.3 | 15.1 | 19 | 20.2 | 18.6 | 19.2 | 16.7 | 17.4 | 19.6 | 20.3 | 21.2 | 20.8 | 22.1 |
| TARAPOTO | -6.5 | 17.1 | 16.8 | 15.7 | 15.4 | 15 | 14.6 | 16.5 | 17.4 | 17 | 17 | 17.6 | 17.4 |
| TEJEDORES | -4.7 | 16.1 | 17.1 | 18.31 | 17.3 | 19 | 17.5 | 18.2 | 19.4 | 20.3 | 20.7 | 20.8 | 20.1 |
| TINAJONES | -6.6 | 19.6 | 20.2 | 19.4 | 20.1 | 20.6 | 18.2 | 20.7 | 21.1 | 21.6 | 22.4 | 23.4 | 23.9 |
| TUNELCERO | -13.1 | 17.9 | 16.8 | 18.5 | 17.9 | 16.8 | 17.3 | 18.3 | 19.5 | 19 | 21.1 | 21.5 | 19.6 |
| YURAC | -9 | 15.5 | 14.4 | 14.9 | 14.8 | 14.2 | 13.2 | 15 | 17 | 16.9 | 16.8 | 16.7 | 15.5 |
| ZORRITOS | -3.6 | 18.1 | 19.9 | 18.3 | 19.5 | 18.9 | 18.4 | 17.1 | 15.3 | 16.4 | 18.4 | 19.5 | 19.2 |

Tabla 1. Radiación Solar del Perú.

Fuente: Centro de Estudios de la Energía Solar – CENSOLAR. (2016), Energía Solar en Megajules que como media, incide sobre cada metro cuadrado de superficie horizontal en un día – Valores medios de irradiación solar sobre suelo horizontal)

2.2.4 Terma Solar

2.2.4.1 Principio de Funcionamiento

La energía solar Térmica aprovecha la componente directa y difusa de la radiación total (ver Figura 2). La conversión de energía radiante en calor, se realiza por los mecanismos de conducción, convección y radiación.



Figura 3. Diferentes mecanismos de transferencia de calor.

Fuente: Pianist, A. (2011). Métodos de transferencia de calor. [Figura]. Recuperado de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:M%C3%A9todos_de_transferencia_de_calor.svg

El calor se puede transferir en tres modos diferentes: conducción, convección y radiación. Hay que tener en cuenta que para que haya transferencia de calor de un medio a otro es necesario que uno de estos esté a mayor temperatura que el otro, ya que esto sucede de un medio con la temperatura más alta hacia uno con la temperatura menor.

La transferencia de calor por conducción se produce desde una región que está a una temperatura alta hasta otra que está a una temperatura inferior en el mismo medio o entre diferentes medios que se encuentran en contacto. Si la transferencia de calor se produce por el desplazamiento de materia entre regiones con diferentes temperaturas, entonces se trata de convección. La convección se produce únicamente

en materiales fluidos (líquido como el agua o gas como el aire). Al hablar de radiación, hacemos referencia al flujo de calor entre dos cuerpos que están a distintas temperaturas, sin que en este caso se requiere ningún medio material. Ver figura 4.

La radiación solar que llega a un colector de tubos al vacío lo hace sobre la superficie de los tubos. Una parte será reflejada, volviendo al exterior y otra penetra la superficie hacia el agua.

2.2.4.2 Captador solar de baja temperatura

Son aquellos en los que el fluido no alcanza el punto de ebullición. Las aplicaciones más utilizadas para el calentamiento de agua entran en esa gama de temperaturas. Son las instalaciones en las que se obtiene agua caliente sanitaria para uso doméstico o de climatización.

El captador o tubo al vacío, consiste en una superficie cilíndrica que absorbe el calor directo y lo transmiten a un fluido de trabajo y lo acumulan en un tanque con aislamiento para después ser aprovechado, su temperatura de trabajo está entre $<100^{\circ}\text{C}$. Son sistemas económicos y sencillos de instalar, no requieren muchos componentes y su mantenimiento es sencillo. Su uso es más doméstico.

2.2.4.3 Componentes de una terma solar de tubos de vacío con flujo directo

Tres son los componentes básicos en una terma solar:

I. Colector

El colector utiliza tubos de vidrio al vacío fabricado 100% en cristal de boro silicato¹, no utiliza materiales conductores, los costos son mucho más baratos, que

¹ Es un material que se emplea para la elaboración de envases de laboratorio e instrumentos ópticos por sus buenas propiedades ópticas y mecánicas con muy baja dilatación térmica.

en caso de rotura o mantenimiento, solo hay que cambiar un tubo y no todo el panel, los tubos de vacío fueron diseñados por primera vez por la universidad Qing Hua en Beijing en la década de los ochenta, con una construcción de prueba en 1985.

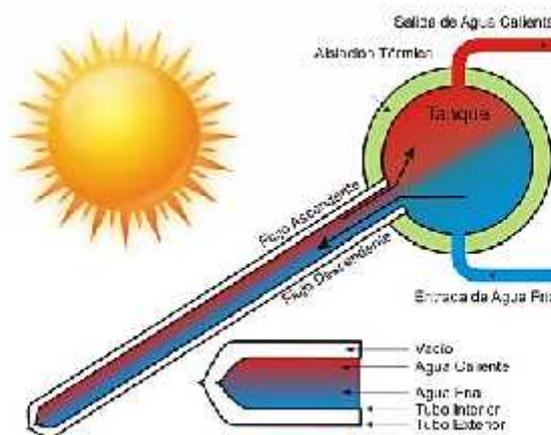


Figura 4. Tubo colector.

Fuente: BLUEMARKET. (2016). Termosifón. [Figura]. Recuperado de <http://www.bluemarket.es/wp-content/uploads/2015/12/termosifon.jpg>

II. Tanque de almacenamiento

Es el recipiente de almacenamiento del fluido, está compuesta de un tanque de acero inoxidable, encima una capa de material aislante (poliuretano) protegido con una lámina de acero pintada para protegerlo de la corrosión y prevenir el deterioro del aislante.

III. Sistema de distribución

El sistema son todas las tuberías, sistemas de control, llaves de paso y accesorios con las que cuenta la entrada y salida de la terma solar.

2.2.4.4 Principio de funcionamiento de la terma solar con tubos de vacío

El calentamiento de agua mediante la utilización de calentadores solares de tubos

Composición química: 80.4% Sílice (SiO_2) – 2.4% alúmina (Al_2O_3) – 13% anhídrido bórico (B_2O_3) – 3,9% Hidróxido sódico (Na_2O).

de vacío, es una tecnología que ha sido utilizada desde hace años atrás por países como la China y Alemania que son los pioneros en lo que respecta al uso de tubos de vacío para el calentamiento de agua sanitaria, posteriormente se amplió su uso a todo el mundo, los calentadores solares de tubos de vacío pueden alcanzar temperaturas hasta 60°C, con una eficiencia superior al 70% es por ello que es considerado como una de las mejores opciones para el calentamiento de agua sanitaria.

Los calentadores solares de tubo de vacío de baja presión atrapan la energía que emite el sol en forma de ondas electromagnéticas y la transfieren al agua, la misma que se encuentra circulando por los tubos de vidrio, por conducción térmica, los captadores en su mayoría son de color oscuro o coloreados con pinturas como el cromo negro; la función principal de los captadores solares de baja presión es absorber la radiación que producen el sol, aprovechándola al máximo y evitando que sea conducida o reflejada por fuera del sistema. Por eso cada uno de los tubos colectores tiene en su interior una cámara de vacío que permite que solo pase la radiación, se evita la conducción y la convección térmica al exterior.

Como se ha demostrado el agua a mayor temperatura disminuye su densidad y por el fenómeno termosifón esta sube y se deposita en el tanque de almacenamiento mientras que el agua fría más densa se precipita en el fondo, luego esta agua fría absorbe el calor del captador y el ciclo se repite.



Figura 5. Terma solar con tubos de vacío
Fuente: Foto tomada en el C.P SALCEDO PUNO.

2.2.5 Efectos de la orientación de la superficie receptora del sol

El objetivo de cualquier instalación solar es el de captar la máxima radiación solar. En este sentido la inclinación y orientación del colector solar, así como las posibles sombras que se pueden proyectar sobre los paneles, son factores clave que determinarán el correcto funcionamiento de la instalación solar.

2.2.5.1 Orientación del colector solar

Hay que situar la superficie del colector solar de tubos de vacío de manera que reciba la mayor cantidad posible de energía solar y esto depende de:

- La orientación de la superficie del colector solar.
- El tiempo que se va a usar a lo largo del año: anual, estacional, etc.

- La aplicación que va a tener. Residencial, industrial, etc.

La orientación de un colector solar se define también mediante coordenadas angulares, similares a las utilizadas para definir la posición del sol.

2.2.5.2 Ángulo de azimut (τ)

Es el ángulo que forma la proyección con el sur sobre el plano horizontal de la perpendicular a la superficie del colector y la dirección sur. Vale 0° si coincide con la orientación sur, es positivo hacia el Oeste y negativo hacia el Este. Si coincide con el Este su valor es -90° y si coincide con el Oeste su valor es $+90^\circ$.

2.2.5.3 Ángulo de inclinación (β)

Es el ángulo que forma la superficie del colector con el plano horizontal. Su valor es 0° si el módulo se coloca horizontal y 90° si se coloca vertical.

Una superficie recibe la mayor cantidad posible de energía si es perpendicular a la dirección del sol. Como la posición del sol varía a lo largo del día, la posición óptima de la superficie también tendrá que ser variable.

2.2.5.4 Declinación (δ)

Se define como el ángulo variable que forma el ecuador con el plano de la eclíptica. Por lo tanto la dirección de la radiación solar incidente sobre la tierra varía en función de la declinación. La latitud (ϕ) de un lugar A (Figura 6c) indica el ángulo que forma la vertical de ese lugar con el ecuador. Por lo tanto, a lo largo del año el ángulo Cenital θ_{zs} que forma la vertical de un lugar A con la dirección de la radiación solar varía desde $\theta_{zs} = \phi - \delta$ en el solsticio de verano

a $\theta_{zs} = \phi + \delta$ en el solsticio de invierno, pasando dos veces por el valor $\theta_{zs} = \phi$ en los equinoccios del año.

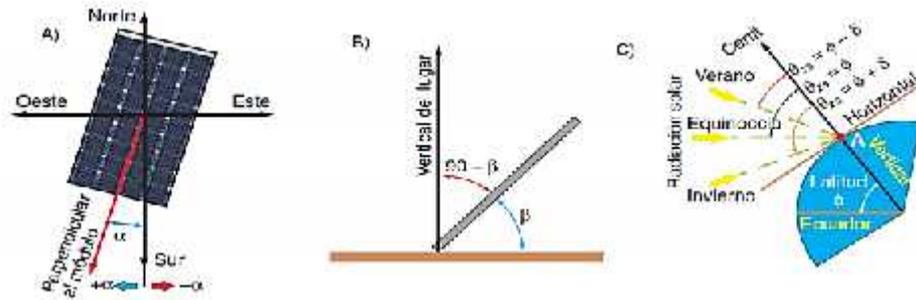


Figura 6. Orientación del colector solar.

Fuente: Gonzalo, L. (2016). Modulos fotovoltaicos. [Figura]. Recuperado de <http://slideplayer.es/slide/10187144/>

Por lo tanto, para que una superficie reciba la radiación solar perpendicularmente (Figura 7) tendremos que inclinar la superficie un ángulo β con la horizontal igual que al que forma la vertical de lugar con la radiación solar. Tendremos que variar el ángulo de inclinación desde $\beta = \phi - \delta$ en el solsticio de verano (figura 7c) a $\beta = \phi + \delta$ en el solsticio de invierno (Figura 7a), pasando por el valor $\beta = \phi$ en los equinoccios (Figura 7b).

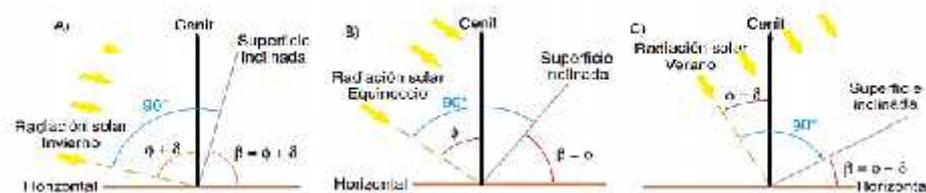


Figura 7. Inclinación del colector solar.

Fuente: Gonzalo, L. (2016). Modulos fotovoltaicos. [Figura]. Recuperado de <http://slideplayer.es/slide/10187144/>

2.2.5.5 Orientación óptima

La orientación óptima será un valor constante, con una inclinación (β) que va a depender de la latitud ϕ del lugar y un azimut (α) que depende del

hemisferio en el que está situado el colector. La figura 8 muestra una superficie situada en el hemisferio norte, donde el sol sigue una trayectoria Este – Sur – Oeste. Si pretendemos maximizar la captación de energía solar, la superficie del colector tendrá que estar orientada hacia el sur y por lo tanto el ángulo de azimut (α) debe ser nulo. El azimuth óptimo para que una superficie fija reciba la mayor cantidad posible de energía solar debe ser cero ($\alpha = 0^\circ$), la superficie se debe orientar hacia el sur si está situada en el hemisferio Norte o hacia el norte si está en el hemisferio Sur.

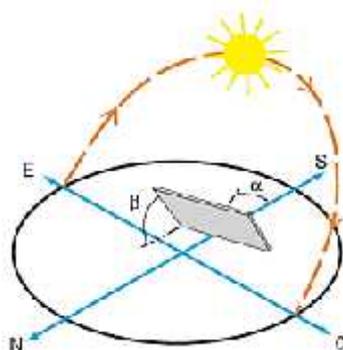


Figura 8. Orientación de una superficie en el Hemisferio Norte.

Fuente: Gonzalo, L. (2016). Modulos fotovoltaicos. [Figura]. Recuperado de <http://slideplayer.es/slide/10187144/>

Para determinar la inclinación óptima de una superficie fija se usa una fórmula basada en análisis estadístico de radiación solar anular sobre superficies con diferentes inclinaciones situados en lugares de diferentes latitudes, que proporcionan la inclinación óptima de la latitud del lugar:

$$\beta_{\text{opt}} = 3,7 + 0,69 |\phi|$$

β_{opt} : ángulo de inclinación óptima (grados)

$|\phi|$: latitud del lugar, sin signo (grados)

La fórmula es válida para aplicaciones de utilización anual que busquen la máxima captación de energía solar a lo largo del año. En la práctica también se utilizan expresiones basadas en la experiencia y la observación, que

proporcionan la inclinación óptima en función del periodo de tiempo y el uso que se le va a dar al colector.

| PERIODO DE UTILIZACIÓN | INCLINACIÓN DE LOS COLECTORES |
|-----------------------------|-------------------------------|
| Anual con consumo constante | $\beta = \phi$ |
| Preferentemente en invierno | $\beta = \phi + 10^\circ$ |
| Preferentemente en verano | $\beta = \phi - 10^\circ$ |

Tabla 2. Inclinaciones recomendadas.

Fuente: Wolters, K. (2005).Elementos de la Construcción. España. Editorial La ley.

Se admiten en cualquiera de los tres casos desviaciones de $(\beta \pm 10^\circ)$ como máximo.

2.2.6 Variables Experimentales.

Se define la terma solar como sistema cerrado de energía el cual solo va a obtener intercambio de energía y no de materia. Los parámetros a tener en cuenta para validar el trabajo son los siguientes: temperatura fría, temperatura caliente en el tanque, radiación solar, cantidad de masa (agua) y otros parámetros constantes como: calor específico del agua, densidad, área y volumen.

2.2.6.1 Temperatura fría

Es la temperatura con la que se encuentra inicialmente el calentador de tubos al vacío en el instante que comienza a operar. Es la temperatura de entrada del calentador.

2.2.6.2 Temperatura caliente

Temperatura de trabajo del colector de tubos de vacío. Se mide dentro del tanque de almacenamiento de la terma solar.

2.2.6.3 Radiación solar

Es la energía en forma de ondas electromagnéticas que será captada por la superficie del colector de tubos de vacío para luego ser transferidos en forma de calor al fluido.

2.2.6.4 Irradiancia

Es el valor instantáneo de la energía que llega por cada unidad de tiempo y por cada unidad de área. La potencia recibida por un colector solar de tubos de vacío perpendicular a los rayos del sol es igual al producto del valor de la irradiancia por el área de la superficie captadora del sol en W/m^2 .

2.2.6.5 Irradiación

Es el valor de la energía que llega durante un periodo de tiempo por cada unidad de área en MJ/m^2 o Kwh/m^2 .

2.2.6.6 Calor específico (C_p)

Es la cantidad de energía calorífica necesaria para incrementar la temperatura de una sustancia en un grado.

$$C_p = 4,18 \text{ KJ/Kg-}^\circ\text{K}$$

2.2.6.7 Densidad (...)

La densidad del agua se define como la cantidad de masa de agua por unidad de volumen.

$$\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$$

2.2.6.8 Eficiencia Térmica de la Terma Solar

Para caracterizar la eficiencia térmica de una terma solar se debe evaluar su rendimiento energético global. La eficiencia energética² (η_E) que se define como la relación entre la energía térmica útil ganada por el agua de la terma y la energía solar recibida por el colector solar de tubos de vacío:

$$\eta_E = \frac{\text{Energía Térmica Útil } (Q_u)}{\text{Energía Solar Recibida } (I_c)}$$

2.2.7 Instrumentos de medición

2.2.7.1 Piranómetro

Este instrumento es utilizado para medir la radiación global (directa más difusa) o radiación solar hemisférica. Es a partir de este instrumento que se dispone actualmente la mayor parte de los datos confiables de radiación solar. La unidad de medición es potencia sobre área (W/m^2), esta cantidad de potencia al tener contacto con la superficie se convierte en energía en forma de calor.

Las partes principales de un piranómetro son:

- El sensor térmico, o termopila, cuya superficie receptora está pintada en negro o alternativamente en negro y blanco.
- La cúpula (una o dos) que cubre concéntricamente la superficie receptora.
- El cuerpo, que en general está cubierto por una pantalla contra la radiación solar, y es usado como referencia térmica.

² Valera, Aníbal (2007). Energía Solar. Perú. Editorial Hozlo S.C.R.L.



Figura 9. Piranómetro Digital.
Fuente: fotografía tomada en el C.P SALCEDO PUNO.

2.2.7.2 Termocupla

La medición de temperatura se hace por medio de un sensor llamado termocupla que tiene gran precisión que se puede obtener en las medidas de diferencia de tensión. Con dos metales diferentes cuyas juntas están a temperaturas diferentes, se puede obtener una diferencia de potencial o voltaje muy pequeño (efecto Seebeck³) del orden de los milivoltios el cual aumenta con la temperatura. Por ejemplo, una termocupla “tipo J” está hecha con un alambre de hierro y otro de constantan (aleación de cobre y níquel).

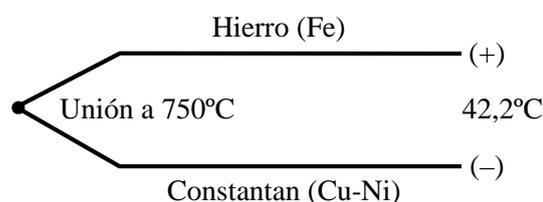


Figura 10. Termocupla tipo J.

³ El efecto Seebeck, es una propiedad termoeléctrica descubierta en 1821, por el físico alemán Thomas Seebeck.

Se muestra a continuación una imagen de la Termocupla empleada en el Proyecto de Tesis.



Figura 11. Termocupla digital

Fuente: fotografía tomada en el C.P SALCEDO PUNO.

2.2.7.3 Anemómetro

La medida del viento es importante sobre todo para los colectores planos, y más aún para aquellos que no poseen una cubierta; en el caso de colectores solares de tubos de vacío la velocidad del viento no es importante porque las pérdidas de calor por convección son despreciables porque la temperatura superficial de los tubos es aproximadamente la temperatura ambiente, porque la superficie exterior del tubo de vacío no se calienta. Los instrumentos más utilizados, para medir la velocidad del viento, son los anemómetros. La figura 12 muestra el anemómetro digital utilizado en el proyecto de tesis.



Figura 12. Anemómetro digital.

Fuente: fotografía tomada en el C.P SALCEDO PUNO.

2.2.7.4 Controlador microcomputador solar

Instrumento que permite controlar el nivel del agua del tanque de almacenamiento del agua caliente, se puede programar la temperatura máxima a la que se quiere llegue el agua caliente del tanque. El instrumento a su vez permite medir la temperatura del agua caliente en el tanque de almacenamiento a través del tiempo.



Figura 13. Controlador microcomputador solar.

Fuente: fotografía tomada en el C.P SALCEDO PUNO.

2.3 GLOSARIO DE TÉRMINOS BÁSICOS

2.3.1 Calor y temperatura

Con frecuencia, solemos confundir los términos calor y temperatura, puede parecer lo mismo, pero no es así, ya que: calor es una forma de energía y temperatura es la medida de dicha energía.

2.3.2 Radiación

Modo en que se traslada la energía térmica o calorífica a través del vacío y el espacio libre entre moléculas. Un cuerpo negro es aquel que absorbe toda la energía radiante que incide sobre él. La unidad en que se mide la radiación solar en los colectores solares es el W/m^2 .

2.3.3 Colector solar

Los colectores solares son dispositivos (tubos de vacío) capaces de captar la radiación solar y transmitirla a un fluido (agua) para su posterior aprovechamiento energético.

2.3.4 Tubos de vacío

Son colectores que se les ha efectuado el vacío en el interior de un tubo, este vacío es aprovechado para eliminar las pérdidas por convección y de esta forma aumentar la temperatura, con menos necesidad de captación efectiva, también permiten más integración en el espacio arquitectónico, esto es debido a que su espacio es más reducido.

2.3.5 Terma solar

Una terma solar consta de un colector (tubos de vacío), así como de un tanque de almacenamiento aislado, está diseñado para ser utilizado en casas,

hospitales, lavanderías, etc.; cuyo objetivo es calentar el agua utilizando la energía del sol.

2.3.6 Energía Solar

Las potencias de radiación solar máxima están entre 1000 W/m^2 (día soleado) y 200 W/m^2 (día nublado), correspondiendo energías lumínicas de 8 KWh/m^2 y $1,5 \text{ KWh/m}^2$ respectivamente. Estas energías disponibles se pueden transformar en electricidad o en calor útil.

2.3.7 Piranómetro

Instrumento de medida de la radiación solar, el piranómetro fotovoltaico utiliza como sensor una celda fotovoltaica, la que transforma la radiación solar incidente (W/m^2) en una señal eléctrica (mA).

2.3.8 Colector fototérmico

Dispositivo de conversión fototérmico que convierte la radiación solar incidente en energía calorífica útil. En el caso de una terma solar por ejemplo se trata de obtener agua caliente.

2.3.9 Anemómetro

Instrumento de medida para la velocidad del viento, se ubica usualmente a una altura de 6 m, en una zona libre de obstáculos.

2.3.10 Irradiación

El valor instantáneo de la energía solar que llega por cada unidad de tiempo y por cada unidad de área (W/m^2).

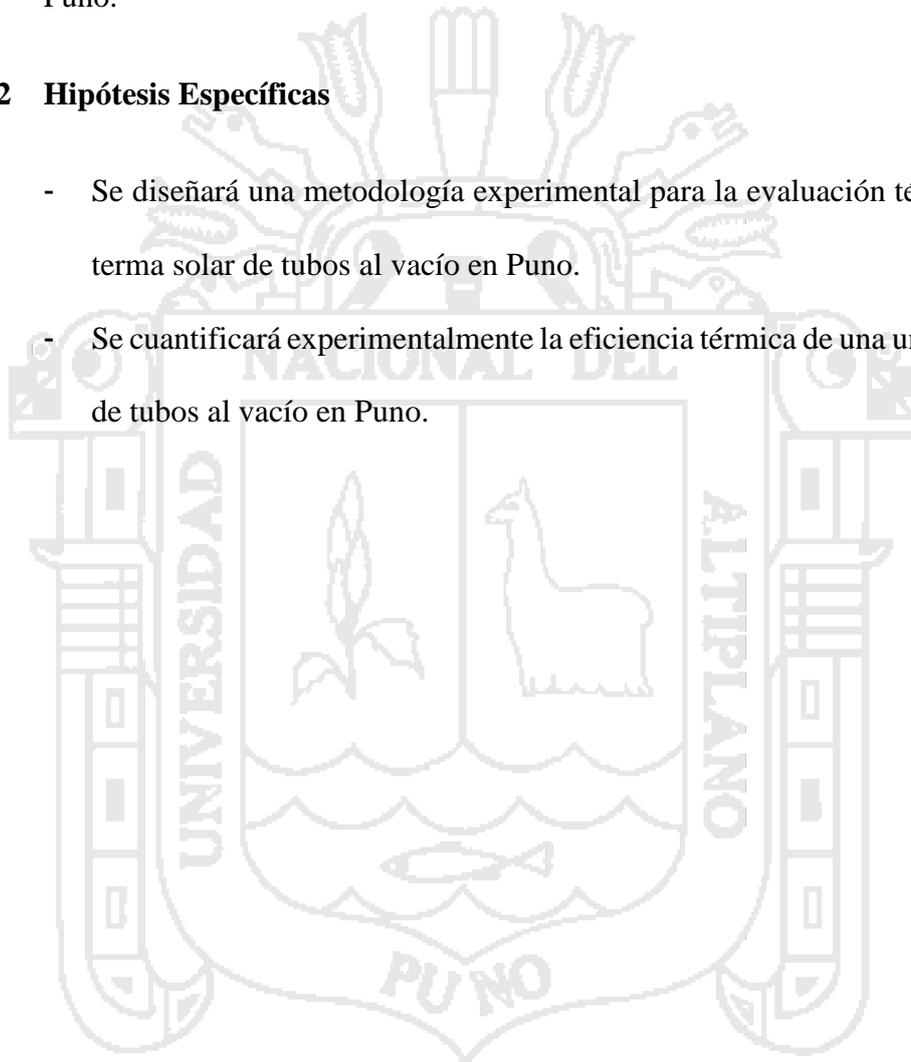
2.4 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

2.4.1 Hipótesis General

Se determinará la eficiencia térmica de una una terma solar de tubos al vacío en Puno.

2.4.2 Hipótesis Específicas

- Se diseñará una metodología experimental para la evaluación térmica de una terma solar de tubos al vacío en Puno.
- Se cuantificará experimentalmente la eficiencia térmica de una una terma solar de tubos al vacío en Puno.



2.5 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

| VARIABLES | DIMENSIONES | INDICADORES |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------|
| POTENCIA Dependiente | Watt | W |
| TIEMPO Independiente | Segundos | S |
| MASA Independiente | Kilogramos | Kg |
| CAUDAL Dependiente | Metros cúbicos por segundo | m ³ /s |
| EFICIENCIA TÉRMICA Dependiente | Porcentaje | % |
| ÁREA DEL COLECTOR Dependiente | Metros cuadrados | m ² |
| TEMPERATURA Dependiente | Grados Celcius | °C |
| ENERGÍA CALORÍFICA Dependiente | Kilowatt hora | KWh |
| RADIACIÓN SOLAR Dependiente | Watt por metro cuadrado | W/m ² |
| CALOR ESPECÍFICO Dependiente | Kilo Joule por Kilogramo – Kelvin | KJ/Kg-°K |
| DENSIDAD Dependiente | Kilogramos por metro cúbico | Kg/m ³ |
| VOLUMEN Dependiente | Metros cúbicos | m ³ |
| IRRADIANCIA Dependiente | Watt por metros cuadrados | W/m ² |



DISEÑO METODOLÓGICO DE INVESTIGACIÓN

3.1 TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

3.1.1 Tipo de Investigación

El tipo de investigación desarrollado en la presente tesis es del tipo de investigación aplicada o experimental.

3.1.2 Diseño de la Investigación

Para cumplir el objetivo de la tesis: “Determinación de la eficiencia térmica de una terma solar en Puno”, se diseñó el ensayo experimental a ejecutar, considerando los factores limitantes en cuanto al módulo experimental de investigación e instrumentos de medición de los parámetros experimentales necesarios para la determinación de la eficiencia térmica. Considerando que en la Escuela Profesional no se tiene un módulo para el ensayo de termas solares, ni la instrumentación necesaria de acuerdo al avance de la tecnología actual en el área de la energía solar.

En primer lugar para suplir el módulo de ensayo de investigación para el desarrollo de la tesis, compramos una terma solar de tubos de vacío de flujo directo marca DAVSOL que reunía las características necesarias para el trabajo de investigación considerando nuestras posibilidades en cuanto al factor económico, que fue asumido totalmente por nosotros los tesisistas.

Respecto al otro aspecto, los instrumentos; utilizamos la termocupla y el anemómetro de la escuela Profesional y, compramos un Controlador Microcomputador Solar para medir la temperatura del agua caliente del tanque y alquilamos un piranómetro para medir la radiación solar.

3.1.2.1 Terma solar de tubos de vacío de flujo directo

En nuestra investigación el módulo de ensayo lo constituye la terma solar de tubos de vacío de flujo directo marca DAVSOL de 6 tubos de vacío y con una capacidad de almacenamiento de 60 litros de agua caliente (Figura 14).



Figura 14. Terma solar de tubos de vacío marca DAVSOL
Fuente: fotografía tomada en el C.P SALCEDO PUNO.

3.1.2.1.1 Orientación e inclinación del colector solar de tubos de vacío

El colector o captador solar se situó de forma que a lo largo del periodo anual de utilización aproveche al máximo la radiación solar disponible. Se orientó hacia el Norte geográfico, considerando nuestra ubicación en el hemisferio Norte o Noroeste con respecto a la orientación Norte no afectan sensiblemente el rendimiento de la energía térmica captada por el equipo solar². Se utilizó la brújula de un celular. La determinación práctica del Norte

geográfico puede concretarse por la dirección de la sombra proyectada por una varilla o tabla vertical, a las 12 horas o mediodía solar.

En general, se procura que la radiación solar incida perpendicularmente sobre la superficie del colector solar al mediodía solar del día o punto medio de la época de la utilización del equipo. La superficie de nuestro colector solar de tubos de vacío recibiría la mayor cantidad posible de energía si es perpendicular a la dirección del sol, pero como la posición del sol varía a lo largo del día, la posición óptima de la superficie también tendrá que ser variable.

La orientación óptima será un valor constante, con una inclinación (β) que va a depender de la latitud ϕ (ángulo que forma la vertical de un lugar con el ecuador) del lugar y un azimut (α) (es el ángulo de giro del sol con respecto al sur geográfico medido sobre el plano horizontal) que depende del hemisferio en el que está situado el colector. El azimut óptimo para que una superficie fija reciba la mayor cantidad posible de energía solar debe ser cero ($\alpha=0^\circ$), la superficie del colector se debe orientar hacia el sur si está situado en el hemisferio norte o hacia el norte si está en el hemisferio sur.

Para la determinación de la inclinación óptima ($\beta_{opt.}$) de nuestro colector de tubos de vacío que se utilizó para el trabajo de investigación en la ciudad de Puno (Salcedo), se utilizó una fórmula basada en análisis estadísticos de radiación solar anual sobre superficies de colectores con diferentes inclinaciones situados en lugares de diferentes latitudes:

$$\beta_{opt} = 3,7 + 0,69 |\phi|$$

Donde:

$|\phi|$: latitud del lugar, sin signo (grados)

β_{opt} : ángulo de inclinación óptima (grados)

Para Puno: $\phi = 15,8^\circ$

Entonces: $\beta_{opt} = 3,71 + 0,69 (15,8)$

$$\beta_{opt} = 14,60^\circ$$

Considerando la tabla 2, de inclinación recomendados, basada en la experiencia y la observación, se obtiene:

Para un consumo anual constante:

$$\beta_{opt} = \phi$$

Entonces, para Puno:

$$\beta_{opt} = 15,8^\circ$$

Cuya variación con respecto a la determinación de la primera inclinación es de: $1,2^\circ$ (8,22%).

Variaciones⁴ de $\pm 10^\circ$ con respecto al ángulo de inclinación óptimo no afectan sensiblemente al rendimiento y a la energía térmica útil aportada por el equipo.

3.1.2.1.2 Determinación de las sombras

Normalmente, en el día más desfavorable del periodo de utilización, el equipo no tendrá más del 5% de la superficie útil del colector solar cubierta por sombras. Un equipo resultará inoperante cuando el 20% de la superficie de captación solar esté en sombra. La existencia de sombras proyectadas sobre los colectores puede ser por dos causas:

- Obstáculos próximos

⁴ Vázquez, C. (2008) Energía Solar Térmica. Edit. Técnica, España.

- Sombras entre colectores

Para el ensayo técnico realizado en el trabajo de la tesis, no se tuvo obstáculos que proyectaran sombra sobre el colector ni tampoco sombras entre colectores porque solo se trabajó por investigación con una sola terma solar por consiguiente con un solo colector.

3.1.2.2 Determinación de las variables experimentales

Para la determinación de las variables experimentales que se midieron, en principio se determinó la variable eficiencia térmica, que se evalúa con el calor útil o el calor absorbido por el fluido térmico (agua) Q_{μ} , la irradiación solar térmica I_{μ} y el área del colector de tubos de vacío A_c .

Este método⁵ de ensayo para termas solares se sirve de un sistema cerrado que consiste en un colector y un tanque de almacenamiento, en el sistema cerrado de energía se considera solamente el intercambio de energía y no de materia.

La eficiencia térmica se define como:

$$y_E = \frac{Q_{\mu}}{I_{\mu} \cdot A_c} = \frac{m_a \cdot C_p \cdot (T_q - T_e) / \Delta t}{I_{\mu} \cdot A_c \cdot \tau_s}$$

m_a : masa del agua (Kg)

C_p : Calor específico del agua (KJ/Kg-°K)

T_q : Temperatura del agua caliente en el tanque (°K)

T_e : Temperatura del agua a la entrada (°K)

Δt : Intervalo de tiempo de calentamiento del agua de la terma (s)

⁵ Rosenthal, P. – Canedo, W. (1996), Sistemas solares, GT2, Editorial Proper, Bolivia.

I_{μ} : Irradiación solar (W/m^2)

A_c : área del colector de tubos (m^2)

α_s : factor de corrección del porcentaje de radiación incidente

Por consiguiente las variables a determinar experimentalmente para validar el trabajo son las siguientes:

- TEMPERATURA FRÍA: es la temperatura a la que se encuentra inicialmente el agua del colector en el instante que comienza a operar. Es la temperatura de entrada del agua al colector (T_e)
- TEMPERATURA CALIENTE: Temperatura de trabajo del colector. Se mide dentro del tanque de almacenamiento de la terma (T_q).
- RADIACIÓN SOLAR: Es la energía en forma de ondas electromagnéticas que será captada por la superficie del colector para luego ser transferida en forma de calor al agua.
- IRRADIANCIA (I_{μ}): El valor instantáneo de la energía que llega por cada unidad de tiempo y por cada unidad de área (W/m^2).
- IRRADIACIÓN: El valor de la energía que llega durante un periodo de tiempo por cada unidad de área (Kwh/m^2).
- MASA DE AGUA: Es la cantidad de agua alojada en la terma.
- CALOR ESPECÍFICO (C_p): Cantidad de energía necesaria para incrementar la temperatura del agua en un grado ($KJ/Kg-^{\circ}K$).
- VOLUMEN DEL AGUA: El volumen del agua contenida en el tanque y en los tubos (m^3).
- DENSIDAD DEL AGUA: La masa por unidad de volumen del agua (Kg/m^3).
- ÁREA DEL COLECTOR DE TUBOS: La superficie de los tubos de vacío que reciben la radiación solar (m^2).

3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA DE INVESTIGACIÓN

Considerando que la tesis es del tipo experimental en el contexto de la ingeniería no corresponde este aspecto.

3.3 UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA POBLACIÓN

El ensayo técnico experimental se desarrolla en Salcedo – Puno, por las características ambientales óptimas para la investigación que se desarrolló.

3.4 MATERIAL EXPERIMENTAL

La instrumentación necesaria para la medición de las variables en el trabajo de investigación, estuvo compuesta de lo siguiente:

3.4.1 Termocupla digital

Instrumento que se utilizó para medir la temperatura del ambiente, como parámetro referencial durante la toma de datos y la temperatura de entrada del agua a la terma en °C.

Para la medición de la temperatura ambiental se tuvo cuidado que la radiación solar no incida sobre la termocupla (se midió en la sombra) (T_a).

El agua que llega a la terma solar proviene de un tanque “ROTOPLAS”, cuya temperatura del agua es la temperatura de entrada del agua a la terma solar (T_e).

Las características técnicas de la termocupla son:

Digital Thermometer

Marca : Yokogawa Modelo: 2455

Type : K

Rango de medida : -160°C a +1372°C

Fabricación : Japón

3.4.2 Piranómetro Digital

Instrumento utilizado para medir la irradiación solar (I_{μ}), energía instantánea que llega al colector de tubos de vacío por unidad de área en Wh/m^2 .

Las características técnicas del piranómetro digital son:

PCE-SPM1 : Datalogging Solar Power Meter
Unidad de medida : Wh/m^2

3.4.3 Anemómetro digital

Instrumento que nos sirvió para medir la velocidad del viento en Km/h , parámetro que se midió como referencia, el cual era importante para las pérdidas por convección. En los colectores de tubos de vacío no es importante porque la superficie de los tubos no se calienta y está a la temperatura del ambiente.

Las características técnicas del anemómetro digital son:

Windmaster 2
Marca : Kaindl electronic
Rango de medida : 2,5 a 150 Km/h
Made in Germany
Fabricación : Alemania

3.4.4 Controlador microcomputador solar

Instrumento que sirve para el control automático del nivel de agua que ingresa a la terma, a través de una válvula que es controlada por un microcomputador.

También el instrumento mide en forma continua la temperatura del agua caliente en el tanque de almacenamiento a través de una termocupla cuyo sensor transmite la temperatura al microcomputador.

Las características técnicas del instrumento son:

TKD2: Solar water heater microcomputer intelligence controller

Modelo : TK-84

Fabricación : China

3.4.5 Cronómetro digital

Instrumento que se utilizó para medir el tiempo durante el ensayo técnico.

Las características técnicas de este instrumento son:

Celular móvil GSM HUAWEI

HUAWEI G7220

VERSIÓN 01 N° 6011491

3.5 PROCEDIMIENTO DEL EXPERIMENTO

La investigación que se desarrolló fue del tipo aplicada o experimental, cuyo procedimiento fue el siguiente:

3.5.1 Montaje de la terma solar de tubos de vacío

Para el proceso de toma de datos, el procedimiento del montaje de la terma, lo realizaron los técnicos de la empresa donde se compró la terma solar.

- a) Se armó la estructura metálica donde va montado los tubos de vacío y el tanque de almacenamiento.
- b) Se montó el tanque de almacenamiento del agua caliente que tiene una capacidad de 60 litros.
- c) La estructura metálica donde va montados el colector solar constituido por 6 tubos de vacío, fue orientada en la dirección del norte geográfico, con la ayuda de una brújula de un teléfono celular del técnico que realizó los trabajos de montaje, para la inclinación del colector se consideró 20°.

- d) Se procedió al montaje de los tubos de vacío, en los agujeros del tanque de almacenamiento, uno por vez colocando los empaques respectivos e introduciéndolos en los agujeros del tanque a presión.
- e) Se verificó el medidor del nivel de aguas del tanque de almacenamiento, constituido por un pequeño depósito con su boya respectiva, al constado del tanque.
- f) Se instaló todas las tuberías y accesorios hidráulicos para la entrada del agua fría a la terma solar, conectándose a un tanque ROTOPLAS de 650 litros.
- g) Se instaló el controlador microcomputador solar, el cual para controlar el nivel de agua lo hace a través de una válvula hidráulica termomagnética, la que se instaló en el sistema hidráulico cerca al depósito donde se encuentra la boya de control del nivel del agua. Así mismo, el microcomputador registra la temperatura del agua caliente del tanque de almacenamiento, para lo cual el técnico instaló la termocupla del controlador dentro del tanque.
- h) Se procedió a las pruebas hidráulicas del funcionamiento de la terma solar.
- i) Se comprobó el funcionamiento del microcomputador solar, respecto al control del nivel del agua que debe ingresar a la terma solar y respecto al control de la temperatura del agua caliente en el tanque de almacenamiento.
- j) Para medir la temperatura del agua fría de ingreso a la terma solar se adecuó el depósito donde se encuentra la boya controladora del nivel del agua, lo que se hizo con otra termocupla.
- k) Finalmente se instaló sobre una pequeña mesa el piranómetro y el anemómetro para las mediciones de la radiación solar y velocidad del viento respectivamente.

3.5.2 Determinación de la capacidad de volumen de agua del tanque de almacenamiento

Para determinar el volumen del agua a calentar en la terma solar, y con el objetivo de calcularlo con la mayor aproximación posible, se siguió el siguiente procedimiento:

- a) Se vació completamente el tanque de almacenamiento del agua a través de la válvula de desagüe, ubicada en la parte inferior del tanque.
- b) Se prendió el microcomputador controlador del nivel de agua que ingresa al tanque de almacenamiento y a los tubos de vacío.
- c) Se esperó que de agua se llene en el tanque de almacenamiento, el cual es controlado por una válvula de solenoide, la cual cierra automáticamente el paso del agua, al llegar al nivel del agua controlado por la boya en el pequeño tanque.
- d) El instante que el tanque de almacenamiento se llenó, es indicado por sonidos del microcomputador controlador del nivel del agua.
- e) Por la válvula de desagüe del tanque de almacenamiento, se vació el tanque recibiendo el agua en dos depósitos de plástico color blanco con una capacidad aproximada de 25 litros cada uno.
- f) Se procedió a medir el volumen del agua contenida en el tanque de almacenamiento utilizando una jarra de plástico graduada en mililitros, cuyo rango de medida era de 0 – 1200 mililitros.
- g) Para el procedimiento de medición se diseñó el siguiente formato:

| Nº | VOLUMEN (mililitros: mL) |
|-------|-----------------------------|
| 1 | |
| 2 | |
| 3 | |
| ⋮ | |
| 20 | |
| TOTAL | |

Elaborado: Por los investigadores.

El procedimiento se repitió dos veces, estableciéndose el volumen final del agua del tanque de almacenamiento a través del promedio de las dos mediciones en mililitros.

3.5.3 Diseño del formato para la toma de datos experimentales

Para la ejecución del ensayo experimental se diseñó el siguiente formato para la lectura de las mediciones de los parámetros necesarios para determinar la eficiencia térmica de la terma solar de tubos de vacío:

| Número de Ensayo | Temperatura del Ambiente (°C) | Temperatura del agua de entrada (°C) | Temperatura del agua en el Tanque (°C) | Radiación solar (W/m ²) | Velocidad del viento (Km/h) |
|------------------|-------------------------------|--------------------------------------|--|-------------------------------------|-----------------------------|
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| ⋮ | | | | | |
| 20 | | | | | |

Elaborado: Por los investigadores.

3.6 ENSAYO TÉCNICO EXPERIMENTAL

Para la ejecución del ensayo experimental, a través del cual se procedió a la toma de datos de las variables involucradas en la determinación experimental de la eficiencia térmica de una terma solar en Puno, se tuvo las siguientes consideraciones fundamentales con respecto a una investigación experimental:

- Se eligió un módulo de investigación constituido principalmente por una terma solar de seis tubos de vacío, porque la tecnología de colectores de tubos de vacío es la que predomina actualmente en el mundo por su mayor eficiencia con respecto a los colectores de placas planas, tecnología que ha sido desplazada del mercado, se compró una terma solar de seis tubos de vacío de flujo directo marca DAVSOL fabricada totalmente en China.
- En el montaje del colector de tubos se consideró la precisión en la orientación del colector en la dirección del norte geográfico, respecto a la inclinación se adaptó el soporte metálico hasta una inclinación de 20° , por limitaciones de la geometría del soporte metálico y, también considerando las condiciones de montaje que realiza el técnico de la empresa en la cual se compró la terma solar.
- Las Normas Peruanas respecto al ensayo de termas solares son más específicas sobre el ensayo de termas solares de colectores solares de placas planas, no así con respecto a los de tubos de vacío y precisan de instrumentos de medición de alta tecnología, como medidores de temperatura de rayos infrarrojos para medir temperaturas dentro de los tubos de vacío, instrumentación que no es accesible por las condiciones en que realizamos la investigación en nuestra universidad, por lo cual la investigación se realizó

dentro del marco de las normas peruanas adecuándonos a la metodología acorde a nuestras condiciones de investigación. Se midió la velocidad del viento, parámetro importante en las normas pero cuando se trata de termas solares de colectores de placas planas en las cuales existen pérdidas de calor por convección los cuales se puede incrementar por el viento, más no en los colectores de tubos de vacío, donde la pérdida de calor por convección es despreciable.

- La experimentación de la toma de datos, se realizó durante varios días para analizar el comportamiento de las variables y estudiar si la tendencia de las mediciones coincidían con los criterios lógicos y teóricos que ameritaban considerar en los ensayos técnicos realizados.

3.6.1 Toma de datos experimentales para la determinación de la capacidad de volumen de tanque de almacenamiento

- 1) Se procedió a vaciar manualmente el tanque de almacenamiento del agua por la válvula de desagüe.
- 2) Se preparó el sistema hidráulico del agua para prender el sistema automático de llenado de agua.
- 3) Se prendió el sistema automático de llenado de agua a través del microcomputador de control.
- 4) Se esperó el mensaje de sonido del microcomputador, que indica el llenado del tanque de almacenamiento.
- 5) Se vació el agua del tanque en dos recipientes de plástico de 25 litros de capacidad atrás de la válvula de desagüe de la parte inferior del tanque.

- 6) Se procedió a medir el volumen de agua del tanque con una jarra graduada en mililitros.
- 7) Los pasos del 1) al 6) se repitieron 2 veces.

Los datos experimentales se presentan en la tabla:



| PRIMER ENSAYO DE MEDICIÓN | | |
|--|------------------------------|-------------------------------|
| Nº | VOLUMEN PRIMER DEPÓSITO (mL) | VOLUMEN SEGUNDO DEPÓSITO (mL) |
| 1 | 1100 | 1100 |
| 2 | 1000 | 1070 |
| 3 | 1050 | 1100 |
| 4 | 1100 | 1025 |
| 5 | 975 | 1100 |
| 6 | 1000 | 1100 |
| 7 | 1000 | 1080 |
| 8 | 1050 | 1025 |
| 9 | 1100 | 1050 |
| 10 | 1100 | 1040 |
| 11 | 1100 | 1050 |
| 12 | 1050 | 1040 |
| 13 | 1050 | 1100 |
| 14 | 1000 | 1050 |
| 15 | 1075 | 1075 |
| 16 | 990 | 1100 |
| 17 | 875 | 975 |
| 18 | 950 | 700 |
| 19 | 1000 | 850 |
| 20 | 175 | 750 |
| TOTAL | 19740 mL | 20380 mL |
| Volumen total = 19740 + 20380 = 40120 mL | | |

Tabla 3. Cálculo del Volumen de agua en el tanque de almacenamiento.
Elaborado: Por los Investigadores

| SEGUNDO ENSAYO DE MEDICIÓN | | |
|--|------------------------------|-------------------------------|
| Nº | VOLUMEN PRIMER DEPÓSITO (mL) | VOLUMEN SEGUNDO DEPÓSITO (mL) |
| 1 | 995 | 1050 |
| 2 | 1045 | 1085 |
| 3 | 1100 | 1070 |
| 4 | 1095 | 1100 |
| 5 | 1055 | 1050 |
| 6 | 1025 | 1100 |
| 7 | 1050 | 1050 |
| 8 | 1000 | 1085 |
| 9 | 1095 | 1090 |
| 10 | 1050 | 1090 |
| 11 | 1075 | 1070 |
| 12 | 1050 | 1070 |
| 13 | 1100 | 1080 |
| 14 | 1025 | 1100 |
| 15 | 1075 | 1080 |
| 16 | 1090 | 1050 |
| 17 | 920 | 1040 |
| 18 | 945 | 1030 |
| 19 | 900 | 1100 |
| TOTAL | 19690 mL | 20390 mL |
| Volumen total = 19690 + 20390 = 40080 mL | | |

Tabla 4. Cálculo del Volumen de agua en el tanque de almacenamiento.
Elaborado: Por los investigadores.

3.6.2 Toma de datos experimentales en el módulo de investigación

Considerando la importancia de las condiciones ambientales donde se realizó la investigación, se midió la presión atmosférica con el barómetro del laboratorio de Física de la Universidad, el promedio aproximado de los cinco días donde en los que se hicieron las lecturas de datos experimentales fue de:

$$P_{\text{atm}} = 489 \text{ mm Hg} = 0.65 \text{ bar}$$

La ciudad de Puno está a una altura de 3827 m.s.n.m.

El módulo de laboratorio se instaló en Salcedo en la urbanización APROVISA, donde no se corrió el riesgo de que la terma solar fuera obstruida por sombras de edificios.

Para determinar la eficiencia térmica de la terma, es necesario cuantificar el calor útil: $Q_u = mC_p\Delta T/\Delta t$, que es la energía calorífica ganada por la masa (m) del agua del tanque de almacenamiento de la terma y el agua de los tubos de vacío debido al gradiente de temperatura del agua: $\Delta T = T^{\circ}_{\text{tanque}} - T^{\circ}_{\text{entrada}}$; en un intervalo de tiempo Δt , el cual para el ensayo experimental lo consideramos de 1 hora.

Para la determinación de la energía solar que incide sobre el colector solar de tubos de vacío: $I_c = I \cdot A \cdot \alpha_s$, se midió la irradiancia solar en w/m^2 , los otros parámetros A y α_s son constantes y que se calcularon posteriormente.

En función a lo anterior el procedimiento de toma de datos experimentales fue el siguiente:

1. Se arrancó el módulo de investigación (10:45 A.M.)
2. Se verificó el funcionamiento de los instrumentos de medición: termocuplas, piranómetro, microcomputador solar, cronómetro, anemómetro.
3. Se procedió a llenar la terma con agua a través del controlador microcomputador aproximadamente en 10 minutos.
4. Se procedió a realizar las lecturas de la temperatura ambiente y la temperatura del agua a la entrada de la terma con la termocupa (11:00 A.M.).
5. Después de un intervalo de tiempo (Δt) de 1 hora se procedió a realizar las lecturas experimentales siguientes:
 - Temperatura del agua en el tanque, con la termocupa sumergida en el tanque y controlada por el microcomputador.
 - La irradiancia solar con el piranómetro digital.
 - La velocidad del viento con el anemómetro digital.
6. Se procedió a vaciar el agua de la terma por la válvula de descarga situada en la parte inferior de la terma.
7. Se repitió los pasos: 3, 4, 5 y 6; dos veces más durante el día.
8. La toma de datos experimentales se realizó durante 5 días seguidos del 23 al 27 de octubre del 2015, en el horario aproximado de 10:45 A.M. a 14:30 P.M.

Los datos experimentales tomados se sistematizan en la siguiente tabla:

| HORA | Temperatura ambiente T_a (°C) | Temperatura del agua a la entrada T_{ent} (°C) | Temperatura del agua en tanque T_{tanq} (°C) | Irradiancia Solar I (W/m ²) | Velocidad del viento (Km/h) |
|------------------------------------|---------------------------------------|--|--|---|--------------------------------|
| DÍA: 23 DE OCTUBRE DEL 2015 | | | | | |
| 11:00 | 17,2 | 20,2 | | | |
| 12:00 | | | 30 | 1970 | 3,3 |
| 12:15 | 16,3 | 24,2 | | | |
| 13:15 | | | 38 | 1862 | 2,6 |
| 13:30 | 19,6 | 24,1 | | | |
| 14:30 | | | 46 | 2850 | 3,1 |
| DÍA: 24 DE OCTUBRE DEL 2015 | | | | | |
| 11:00 | 16,4 | 21,7 | | | |
| 12:00 | | | 32 | 1962 | 2,3 |
| 12:15 | 19,2 | 25,5 | | | |
| 13:15 | | | 40 | 1907 | 3,5 |
| 13:30 | 19,8 | 24,3 | | | |
| 14:30 | | | 47 | 2924 | 2,7 |
| DÍA: 25 DE OCTUBRE DEL 2015 | | | | | |
| 11:00 | 17,5 | 22,5 | | | |
| 12:00 | | | 33 | 1921 | 3,3 |
| 12:15 | 19,0 | 25,9 | | | |
| 13:15 | | | 41 | 1956 | 3,4 |
| 13:30 | 19,9 | 27,1 | | | |
| 14:30 | | | 48 | 3026 | 2,4 |

Tabla 5. Datos experimentales tomados en el módulo experimental
Elaborado: Por los investigadores.

| HORA | Temperatura ambiente T_a (°C) | Temperatura del agua a la entrada T_{ent} (°C) | Temperatura del agua en tanque T_{tanq} (°C) | Irradiancia Solar I (W/m ²) | Velocidad del viento (Km/h) |
|------------------------------------|---------------------------------------|--|--|---|--------------------------------|
| DÍA: 26 DE OCTUBRE DEL 2015 | | | | | |
| 11:00 | 17,6 | 24,5 | | | |
| 12:00 | | | 35 | 1889 | 4,1 |
| 12:15 | 17,7 | 24,2 | | | |
| 13:15 | | | 43 | 3451 | 3,3 |
| 13:30 | 18,9 | 24,7 | | | |
| 14:30 | | | 50 | 3222 | 3,8 |
| DÍA: 27 DE OCTUBRE DEL 2015 | | | | | |
| 11:00 | 17,4 | 23,4 | | | |
| 12:00 | | | 36 | 1855 | 3,6 |
| 12:15 | 17,9 | 24,6 | | | |
| 13:15 | | | 44 | 2558 | 3,5 |
| 13:30 | 19,2 | 24,9 | | | |
| 14:30 | | | 51 | 3391 | 2,9 |

Tabla 6. Datos experimentales tomados en el módulo experimental
Elaborado: Por los investigadores.



Viernes 23/10/2015

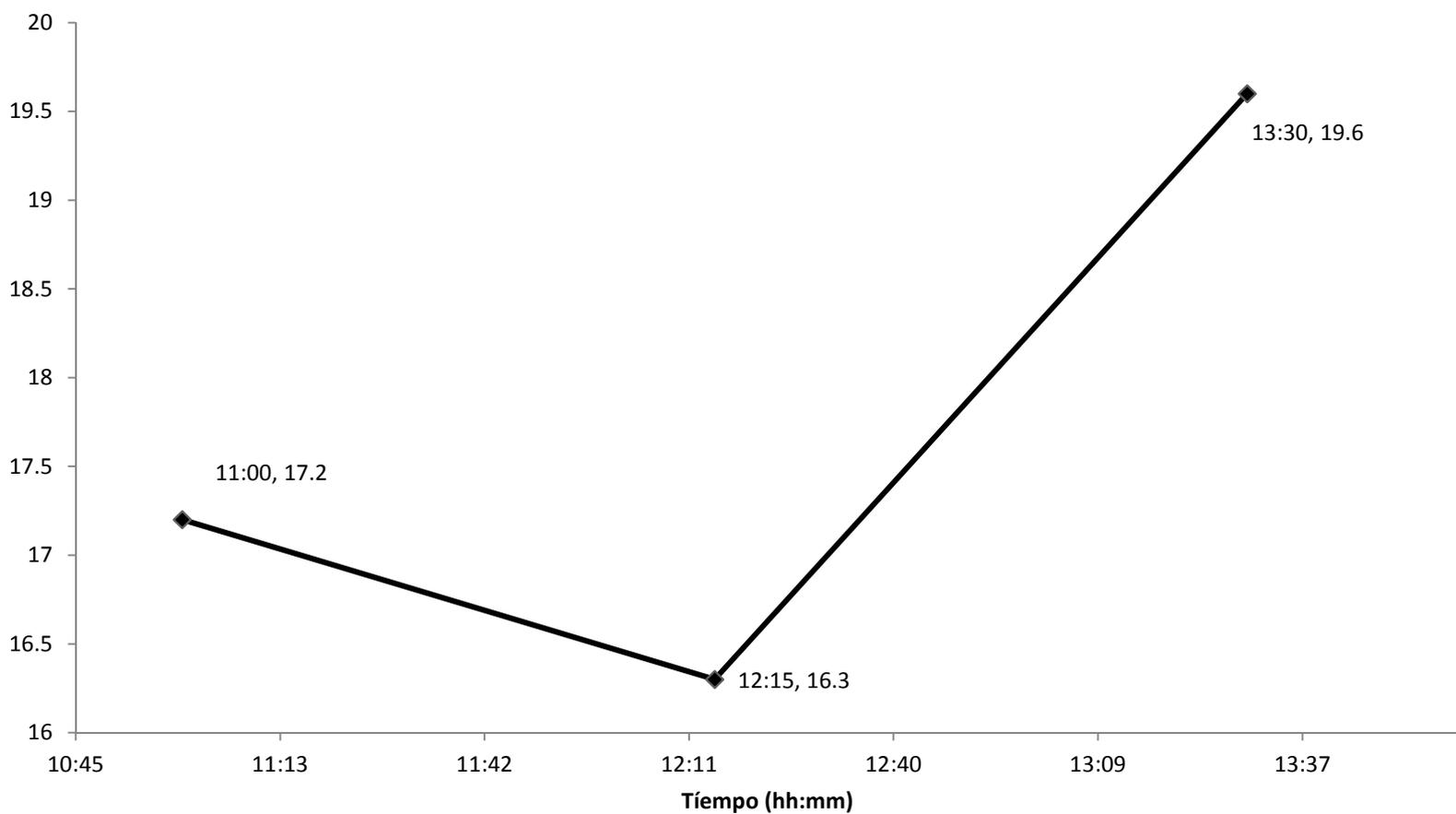


Figura 1. Temperatura ambiente en función del tiempo (horas del día).

Elaborado: Por los investigadores.



Sabado 24/10/2015

Gráfico N° 2

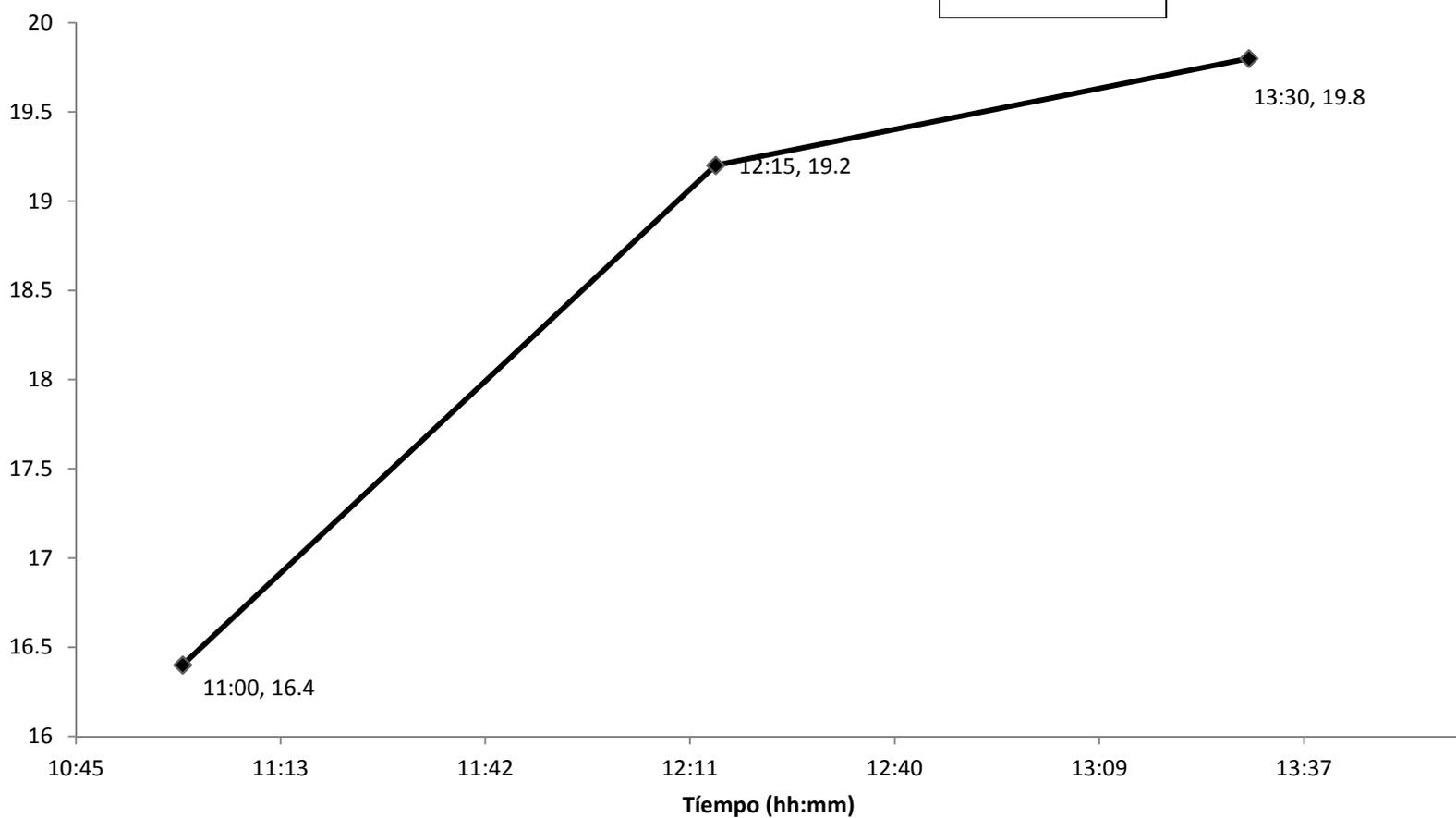


Gráfico 2. Temperatura ambiente en función del tiempo (horas del día).

Elaborado: Por los investigadores.

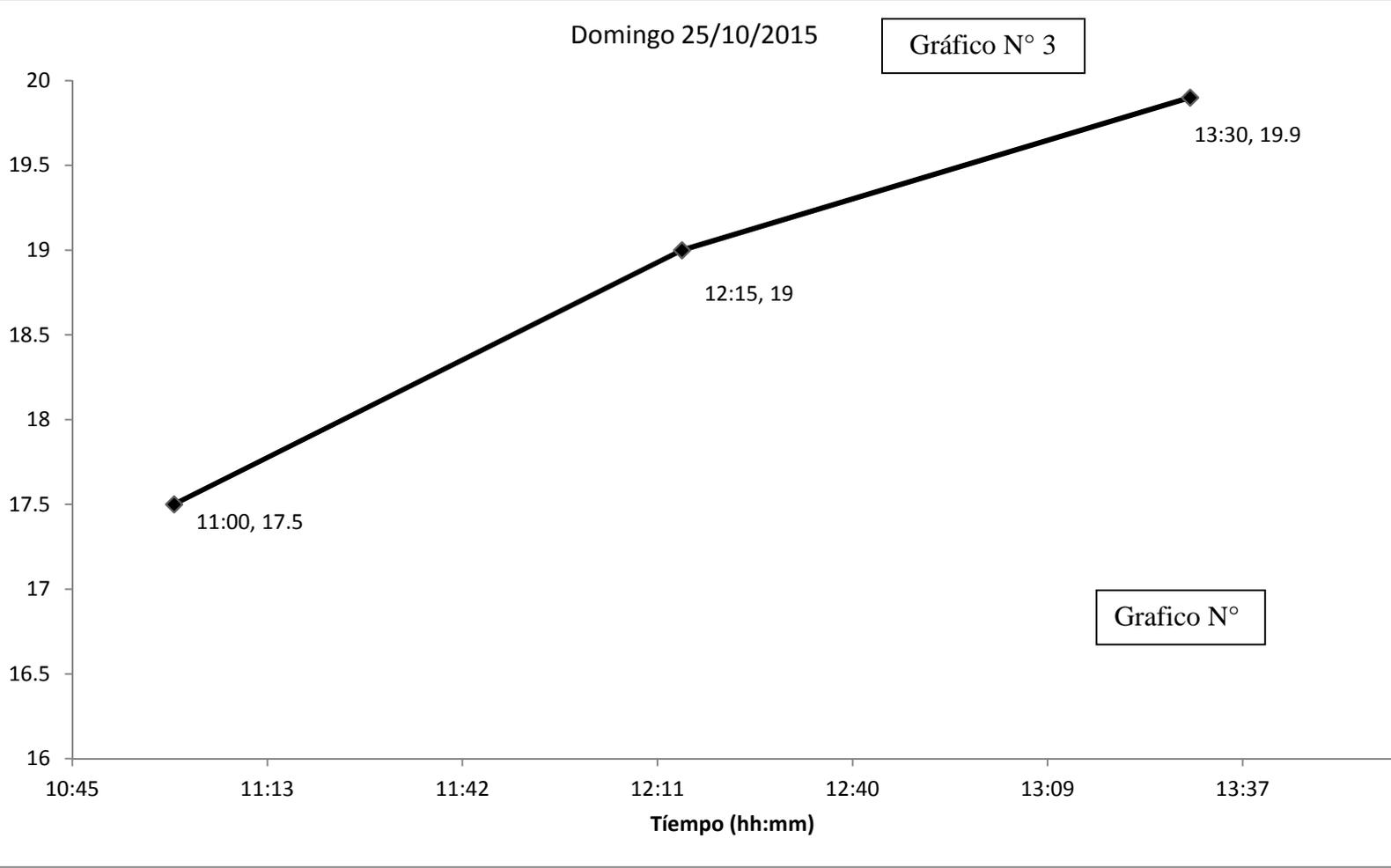


Gráfico 3. Temperatura ambiente en función del tiempo (horas del día).
Elaborado: Por los investigadores.



Lunes 26/10/2015

Gráfico N° 4

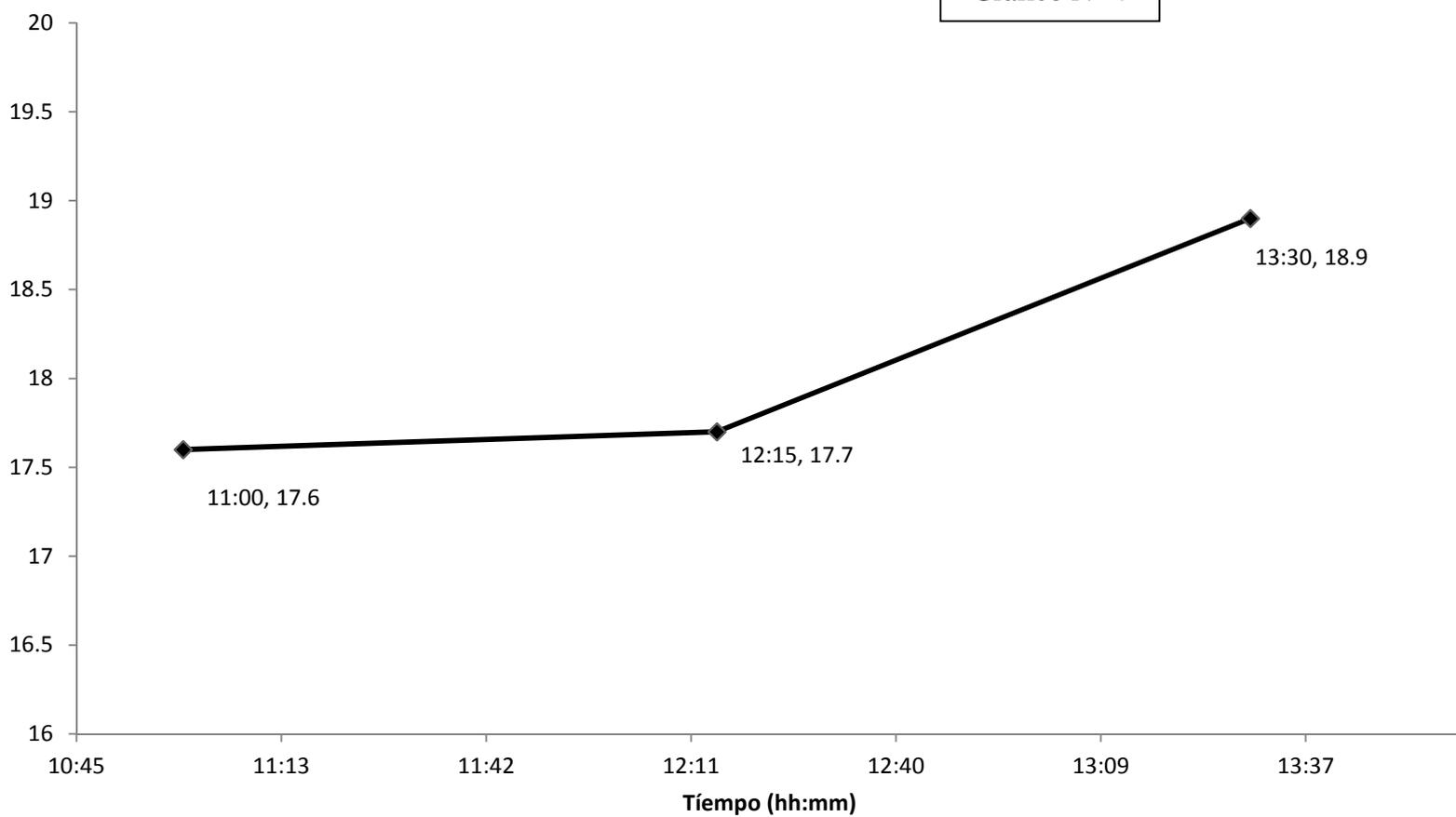


Gráfico 4. Temperatura ambiente en función del tiempo (horas del día).
Elaborado: Por los investigadores.

Martes 27/10/2015

Gráfico N° 5

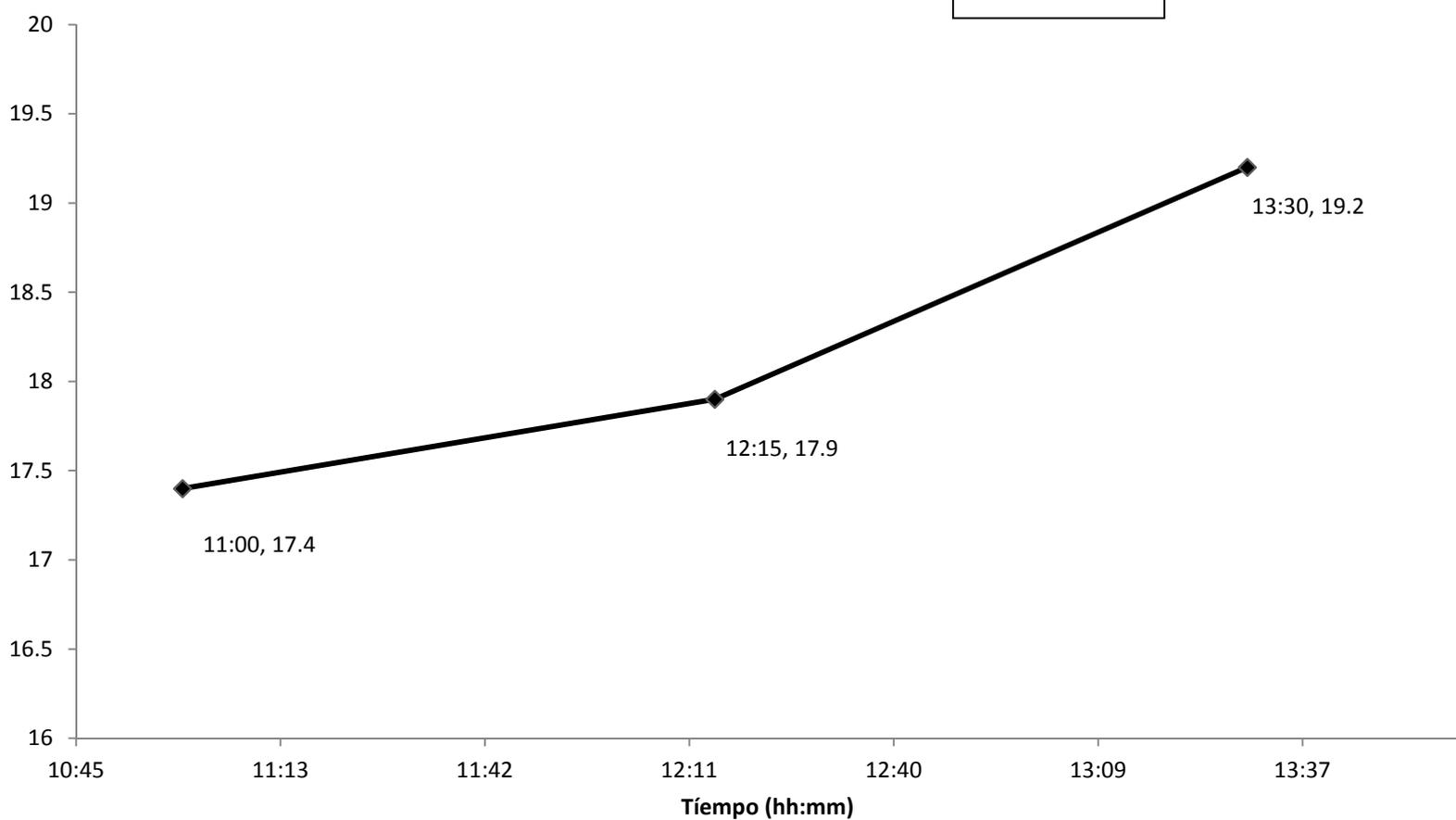


Gráfico 5. Temperatura ambiente en función del tiempo (horas del día).

Elaborado: Por los investigadores.

Viernes 23/10/2015

Gráfico N° 6

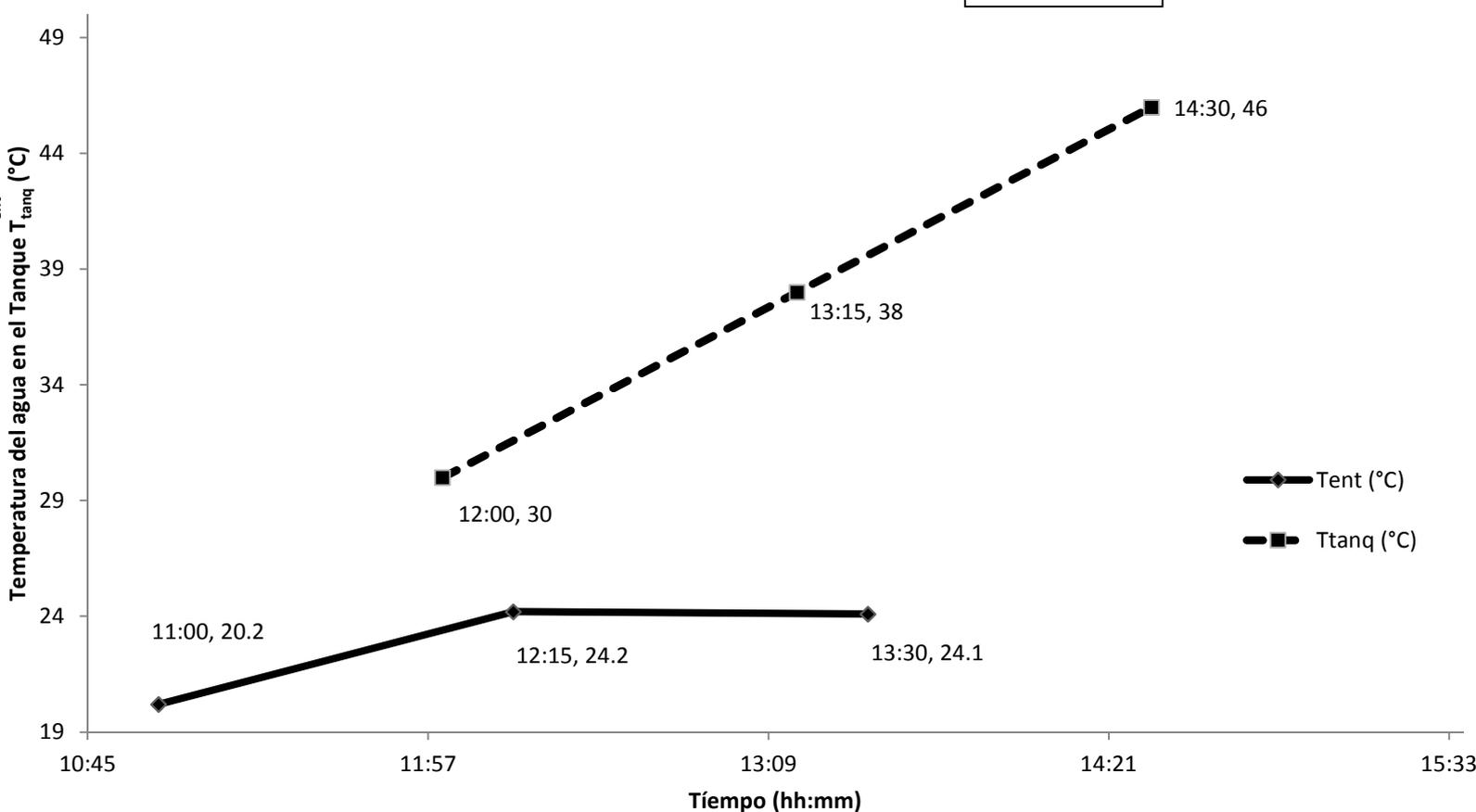


Gráfico 6. Temperatura del agua a la entrada (T_{ent}) y Temperatura del agua en el tanque (T_{tanq}) en función del tiempo (horas del día).
Elaborado: Por los investigadores.

Sábado 24/10/2015

Gráfico N° 7

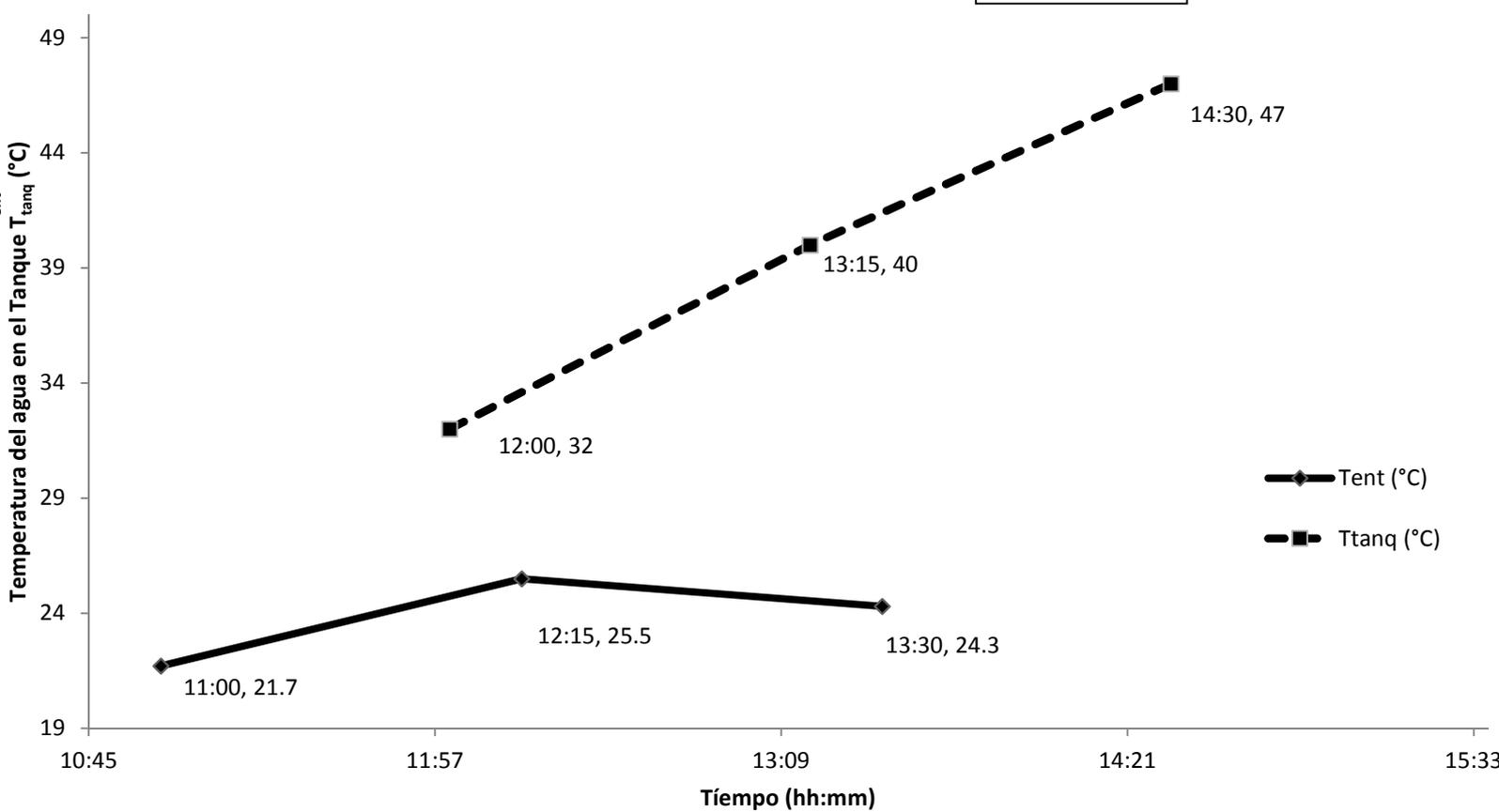


Gráfico 7. Temperatura del agua a la entrada (T_{ent}) y Temperatura del agua en el tanque (T_{tanq}) en función del tiempo (horas del día). Elaborado: Por los investigadores.

Domingo 25/10/2015

Gráfico N° 8

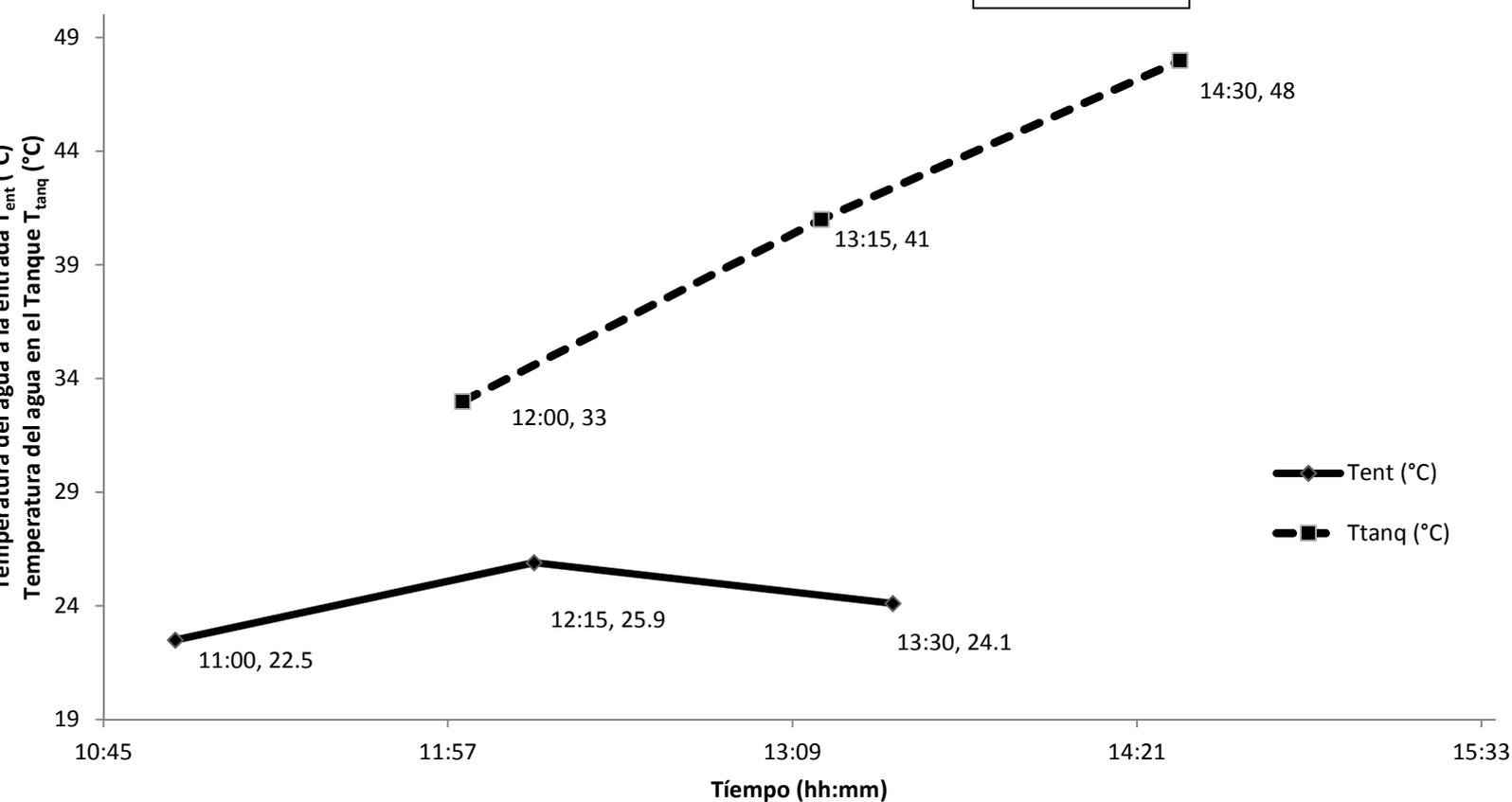


Gráfico 8. Temperatura del agua a la entrada (T_{ent}) y Temperatura del agua en el tanque (T_{tanq}) en función del tiempo (horas del día). Elaborado: Por los investigadores.

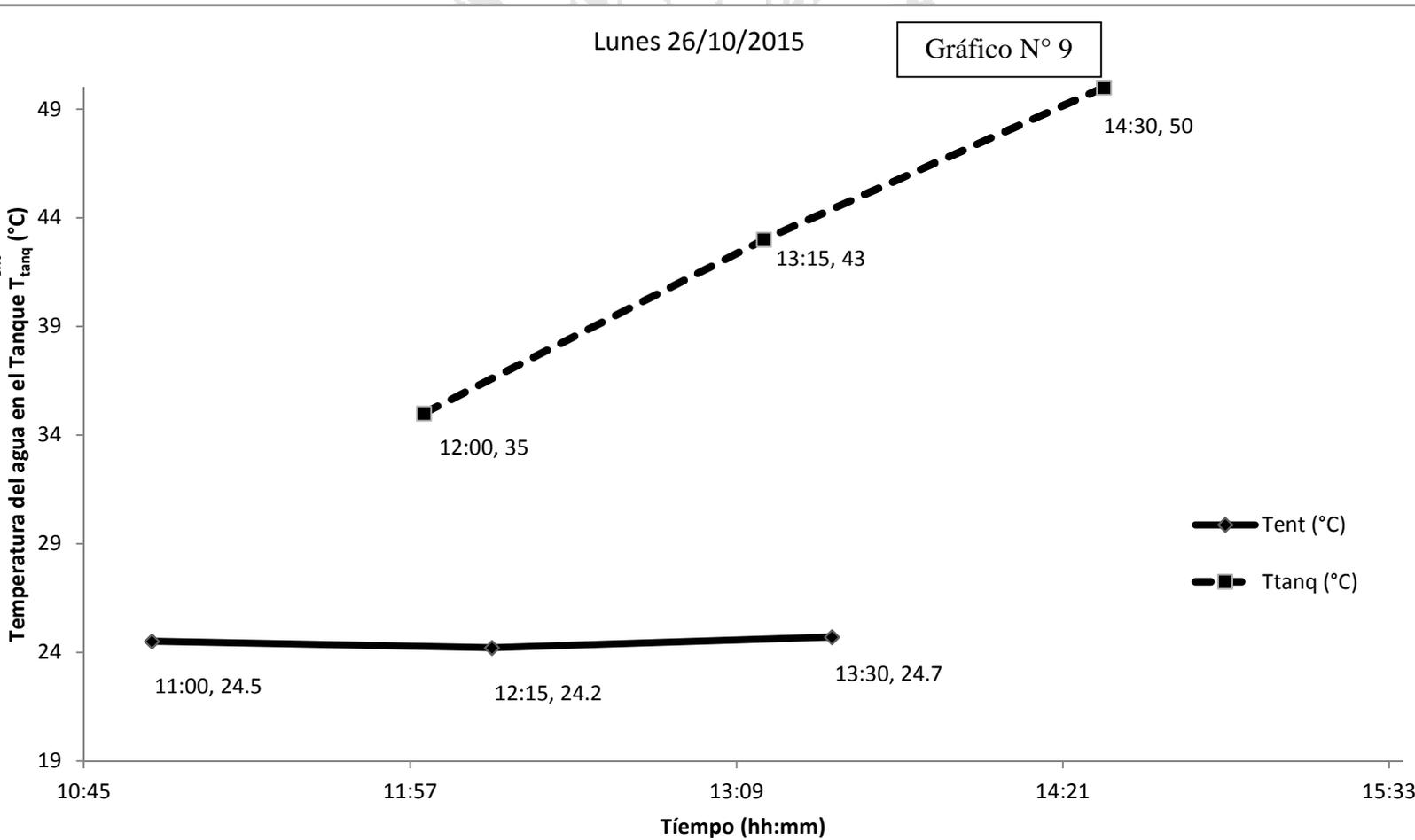


Gráfico 9. Temperatura del agua a la entrada (T_{ent}) y Temperatura del agua en el tanque (T_{tanq}) en función del tiempo (horas del día).
Elaborado: Por los investigadores.

Martes 27/10/2015

Gráfico N° 10

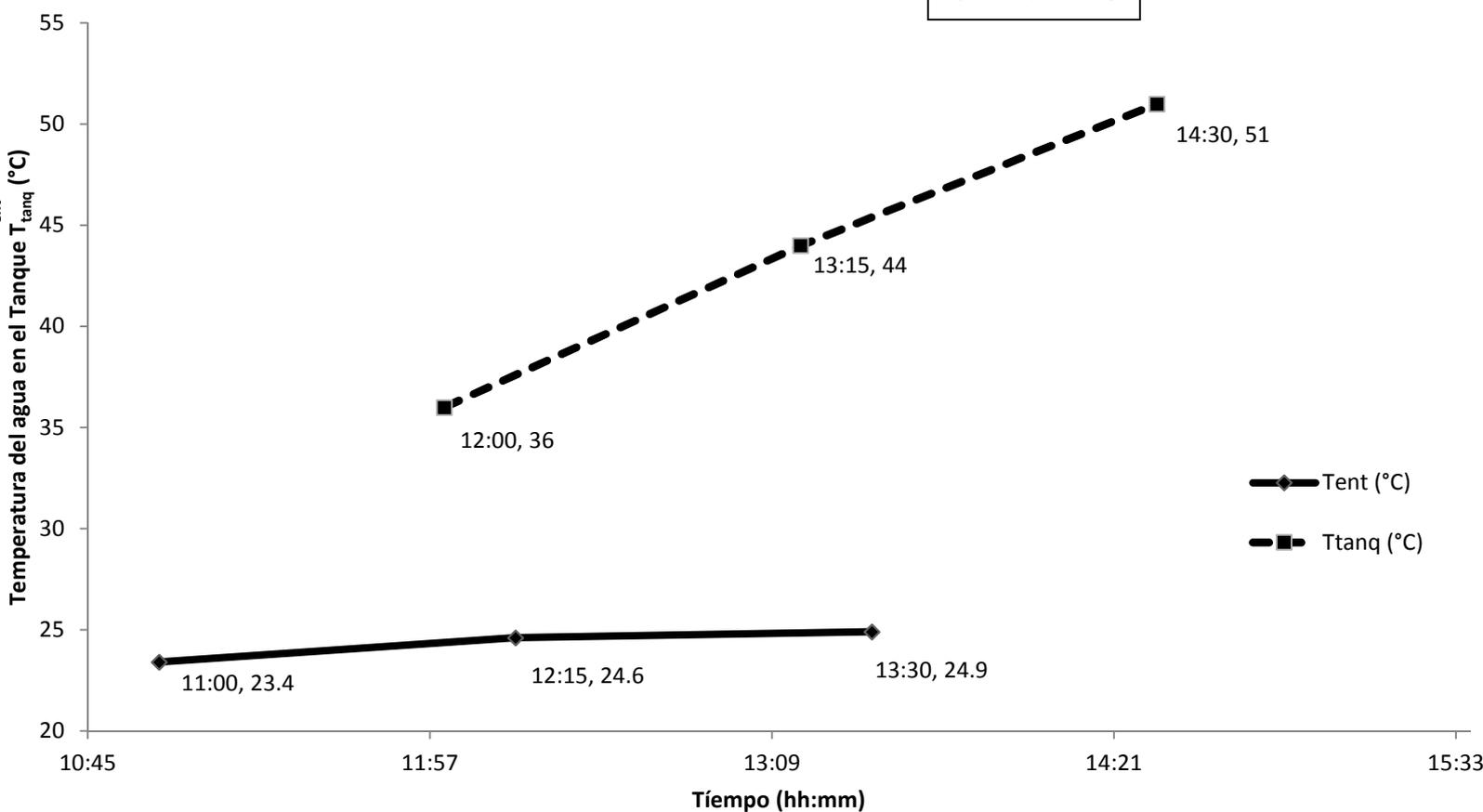


Gráfico 10. Temperatura del agua a la entrada (T_{ent}) y Temperatura del agua en el tanque (T_{tanq}) en función del tiempo (horas del día).
Elaborado: Por los investigadores.

Viernes 23/10/2015

Gráfico N° 11

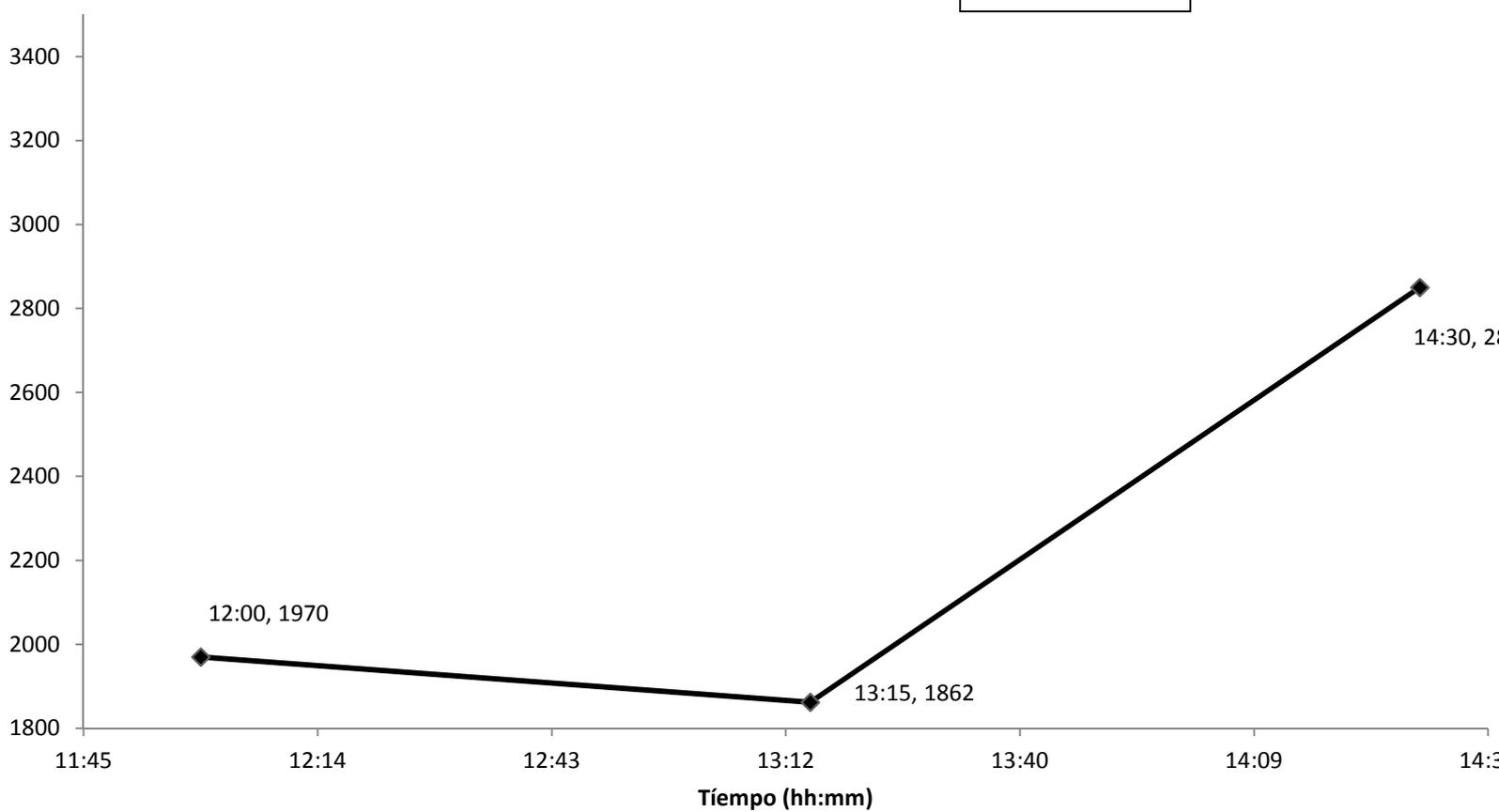


Gráfico 11. Irradiancia solar en función del tiempo (horas del día).
Elaborado: Por los investigadores.

Sábado 24/10/2015

Gráfico N° 12

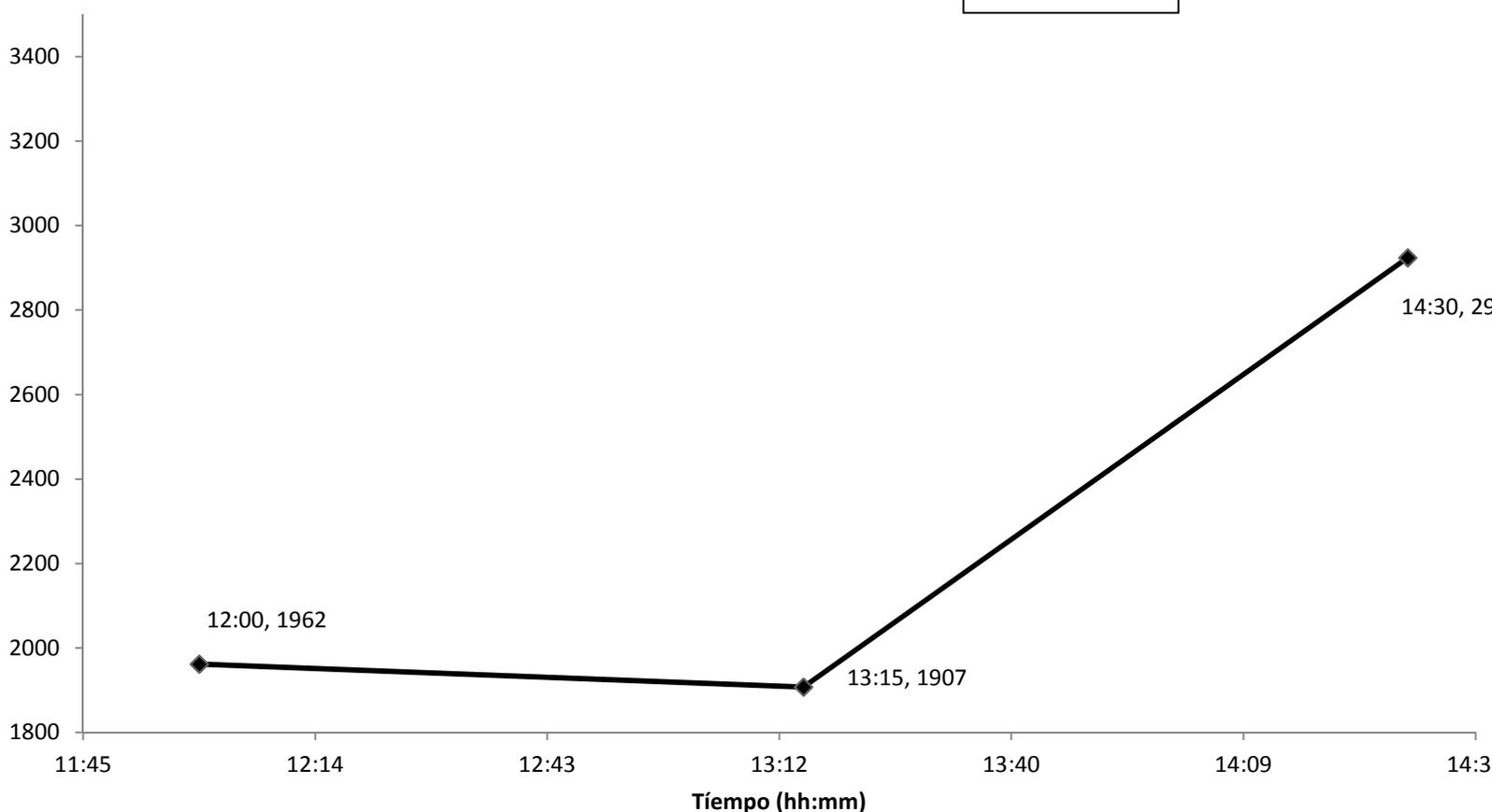


Gráfico 12. Irradiancia solar en función del tiempo (horas del día).

Elaborado: Por los investigadores.

Domingo 25/10/2015

Gráfico N° 13

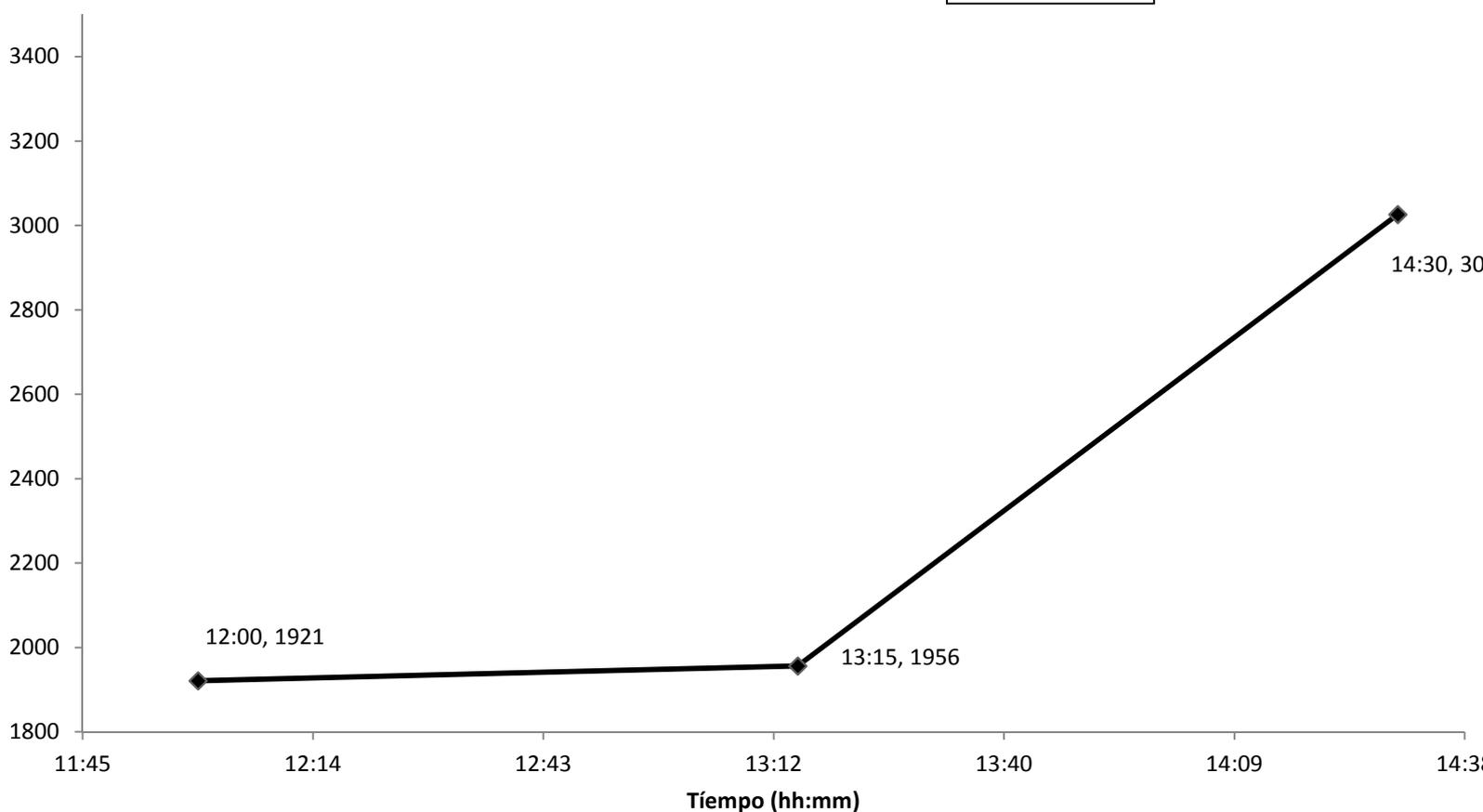


Gráfico 13. Irradiancia solar en función del tiempo (horas del día).

Elaborado: Por los investigadores.

Lunes 26/10/2015

Gráfico N° 14

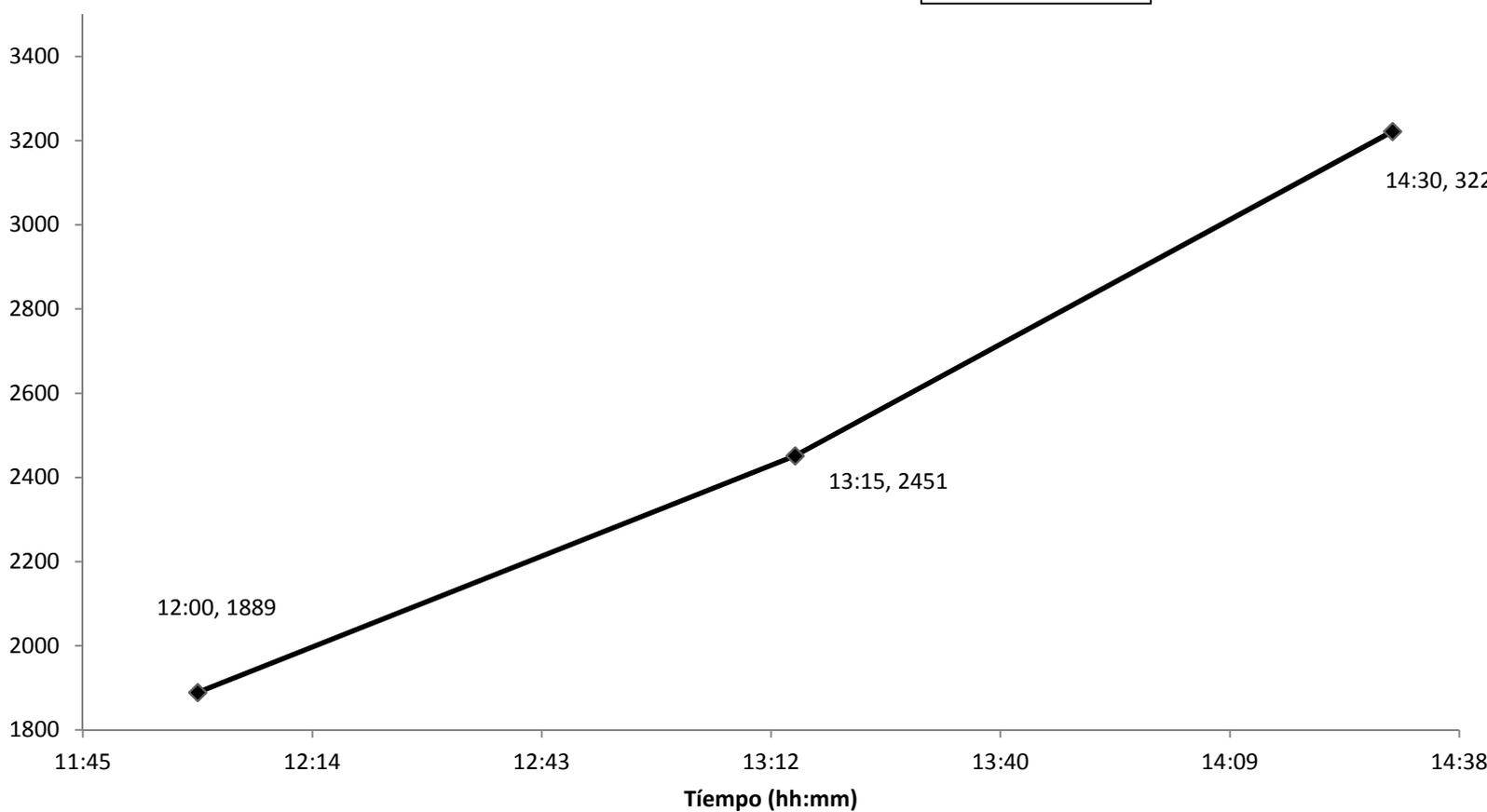


Gráfico 14. Irradiancia solar en función del tiempo (horas del día).

Elaborado: Por los investigadores.

Martes 27/10/2015

Gráfico N° 15

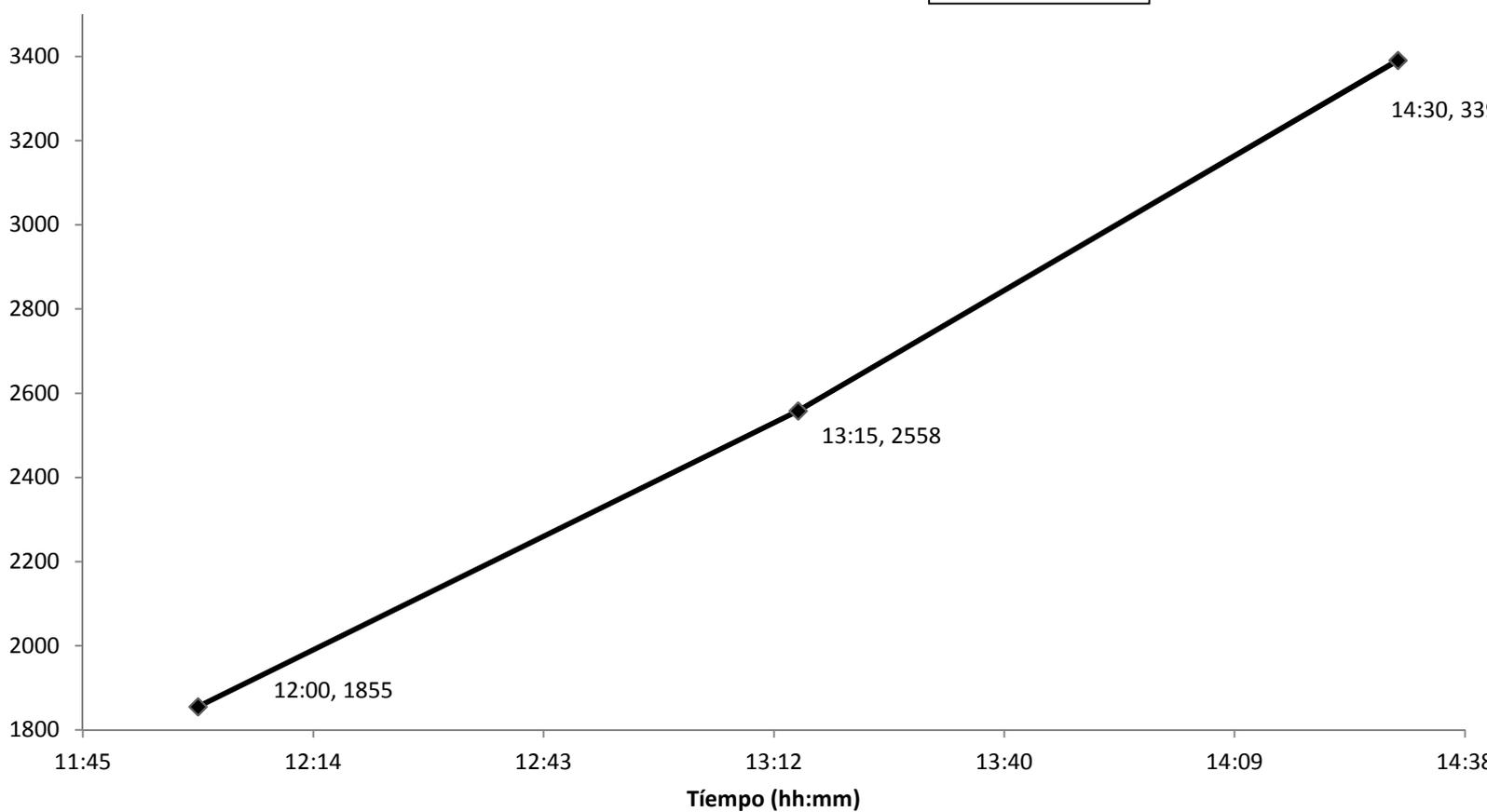


Gráfico 15. Irradiancia solar en función del tiempo (horas del día).

Elaborado: Por los investigadores.



ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 CÁLCULO DE MASA DEL AGUA DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO

DEL AGUA (m_1)

Por razones de cálculos más exactos, el volumen de agua del tanque almacenamiento se halló, desaguando el agua por la válvula inferior del tanque, operación que se realizó dos veces, siempre considerando que el llenado del tanque se realizó con el controlador de nivel del microcomputador, de la misma manera como se llenó el tanque, cuando se realizó la toma de datos experimentales en el módulo de investigación.

Se sabe que la densidad de la agua es igual a: $\rho = \frac{m_1}{V}$

$$\text{Entonces: } m_1 = \rho \cdot V \quad (1)$$

Dónde: V = Volumen de agua contenido en el tanque de almacenamiento.

La medición de este volumen en mL dos veces se muestra en la tabla 3 y 4.

Para el cálculo de la masa, consideramos el promedio de estos dos volúmenes:

$$\bar{V} = \frac{40120 + 40080}{2} \text{ mL}$$

$$\bar{V} = 40100 \text{ mL}$$

$$\text{Pero: } 1 \text{ mL} = 1 \text{ cm}^3 = 10^{-3} \text{ dm}^3$$

Entonces el volumen del agua:

$$\bar{V} = 40100 \times 10^{-3} \text{ dm}^3$$

$$\text{Pero: } 1 \text{ dm}^3 = 1 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\text{Por consiguiente: } \bar{V} = 40,10 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

Considerando la ecuación (I), la densidad del agua varía con la temperatura pero no significativamente⁶, la densidad del agua para nuestros cálculos la asumimos a una temperatura de 35°C, es decir: $\delta = 994 \text{ Kg/m}^3$ valor que es representativo y no afectará los cálculos de ingeniería significativamente.

Por lo tanto la masa del agua en el tanque de almacenamiento es de:

$$m_1 = u \cdot \bar{V}$$

$$m_1 = 994 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} (40,10 \times 10^{-3} \text{ m}^3)$$

$$m_1 = 39,86 \text{ Kg}$$

4.2 CÁLCULO DE LA MASA DEL AGUA EN LOS TUBOS DE VACÍO (m_2)

Para calcular la cantidad de agua contenida en los seis tubos del colector solar, los datos técnicos de la terma solar marca Davsol son con respecto a los tubos de vacío:

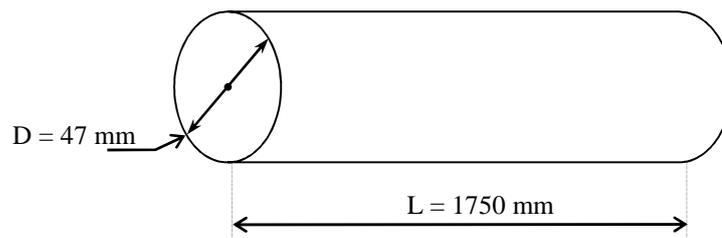
| | |
|-------------------|-----------|
| Número de tubos | : 6 |
| Espesor | : 2 mm |
| Diámetro exterior | : 58 mm |
| Diámetro interior | : 47 mm |
| Longitud | : 1800 mm |
| Longitud útil | : 1750 mm |

Cálculo del volumen de un tubo de vacío, el volumen de un cilindro es igual a:

$$V = \frac{f D^2}{4} \cdot L$$

Considerando el volumen interior del tubo de vacío:

⁶ Mott, Robert: Mecánica de fluidos aplicada, 2010. Editorial Prentice Hall Hispanoamericana, Pág. 535.



$$v = \frac{\pi(47)^2}{4} \cdot 1750 = 3436116.96 \text{ mm}^3$$

Entonces: $V = 3,44 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

Sabemos que: $m = u \cdot V$

La densidad del agua, análoga al acápite 4.1.

$$m = 994 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times 3,44 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$m = 3,42 \text{ Kg}$$

Por consiguiente la masa de agua contenida en los seis tubos al vacío será igual a:

$$m_2 = 6 \times 3.42 = 20,52 \text{ Kg}$$

Por lo tanto el agua total que será calentada en la terma solar será igual a:

$$m = (m_1 + m_2) = 39,86 + 20,52$$

$$m = 60,38 \text{ Kg}$$

4.3 CÁLCULO DE LA EFICIENCIA TÉRMICA

La eficiencia térmica de la terma solar se evaluó con el calor útil o el calor absorbido por el fluido térmico, es decir el agua, Q_u ; y la irradiación solar térmica I y el área del colector de tubos de vacío A_c , como se define en la siguiente ecuación:

$$y_E = \frac{Q_\mu}{I_C} = \frac{Q_\mu}{I \times A_C \times r_s}$$

Dónde: Q_μ : Calor absorbido por el agua

I: irradiación solar que llega al colector solar de tubos de vacío.

α_s : factor de corrección del % de radiación sobre los tubos al vacío

4.3.1 Cálculo del calor útil (Q_u)

El calor ganado o perdido por un sistema cerrado lo podemos calcular aplicando calorimetría, que es un calor útil entregado al agua en el colector de tubos de vacío y se determina con la siguiente ecuación:

$$Q_u = \frac{m \times C_p \times (T_{\text{tanque}} - T_{\text{ent}})}{\Delta t} \quad (A)$$

Donde:

m : El agua en el tanque de almacenamiento más el agua en los 6 tubos de vacío.

C_p : Calor específico del agua

T_{tanque} : temperatura del agua en el tanque

T_{ent} : temperatura del agua a la entrada de la terma solar

Δt : intervalo de tiempo de absorción del calor por el agua.

Donde:

a) m: será igual a la suma de 39,86 Kg más 20,52 Kg que será igual a:

$$m = 60,38 \text{ Kg}$$

b) C_p : parámetro constante para el agua e igual a:

$$C_p = 4,18 \text{ KJ/Kg-}^\circ\text{K}$$

c) $T_{\text{tanque}} - T_{\text{ent}}$: esta diferencia de temperaturas debe estar en grados Kelvin ($^\circ\text{K}$), pero numéricamente, una diferencia de temperaturas en grados kelvin ΔT ($^\circ\text{K}$) es igual a una diferencia de temperatura en grados Celsius ΔT ($^\circ\text{C}$).

$$\Delta T (^\circ\text{K}) = \Delta T (^\circ\text{C})$$

Porque, ejemplo para las dos primeras temperaturas de la Tabla 5:

$$T_{\text{tanque}} = 30^{\circ}\text{C}; \quad T_{\text{ent}} = 20,2^{\circ}\text{C}$$

Entonces:

$$\Delta T (^{\circ}\text{C}) = 30 - 20,2 = 9,8^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T (^{\circ}\text{K}) = (30 + 273) - (20,2 + 273) = 9,8^{\circ}\text{K}$$

Por consiguiente:

$$\Delta T (^{\circ}\text{C}) = \Delta T (^{\circ}\text{K})$$

d) Δt : el intervalo de tiempo considerado en la toma de datos experimentales es

$$1 \text{ hora} = 3600 \text{ segundos.}$$

En la expresión (A), para los datos N° 1, procederemos al cálculo del calor útil

$$Q_{\mu_1} = \frac{m_1 \cdot C_{p_1} (T_{\text{tanque}} - T_{\text{ent}_1})}{\Delta t}$$

$$Q_{\mu_1} = \frac{60,38 \text{ Kg}}{3600 \text{ s}} \cdot 4,18 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot ^{\circ}\text{K}} (30 - 20,2)^{\circ}\text{K}$$

Entonces: $Q_{\mu_1} = 70,11(30 - 20,2) \text{ W} \dots (B)$

Se observa que la cantidad de 70,11 se mantiene constante en los cálculos de los calores útiles restantes, variando solamente el gradiente de temperatura:

$$\Delta T = T_{\text{tanq.}} - T_{\text{ent.}}; \text{ en el } Q_{\mu_1} \text{ es igual a } (30 - 30,2).$$

Entonces para la lectura número 1:

$$Q_{\mu_1} = 687,08 \text{ W.}$$

Para los cálculos de los calores útiles restantes se utilizará la expresión (B) en la que variará solo la gradiente de temperatura.

| HORA | T _{tanq} (°C) | T _{ent} (°C) | UT° (°C) | Q _u (W) |
|------------------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------|-----------------------|
| DÍA: 23 DE OCTUBRE DEL 2015 | | | | |
| 11:00 | 30 | 20,2 | 9,8 | 687,08 |
| 13:15 | 38 | 24,2 | 13,8 | 967,52 |
| 14:30 | 46 | 24,1 | 21,9 | 1535,41 |
| DÍA: 24 DE OCTUBRE DEL 2015 | | | | |
| 11:00 | 32 | 21,7 | 10,3 | 722,13 |
| 13:15 | 40 | 25,5 | 14,5 | 1016,60 |
| 14:30 | 47 | 24,3 | 22,7 | 1591,50 |
| DÍA: 25 DE OCTUBRE DEL 2015 | | | | |
| 11:00 | 33 | 22,5 | 10,5 | 736,16 |
| 13:15 | 41 | 25,9 | 15,1 | 1058,66 |
| 14:30 | 48 | 24,1 | 23,9 | 1675,63 |
| DÍA: 26 DE OCTUBRE DEL 2015 | | | | |
| 11:00 | 35 | 24,5 | 10,5 | 736,16 |
| 13:15 | 43 | 24,2 | 18,8 | 1318,07 |
| 14:30 | 50 | 24,7 | 25,3 | 1773,78 |
| DÍA: 27 DE OCTUBRE DEL 2015 | | | | |
| 11:00 | 36 | 23,4 | 12,6 | 883,39 |
| 13:15 | 44 | 24,6 | 19,4 | 1360,13 |
| 14:30 | 51 | 24,9 | 26,1 | 1829,87 |

Tabla 7. Cálculo del calor útil
Elaborado: Por los investigadores.

4.3.2 Cálculo de la Irradiación sobre el colector solar

Para la determinación experimental de la eficiencia térmica de la terma solar de tubos de vacío es necesario calcular la cantidad de calor solar incidente sobre el colector de seis tubos, la expresión que se muestra a continuación nos permite calcular dicho valor⁷.

$$I_C = I \cdot \alpha_s \cdot A_C$$

Donde:

- a) I, es la irradiación solar medida con el piranómetro según el procedimiento de lectura de datos experimentales. La terma solar se montó en un lugar donde la radiación solar no sea interferida en ningún momento del día por sombras de edificio, árboles, etc. El piranómetro empleado midió la irradiación solar en W/m^2 .
- b) α_s , es el factor de corrección que determina el porcentaje de la radiación incidente que llega a los tubos de vacío y es calculado por la expresión:

$$r_s = \frac{\tau \alpha}{1 - (1 - \tau) \rho_d}$$

Donde:

τ , es la transmisividad de los tubos de vidrio de boro silicato cuyo valor es $\tau = 0,74$ y tiene una emisividad $\epsilon = 0,88$.

α , es la absorptividad de los tubos recubiertos de nitrato de aluminio y es igual a $\alpha = 0,99$ y su emisividad es $\epsilon_p = 0,1$.

ρ_d , es la reflectancia difusa, la misma que para tubos de vacío es igual a $\rho_d = 0,16$.

Por lo tanto, efectuando el cálculo del factor de corrección:

$$r_s = \frac{0,74(0,99)}{1 - (1 - 0,99)0,16}$$

$$r_s = 0,73$$

⁷ Cengel, Yanus: Transferencia de calor, 2004, Editorial McGraw Hill, 2da. Edición, México, pp. 504-560.

c) A_c , es el área del colector solar de la terma solar, es decir el área de incidencia de la irradiación solar, la cual en la terma solar está constituida por el área del colector solar de seis tubos de vacío. Consideramos que cualquiera que sea la ubicación del sol, solamente la radiación solar llegará a la mitad de los tubos de vacío, razón por la que solo se consideró la mitad de la superficie cilíndrica de cada tubo de vacío para el cálculo de A_c , el área del colector solar.

$$A_c = \frac{f \cdot D_e \cdot L}{2} \cdot n$$

Dónde: D_e : diámetro exterior del tubo de vacío

L : Longitud útil del tubo de vacío

n : número de tubos de vacío

$$A_c = \frac{f \cdot (0,058 \text{ m}) \cdot (1,750 \text{ m})}{2} \cdot 6 = 0,96 \text{ m}^2$$

Entonces la irradiación sobre el colector solar (I_c), se calculó para cada uno de los 15 datos experimentales a través de la expresión:

$$I_c = I \cdot \alpha_s \cdot A_c$$

Reemplazando los cálculos efectuados:

$$I_c = \left(I \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right) (0,73) (0,96 \text{ m}^2)$$

$$I_c = 0,7008 I \quad \text{W} \quad \text{(E)}$$

La ecuación (E) nos permitirá calcular la irradiación solar sobre el colector solar de tubos al vacío (I_c) para los datos experimentales; donde 0,708 es constante y solo variará la irradiación solar (I) cuyos valores los obtuvimos de las tablas 5 y 6. Efectuando el primer cálculo para el dato experimental número 1: $I_1 = 1970 \text{ W/m}^2$.

Obtenemos reemplazando en (E):

$$I_{c1} = 0,7008 (1970) = 1380,58 \text{ W}$$

Análogamente se calculó para los restantes datos experimentales, cuyos resultados se muestran en la tabla:

| HORA | Irradiancia Solar I (W/m ²) | Irradiación sobre el colector I _c (W) |
|------------------------------------|---|--|
| DÍA: 23 DE OCTUBRE DEL 2015 | | |
| 12:00 | 1970 | 1380,58 |
| 13:15 | 1862 | 1304,89 |
| 14:30 | 2850 | 1997,28 |
| DÍA: 24 DE OCTUBRE DEL 2015 | | |
| 12:00 | 1962 | 1374,97 |
| 13:15 | 1907 | 1336,43 |
| 14:30 | 2924 | 2049,14 |
| DÍA: 25 DE OCTUBRE DEL 2015 | | |
| 12:00 | 1921 | 1346,24 |
| 13:15 | 1956 | 1370,76 |
| 14:30 | 3026 | 2120,62 |
| DÍA: 26 DE OCTUBRE DEL 2015 | | |
| 12:00 | 1889 | 1323,81 |
| 13:15 | 2451 | 1717,66 |
| 14:30 | 3222 | 2257,98 |
| DÍA: 27 DE OCTUBRE DEL 2015 | | |
| 12:00 | 1855 | 1299,98 |
| 13:15 | 2558 | 1792,65 |
| 14:30 | 3391 | 2376,41 |

Tabla 8. Cálculo de las irradiaciones solares sobre el colector solar de tubos al vacío.
Elaborado: Por los investigadores.

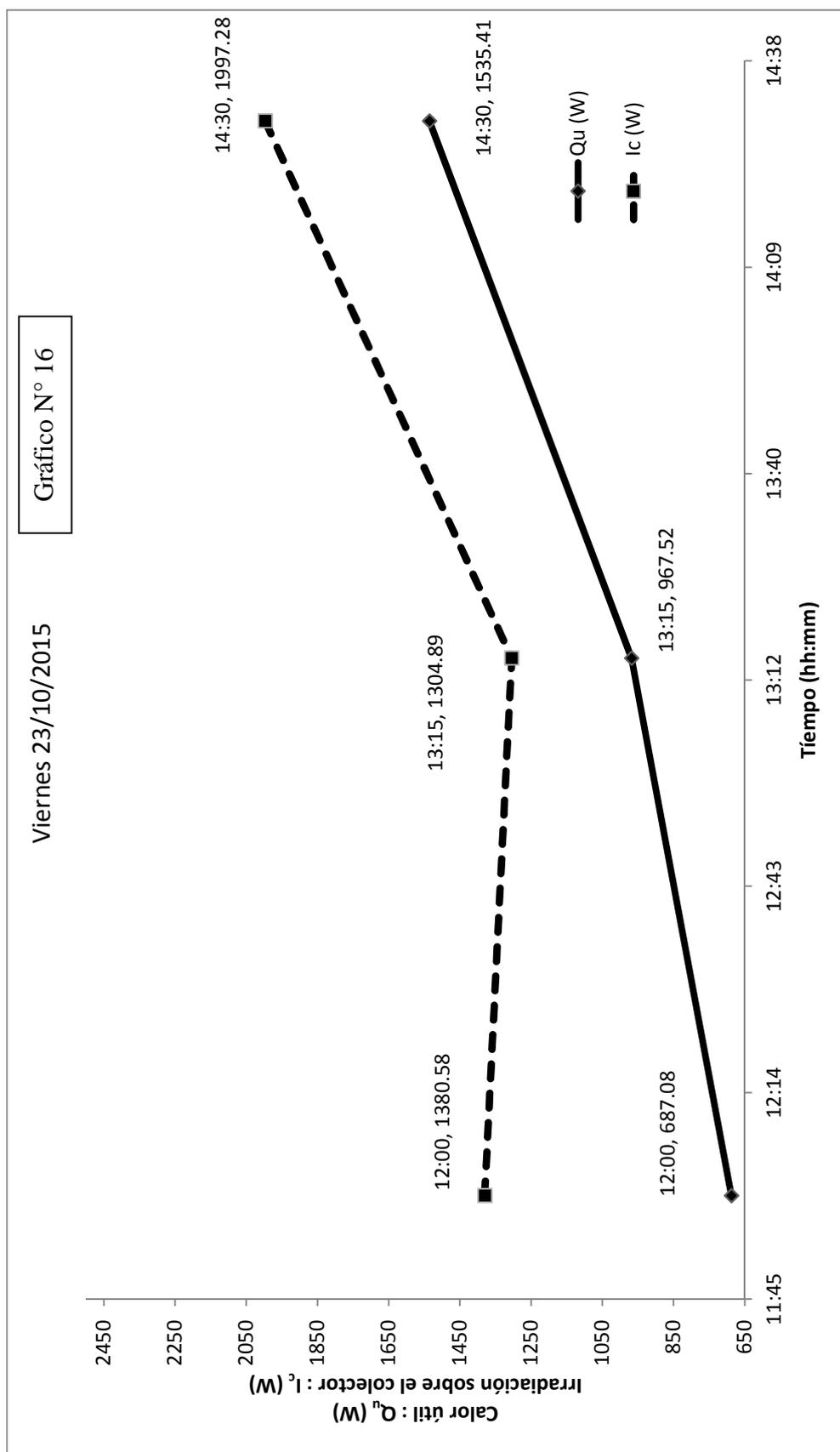


Gráfico 16. Calor útil (Q_u) e Irradiación sobre el colector (I_c) en función del tiempo (horas del día).
Elaborado: Por los investigadores.

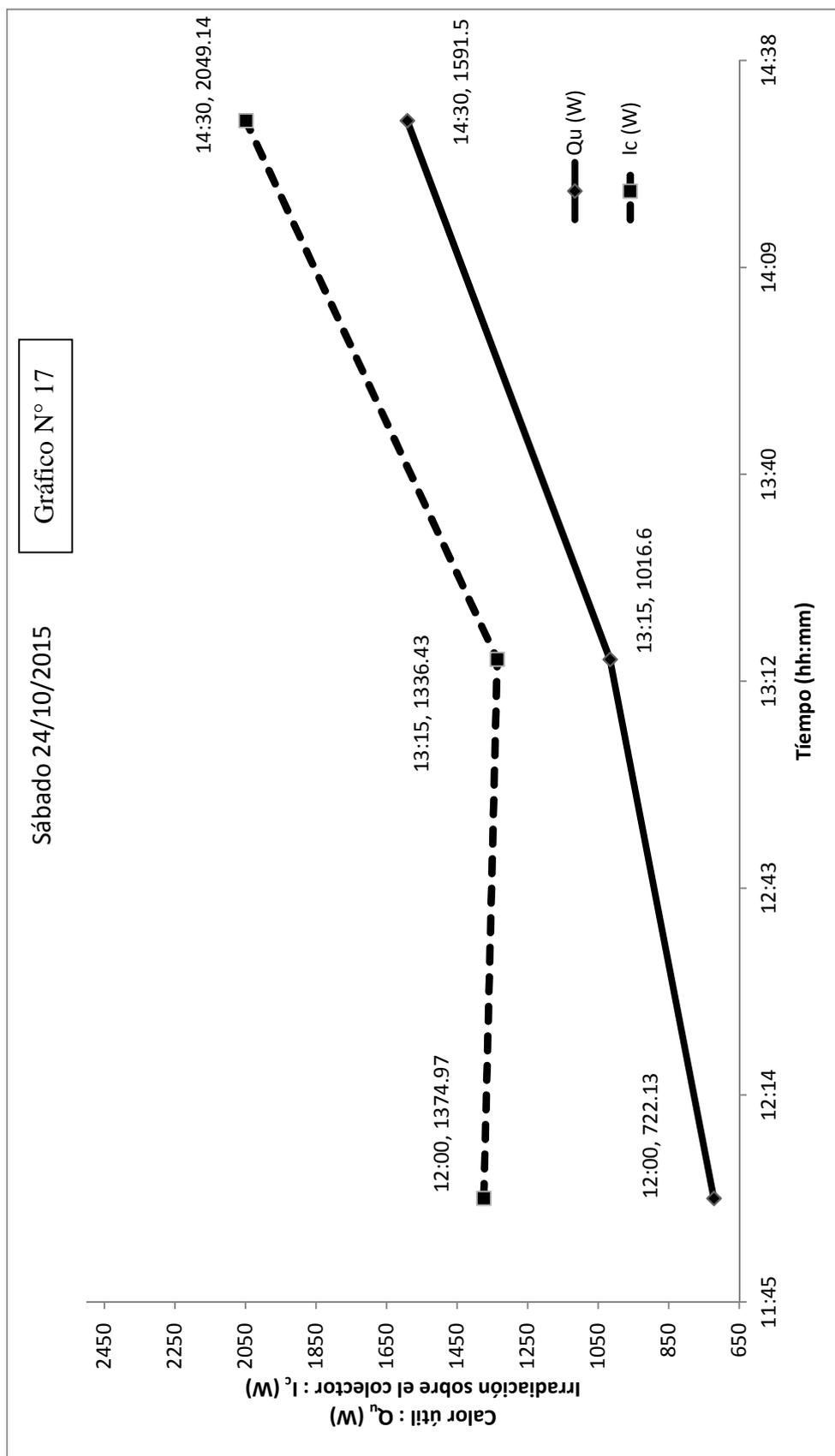


Gráfico 17. Calor útil (Q_u) e Irradiación sobre el colector (I_c) en función del tiempo (horas del día).
Elaborado: Por los investigadores.

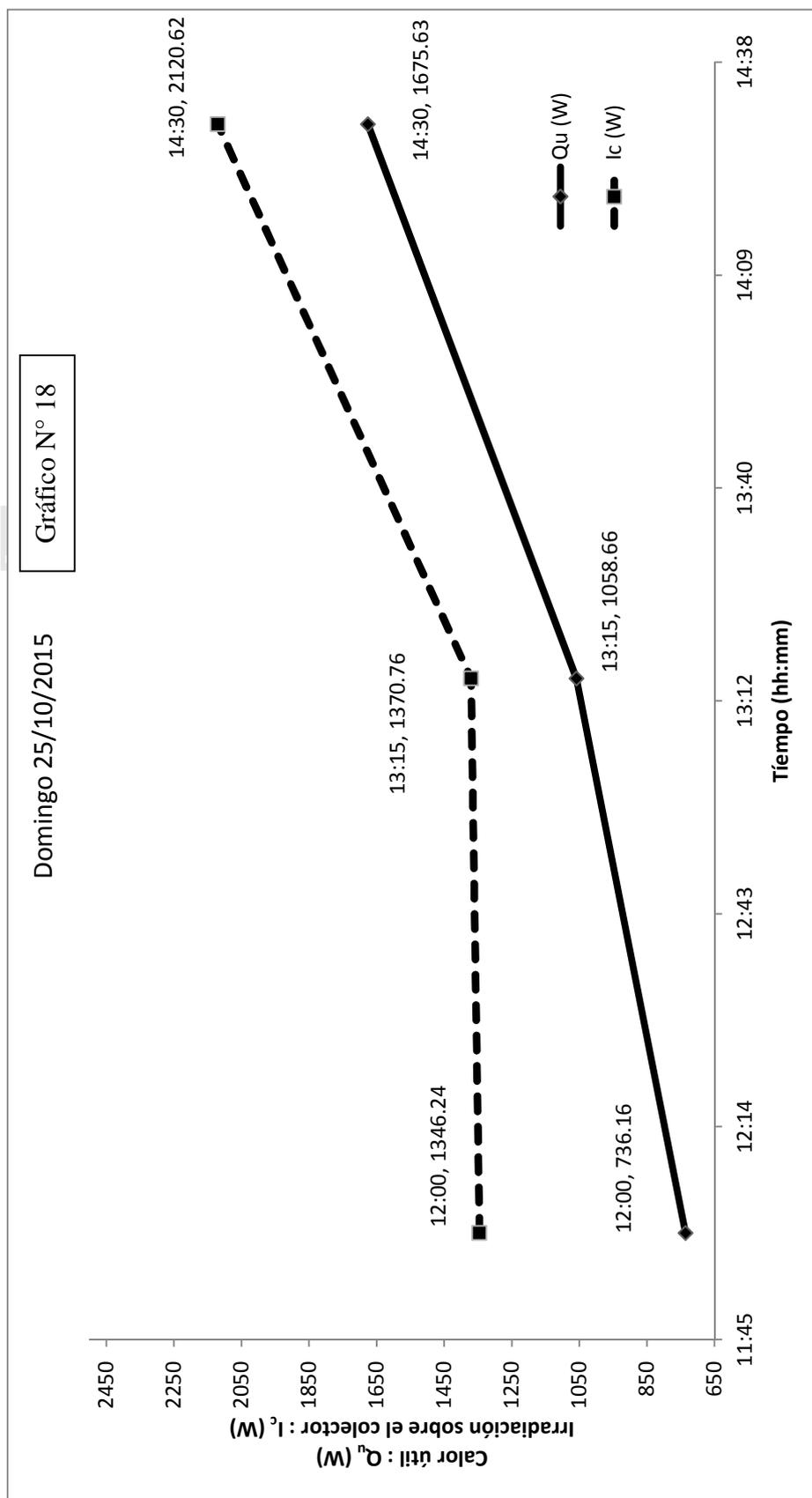


Gráfico 18. Calor útil (Q_u) e Irradiación sobre el colector (I_c) en función del tiempo (horas del día).
Elaborado: Por los investigadores.

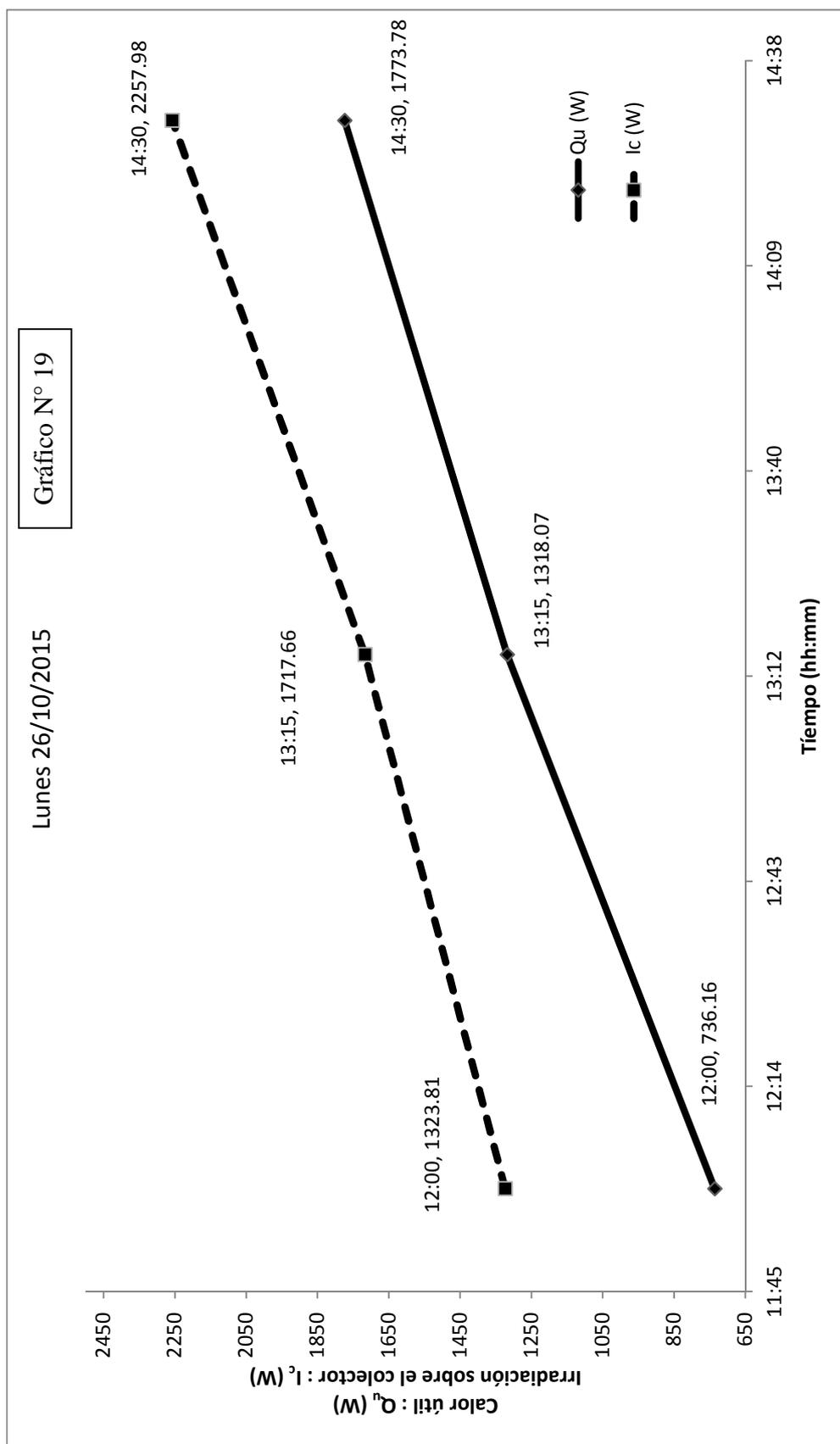


Gráfico 19. Calor útil (Q_u) e Irradiación sobre el colector (I_c) en función del tiempo (horas del día).
Elaborado: Por los investigadores.

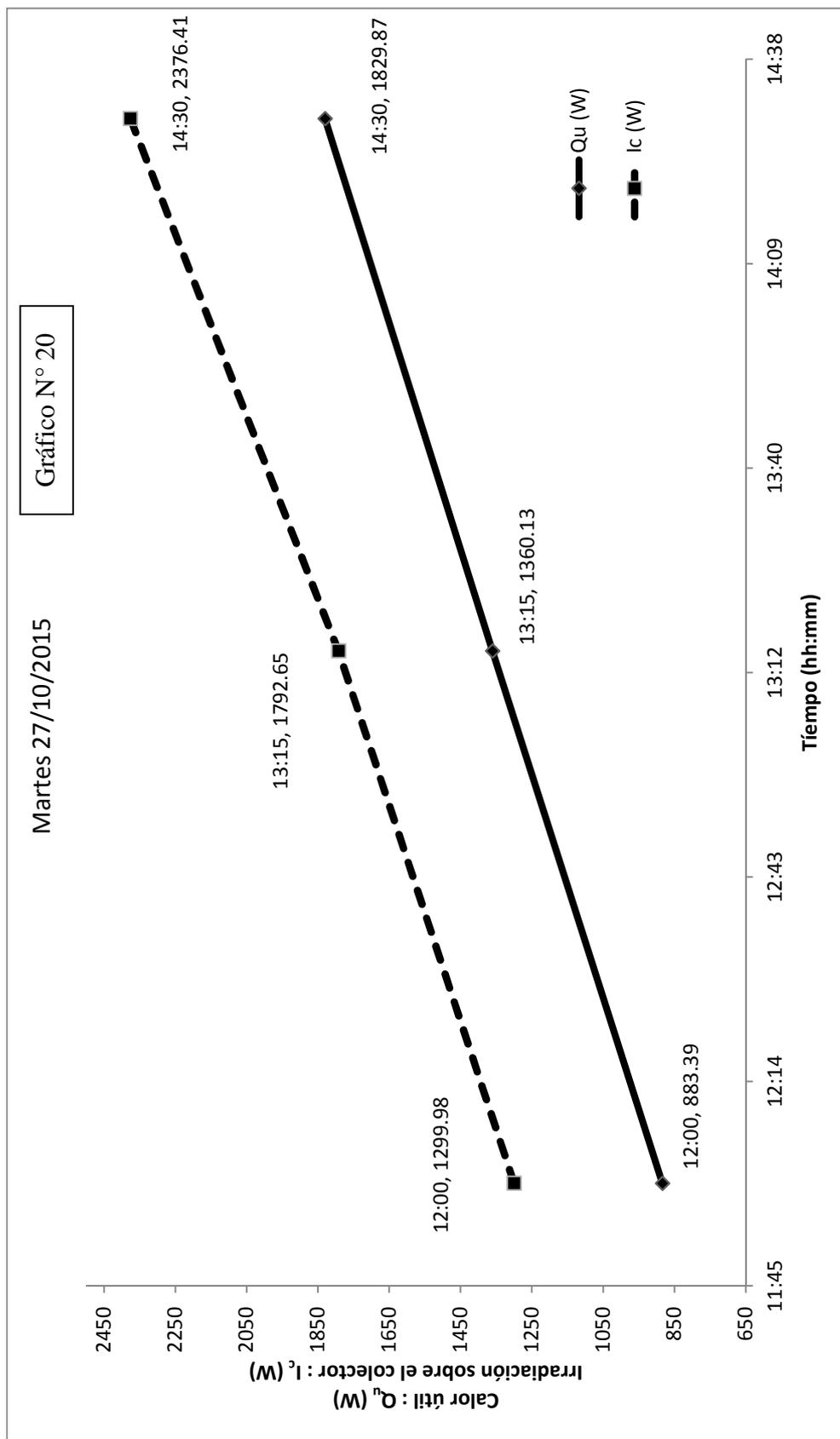


Gráfico 20. Calor útil (Q_u) e Irradiación sobre el colector (I_c) en función del tiempo (horas del día).
Elaborado: Por los investigadores.

4.3.3 Cálculo de la Eficiencia Térmica

Realizado los cálculos preliminares del calor útil absorbido por el agua en la terma solar (Q_u) y la irradiación solar térmica (I_c) que incide sobre el área del colector solar de tubos de vacío, se procedió al cálculo de la eficiencia térmica de la terma solar, considerando que los datos experimentales se midieron a partir de las 11:00 a.m. con intervalos de 1 hora entre cada medición, culminándose aproximadamente a las 14:30 p.m. del día; durante los cinco días seguidos.

La ecuación empleada fue:

$$y_E(\%) = \frac{Q_u}{I_c} \times 100 = \frac{Q_u}{I \cdot r \cdot A_c} \times 100$$

Calculando la eficiencia térmica para el primer dato, utilizando los cálculos efectuados para el calor útil (Q_u) de la Tabla 7 y la irradiación solar sobre el colector (I_c) de la tabla 8; se tiene:

$$Q_{u_1} = 687,08 \text{ W}$$

$$I_{c_1} = 1380,58 \text{ W}$$

Por consiguiente:

$$y_{E_1} = \frac{687,08 \text{ W}}{1380,58 \text{ W}} \times 100$$

$$y_{E_1} = 49,77\%$$

Análogamente se procedió para el cálculo de las demás eficiencia térmicas, las que se muestran en la tabla 9.

| HORA | Calor útil Q_u (W) | Irradiación sobre el colector I_c (W) | Eficiencia Térmica η_E (%) |
|------------------------------------|----------------------------|--|---------------------------------------|
| DÍA: 23 DE OCTUBRE DEL 2015 | | | |
| 12:00 | 687,08 | 1380,58 | 49,77 |
| 13:15 | 967,52 | 1304,89 | 74,15 |
| 14:30 | 1535,41 | 1997,28 | 76,88 |
| DÍA: 24 DE OCTUBRE DEL 2015 | | | |
| 12:00 | 722,13 | 1374,97 | 52,52 |
| 13:15 | 1016,60 | 1336,43 | 76,07 |
| 14:30 | 1591,50 | 2049,14 | 77,67 |
| DÍA: 25 DE OCTUBRE DEL 2015 | | | |
| 12:00 | 736,16 | 1346,24 | 54,68 |
| 13:15 | 1058,66 | 1370,76 | 77,23 |
| 14:30 | 1675,63 | 2120,62 | 79,02 |
| DÍA: 26 DE OCTUBRE DEL 2015 | | | |
| 12:00 | 736,16 | 1323,81 | 55,61 |
| 13:15 | 1318,07 | 1717,66 | 76,74 |
| 14:30 | 1773,78 | 2257,98 | 78,56 |
| DÍA: 27 DE OCTUBRE DEL 2015 | | | |
| 12:00 | 883,39 | 1299,98 | 67,95 |
| 13:15 | 1360,13 | 1792,65 | 75,87 |
| 14:30 | 1829,87 | 2376,41 | 76,99 |

Tabla 9. Cálculo de las eficiencias térmicas
Elaborado: Por los investigadores

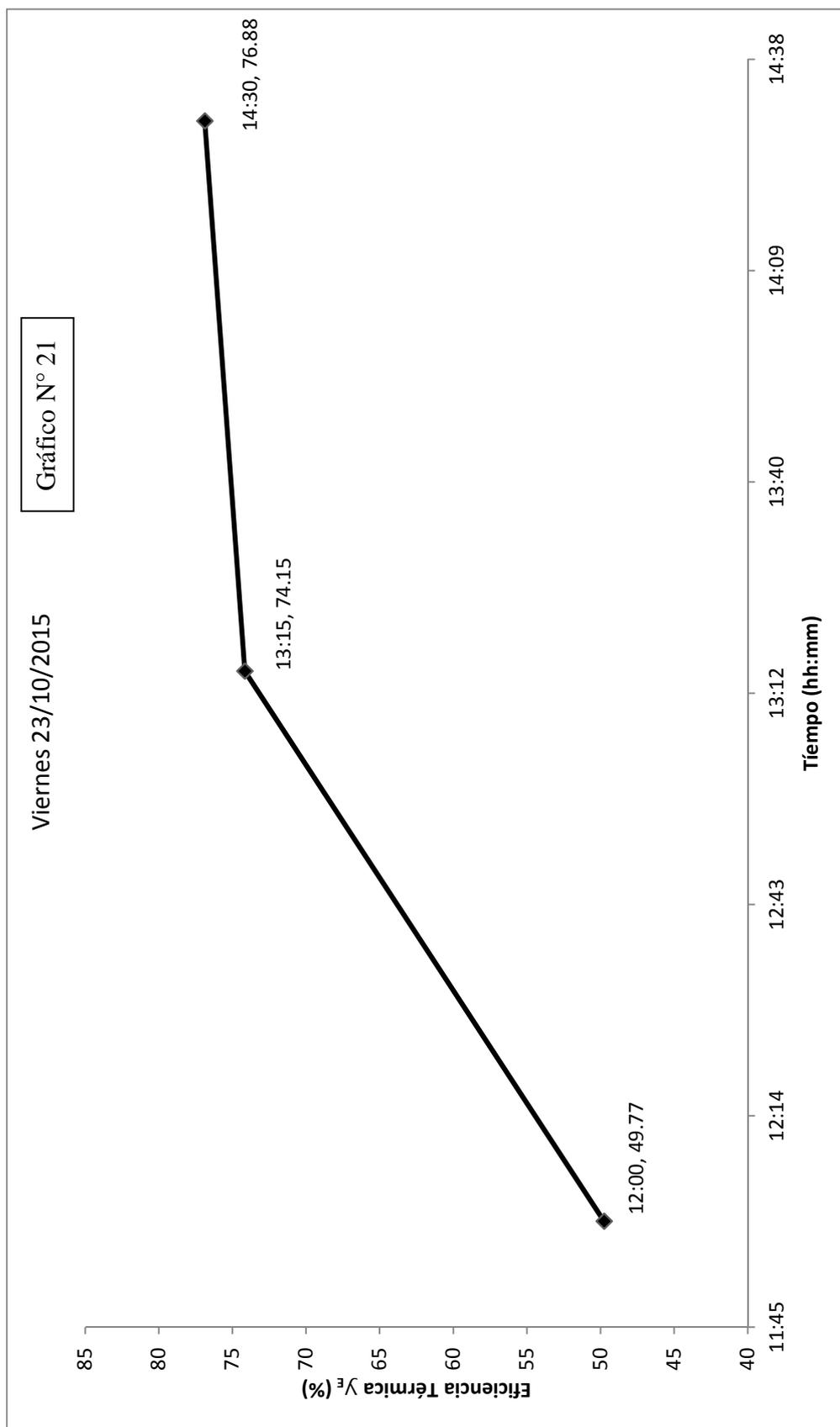


Gráfico 21. Eficiencia Térmica η_E (%) en función del tiempo (horas del día).
Elaborado: Por los investigadores.

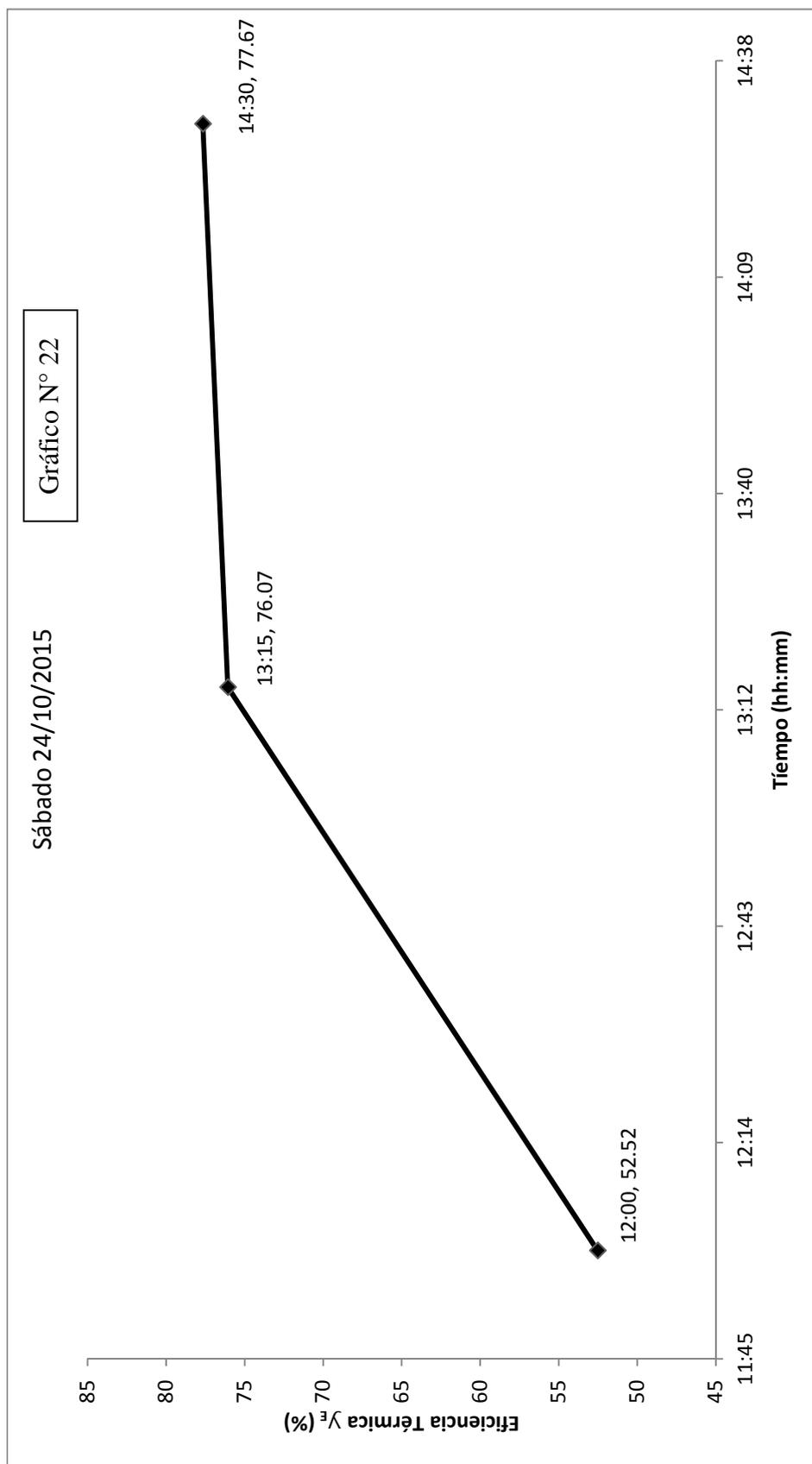


Gráfico 22. Eficiencia Térmica η_E (%) en función del tiempo (horas del día).
Elaborado: Por los investigadores



Domingo 25/10/2015

Gráfico N° 23

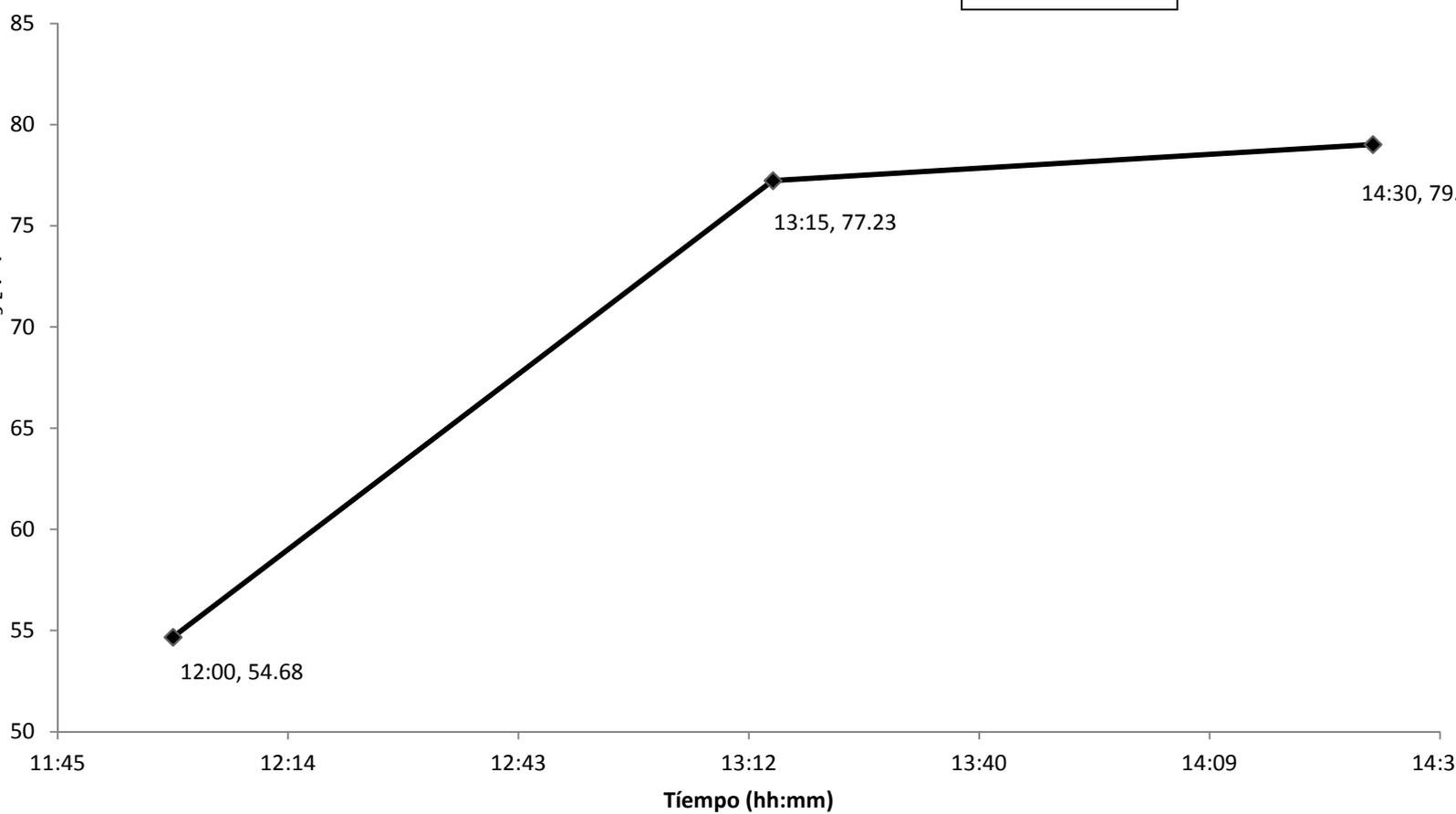


Gráfico 23. Eficiencia Térmica η_E (%) en función del tiempo (horas del día).
Elaborado: Por los investigadores

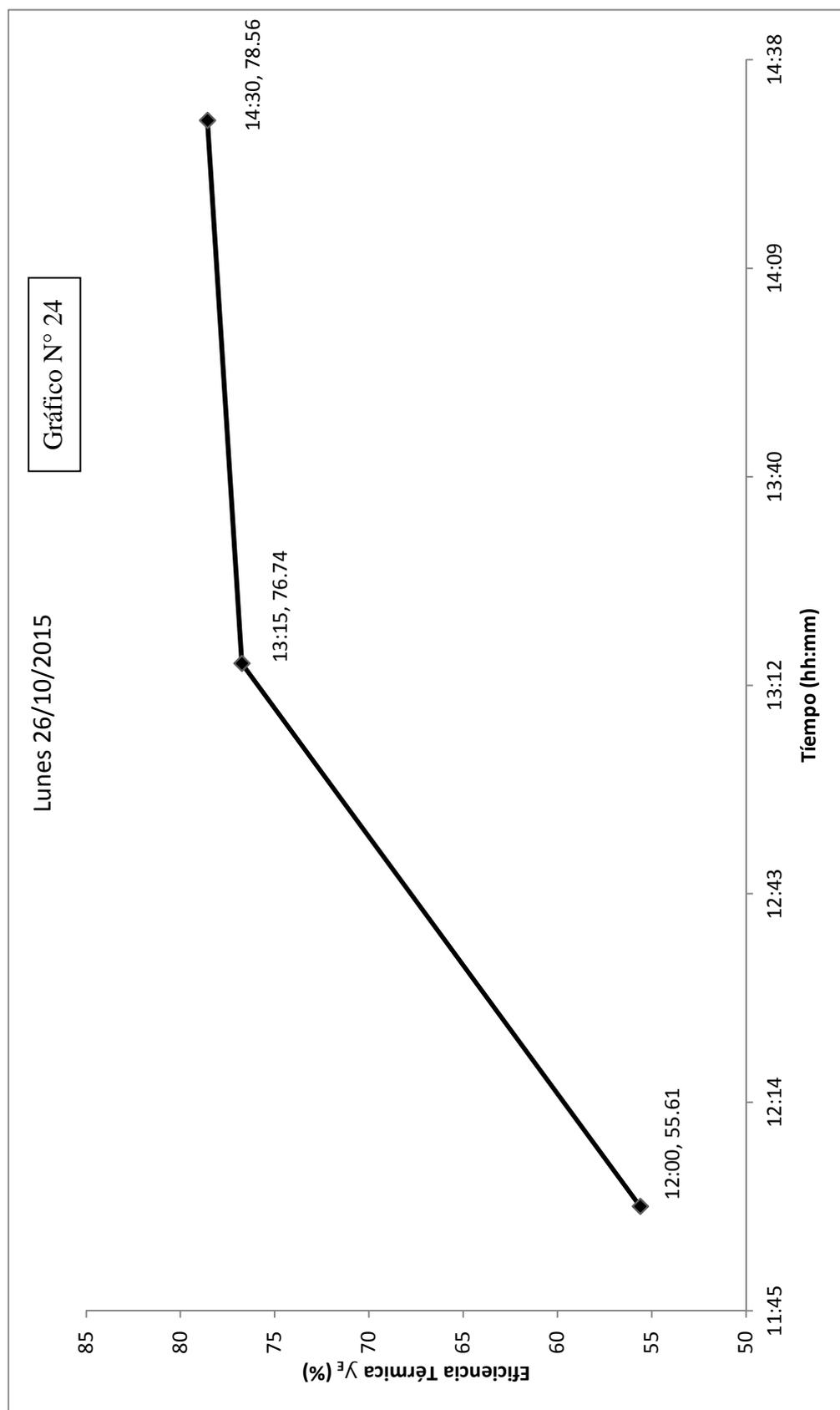


Gráfico 24. Eficiencia Térmica η_E (%) en función del tiempo (horas del día).
Elaborado: Por los investigadores.

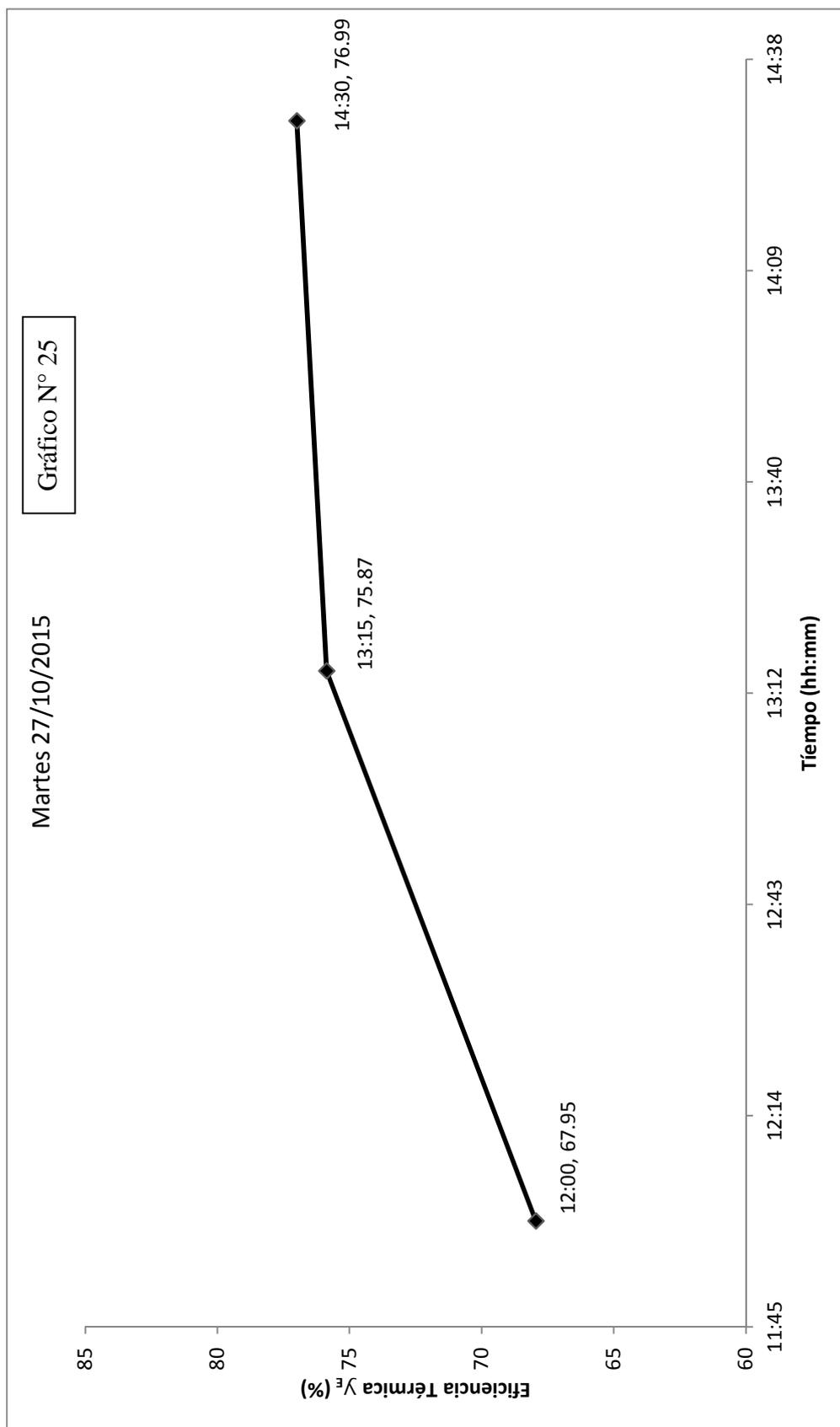


Gráfico 25. Eficiencia Térmica η_E (%) en función del tiempo (horas del día).
Elaborado: Por los investigadores.

CONCLUSIONES

Primera: A través de la ejecución de la Tesis se desarrolló una investigación experimental muy importante, considerando que una línea de investigación de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica es la energía solar y, es más porque Puno tiene ventajas comparativas con respecto a otros departamentos, por ser con Arequipa y Cajamarca los departamentos que tienen mayor Irradiancia Solar (W/m^2) en el Perú.

Segunda: La determinación de la eficiencia térmica de una terma solar de tubos de vacío, cuya tecnología predomina en el mercado actual, estuvo limitada por la disponibilidad de un Laboratorio adecuado para la investigación, un módulo de ensayo y los instrumentos necesarios para la medición con la precisión necesaria de los parámetros para la determinación de la eficiencia térmica; aspectos que los superamos con el ingenio que caracteriza a los alumnos de Ingeniería y, que encaminaron nuestra investigación a la determinación de la eficiencia térmica, cumpliéndose eficientemente los objetivos de la tesis.

Tercera: La determinación de la eficiencia térmica se realizó entre las horas de mayor irradiancia solar, entre las 11:00 y las 14:30 en una terma solar marca DAVSOL de seis tubos al vacío de flujo directo de fabricación china. La evaluación térmica se efectuó del 23 al 27 de octubre del 2015, 5 días consecutivos.

La eficiencia térmica promedio diaria está en el rango de 66 – 74% con un promedio general diario de 69,98%.

Cuarta: La eficiencia térmica de la terma solar se va incrementando conforme la irradiancia solar (W/m^2) aumenta con el transcurso del tiempo de 11:00 a 14:30 horas.

Quinta: La eficiencia térmica de una terma solar con colector solar de placa plana, obtenida en un trabajo de investigación⁸ fue de 55,70%, eficiencia comparada con la eficiencia promedio general diaria de 69,98% calculada en la tesis es menor en un orden de 14,28%; lo cual confirma que la tecnología de los colectores solares de tubos al vacío de flujo directo son más eficientes que los de placa plana.

Sexta: Las temperaturas del agua caliente en el tanque de almacenamiento alcanzaron un valor del orden de 51°C con la tendencia de llegar a una temperatura de aproximadamente de 65°C, lo cual es conveniente; porque si no se correría el riesgo de que el agua cambie de estado (aproximadamente 84°C en Puno) y pasará a producir vapor de agua y la terma solar no está diseñada para trabajar con vapor de agua.

Séptima: En la región del sur del Perú existen más de 30 empresas que se dedican al diseño y fabricación de termas solares, pero ninguna de las proporciona datos técnicos sobre su eficiencia térmica, lo cual da relevancia a la investigación realizada en esta tesis.

Octava: Puno tiene una ventaja competitiva en cuanto a la energía solar promedio anual, por lo cual debe incentivarse el uso masivo de las termas solares, teniendo en cuenta que el precio de una terma solar de tubos de vacío de 150 litros y 10 tubos de vacío está alrededor de 1200 soles, precio que es relativamente económico para una familia y comparativamente más barato con respecto al uso de una terma eléctrica.

⁸ XVIII Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente (XVIII SPES) Lima, 14-19, 11. 2011.

RECOMENDACIONES

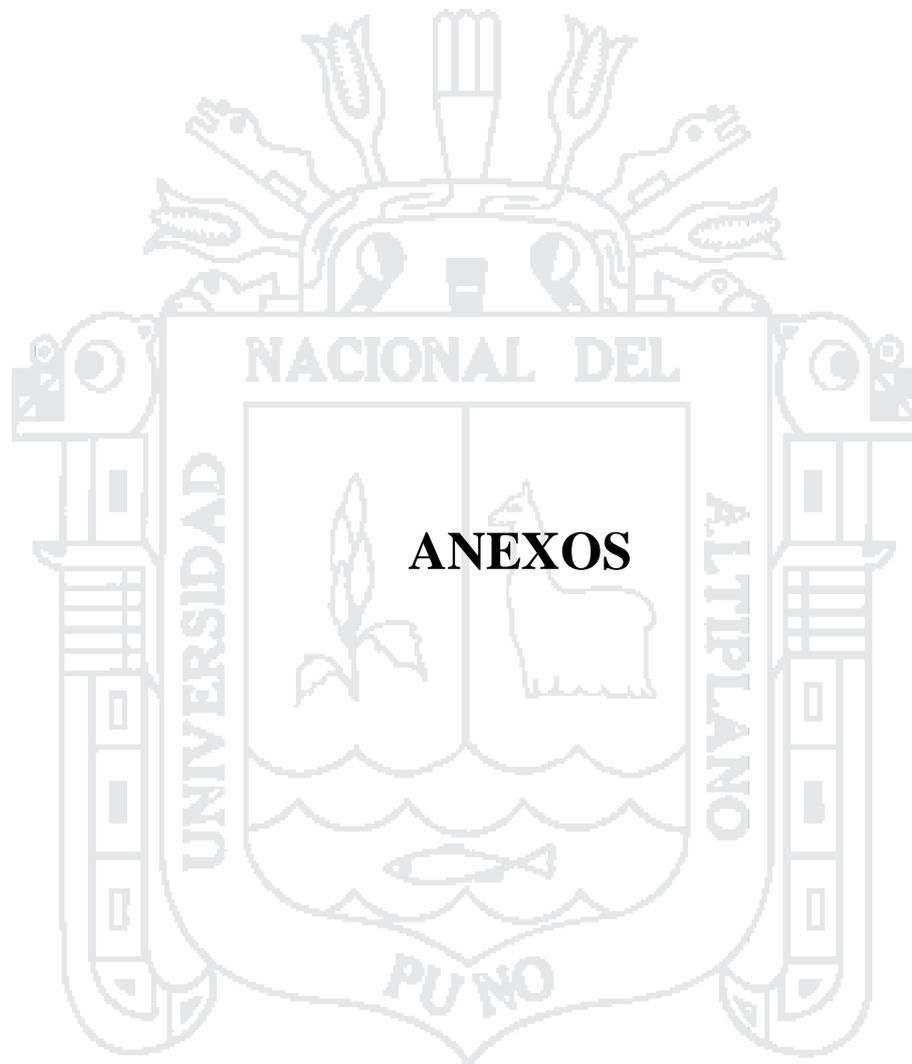
Primera: Se recomienda proseguir con el tema de la investigación experimental ejecutada, la cual debe ejecutarse implementando progresivamente un laboratorio con la tecnología apropiada para determinar la eficiencia térmica de la terma solar con tubos de vacío, considerándola como un sistema abierto, el cual requiere de una medición experimental precisa de los parámetros necesarios para los cálculos de la eficiencia.

Segunda: Las eficiencias térmicas de la terma solar de tubos de vacío marca “DAVSOL”, pueden servir de referencia para realizar investigaciones similares con termas solares de otras marcas existentes en el mercado regional, a través de convenios de investigación de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica con las entidades representativas de las diferentes marcas de termas solares, las cuales serían responsables del equipamiento del módulo de ensayo, instrumentación necesaria y financiamiento de la tesis.

Tercera: La comparación de las eficiencias térmicas de las diferentes marcas de termas solares existentes en el mercado y, obtenidas por convenios de proyectos de investigación, servirían para que el diseño y construcción de este tipo de termas se optimicen y eleven su eficiencia si así lo requerirían, considerando las condiciones ambientales particulares de Puno, como por ejemplo las heladas extremas que se presentan durante varios meses y que no se tiene información sobre su impacto sobre la vida útil y funcionamiento de las termas solares de tubos de vacío.

BIBLIOGRAFÍA

1. Hernández, R. Fernández, C. (2010) Metodología de la Investigación. México. Editorial Mc Graw Hill.
2. Valera, A. (1998). Energía Solar (pp. 103-121), Lima – Perú. Editorial Hoalo S.C.R.L.
3. Orbegozo, R., Schulte, B. (2000). Calentamiento de agua mediante el uso de termas solares (13-21), Amsterdam / Lima. Editorial Tool Consult Cenergia.
4. Tobajas, C. (2008). Energía Solar Térmica para instaladores. Madrid. Editorial Técnica Cano Pina S.L.
5. Rosenthal, P. - Canedo, W. (1996). Sistemas solares para el calentamiento del agua (pp. 140 – 150) Bolivia, Editorial Proper Bolivia GTZ.
6. Mott, R. (1996). Mecánica de fluidos aplicada (375 – 396). México / Nueva York. Editorial Prentice – Hall. Hispanoamericana, S.A.
7. Cencel, Y. – Ghajar, A. (2011). Transferencia de Calor y Masa. (pp. 700 – 708). México. Editorial McGraw Hill.
8. Montoya, L. – Cabana, W. (2011). Evaluación de un calentador solar de agua. XVIII Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente (14-19) Noviembre, 2011, Lima.
9. Kreith, F. – Manglik, E. (2013). Principios de Transferencia de Calor. (pp. 506 – 524). Australia / Brasil. Editorial Cengage Learning.
10. Levenspiel, O. (1997). Fundamentos de Termodinámica (pp. 92 – 133). México/Nuevo York. Editorial Prentice Hall, Hispanoamericana S.A.



ANEXO N° 01

Instalando el módulo de investigación



Verificando Instalaciones



Realizando las pruebas de medición

