

# Universidad Nacional del Altiplano

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y SISTEMAS  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA



**“DISEÑO DE UNA TERMA SOLAR DE TUBOS AL VACÍO PARA  
LAS CONDICIONES AMBIENTALES DE PUNO”**

TESIS PRESENTADA POR:  
**CHRISTIAN JOAQUÍN FLORES ZAMALLOA**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

PUNO – PERÚ  
2018



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA ELECTRICA,  
ELECTRONICA Y SISTEMAS  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA ELECTRICA

**DISEÑO DE UNA TERMA SOLAR DE TUBOS AL VACIO PARA LAS  
CONDICIONES AMBIENTALES DE PUNO**

TESIS PRESENTADA POR:  
**CHRISTIAN JOAQUIN FLORES ZAMALLOA**

PARA OBTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:  
**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

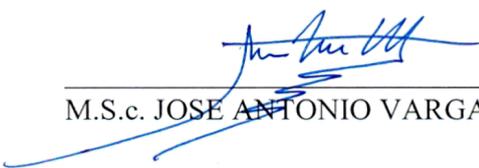
FECHA DE SUSTENTACION: 09/10/2018

**APROBADO POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:**

PRESIDENTE:

  
M.S.c. WALTER OSWALDO PAREDES PAREJA

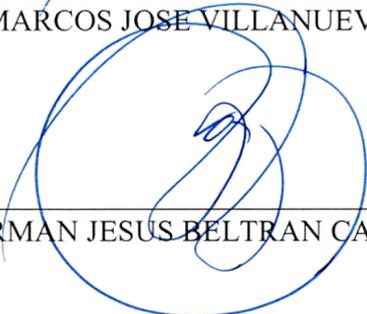
PRIMER MIEMBRO:

  
M.S.c. JOSE ANTONIO VARGAS MARON

SEGUNDO MIEMBRO:

  
M.S.c. MARCOS JOSE VILLANUEVA CORNEJO

ASESOR/DIRECTOR:

  
Dr. NORMAN JESUS BELTRAN CASTAÑON

Area: INGENIERIA MECANICA  
Tema: ENERGIAS RENOVABLES

## DEDICATORIA

*A Dios todopoderoso, por su amor. A diario nos regala una nueva oportunidad.*

*A mis padres lindos, por su comprensión, apoyo y amor demostrado.*

*A Marianita, a Brayancito; gracias a ellos tengo motivos para seguir adelante.*

## AGRADECIMIENTOS

*A la UNA-Puno, a mi asesor, a mis docentes y compañeros; tiempos maravillosos en los cuales compartimos y fuimos creciendo en conocimientos en esta rama tan prestigiosa de la ingeniería.*

*A los autores mencionados en la bibliografía ya que gracias a sus trabajos previos fue posible el presente trabajo.*

## ÍNDICE

ACTA DE SUSTENTACION DE PROYECTO DE TESIS .....	2
DEDICATORIA .....	3
AGRADECIMIENTOS .....	4
ÍNDICE .....	5
ÍNDICE DE TABLAS .....	8
ÍNDICE DE FIGURAS .....	9
RESUMEN .....	10
ABSTRACT .....	11
<b>CAPITULO 1</b> .....	12
1.1. INTRODUCCIÓN .....	12
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN. ....	15
1.3. JUSTIFICACIÓN. ....	17
1.4. HIPÓTESIS. ....	18
1.5. OBJETIVO GENERAL .....	18
1.6. OBJETIVOS ESPECÍFICOS. ....	18
<b>CAPITULO 2</b> .....	19
ANTECEDENTES DEL PROYECTO: .....	19
2.1. REVISIÓN DE LITERATURA. ....	19
2.2. MARCO CONCEPTUAL .....	20
2.2.1. El Sol. ....	20
2.2.2. Espectro Electromagnético. ....	22
2.2.3. Energía Solar. ....	23
2.2.4. Ventajas y desventajas del aprovechamiento de la energía solar. ....	27
2.2.5. Energía Solar Térmica. ....	29
2.2.6. La Transferencia de Calor. ....	30
2.2.6.1. La transferencia de calor en ingeniería .....	31
2.2.6.2. Conducción .....	32
2.2.6.3. Convección .....	34
2.2.6.3.1. Convección Libre .....	34
2.2.6.3.2. Convección Forzada .....	34
2.2.6.4. Radiación. ....	34
2.2.7. Energía Solar en el Perú .....	36
2.2.7.1. Matriz Energética Perú: 2008. ....	37
2.2.7.2. Panorama Energético en el Perú .....	38
2.2.7.3. Distribución de termas solares instaladas en el Perú....	39

2.2.7.4. Preferencia de Compra de Termas Solares en el Sector Residencial.....	40
2.2.8. Terma Solar de Tubos al vacío.....	40
2.2.8.1. Tubos al vacío termosifónicos.....	42
2.2.8.2. Funcionamiento.....	43
2.2.8.3. Ventajas de una terma solar de tubos al vacío.....	44
<b>CAPITULO 3.....</b>	<b>46</b>
<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>46</b>
<b>3.1. MATERIALES PRELIMINARES.....</b>	<b>46</b>
Los datos y materiales, se presentan a continuación: .....	46
3.1.1. Ubicación geográfica de Puno.....	46
3.1.2. Coordenadas geográficas de la ciudad de Puno .....	46
3.1.3. Clima de Puno.....	47
3.1.4. Temperatura del aire promedio, mínima y máxima anual por Estación de medición, 1988 – 2015 en Puno.....	48
3.1.5. Promedio diario mensual de radiación para el Perú (Kwh/m <sup>2</sup> /día).....	49
3.1.6. Radiación Solar en el Perú (promedio diario anual).....	50
3.1.7. Orientación del Colector Solar de Tubos al Vacío .....	50
<b>3.2. MÉTODOS.....</b>	<b>53</b>
3.2.1. Aspectos generales.....	53
3.2.2. Radiación solar.....	54
3.2.3. Demanda energética.....	55
3.2.4. Colector Solar de Tubos al Vacío.....	56
3.2.4.1. Área de Captación Solar.....	56
3.2.4.2. Factor de corrección del tubo al vacío.....	56
3.2.4.3. Número de tubos al vacío.....	57
3.2.5. Volumen y aislamiento del depósito de almacenamiento. ....	57
<b>CAPITULO 4.....</b>	<b>60</b>
<b>DIMENSIONAMIENTO DE LA TERMA SOLAR DE TUBOS AL VACÍO..</b>	<b>60</b>
<b>4.1. PARÁMETROS DE LA TERMA SOLAR DE TUBOS AL VACÍO.....</b>	<b>60</b>
4.1.1. Determinación del consumo de agua caliente y del patrón de demanda.....	60
4.1.2. Diseño para los meses de alta radiación octubre a abril.....	62
4.1.2.1. Radiación Promedio.....	62
4.1.2.2. Demanda energética.....	62
4.1.2.3. Numero de tubos al vacío del Colector Solar.....	63

4.1.3.	Diseño para los meses de mayo a setiembre (meses de baja radiación).....	67
4.1.3.1.	Radiación promedio.....	67
4.1.3.2.	Demanda energética.....	67
4.1.3.3.	Número de tubos al vacío del colector solar.....	68
4.1.4.	Dimensionamiento del tanque de almacenamiento.....	69
4.1.4.1.	Dimensionamiento del tanque de almacenamiento.....	71
4.1.4.2.	Cálculo del espesor de aislamiento del tanque de almacenamiento de agua caliente.....	72
4.1.4.2.1.	Pérdidas por conducción en la superficie cilíndrica del tanque.....	72
4.2.	DETERMINACIÓN DE LA ORIENTACIÓN E INCLINACIÓN DEL COLECTOR SOLAR DE TUBOS AL VACÍO.....	78
4.3.	DISCUSIÓN.....	79
	<b>CAPITULO 5</b> .....	82
	CONCLUSIONES:.....	82
	<b>CAPITULO 6</b> .....	83
	RECOMENDACIONES:.....	83
	<b>CAPITULO 7</b> .....	84
	REFERENCIAS:.....	84
	<b>ANEXOS</b> .....	86
	ANEXO 01. DIMENSIONES DE PLANCHAS ACEROS AREQUIPA.....	86
	ANEXO 02. PRECIOS DE TUBOS AL VACÍO EN CHINA.....	87
	ANEXO 03. SOPORTE DE TERMA SOLAR.....	88

**ÍNDICE DE TABLAS.**

<b>Tabla 2.1.</b>	Radiación Solar en el Perú.....	36
<b>Tabla 3.1.</b>	Temperaturas promedio mínima y máxima anual en Puno (1988 – 2015) .....	48
<b>Tabla 3.2.</b>	Tabla de Radiación Solar del Perú .....	49
<b>Tabla 3.3.</b>	Promedio diario anual de radiación solar en el Perú .....	50
<b>Tabla 3.4.</b>	Inclinación recomendadas para colectores solares.....	52
<b>Tabla 3.5:</b>	Tipo de Aislamiento y espesor recomendado.....	59
<b>Tabla 4.1.</b>	Cantidad de agua calientes usada por diferentes sectores.....	60
<b>Tabla 4.2.</b>	Coeficiente de conductividad térmica de materiales .....	74
<b>Tabla 4.3.</b>	Valores típicos del coeficiente de transferencia de Calor h.....	75

## ÍNDICE DE FIGURAS.

<b>Figura 2.1.</b> Esquema del sol. ....	22
<b>Figura 2.2.</b> Tipos de Radiación Electromagnética.....	23
<b>Figura 2.3.</b> Tipos de radiación solar. ....	25
<b>Figura 2.4.</b> Piranómetro. ....	26
<b>Figura 2.5.</b> Distribución porcentual energética del Perú – 2008.....	38
<b>Figura 2.6.</b> Cambio de la Matriz Energética. ....	38
<b>Figura 2.7.</b> Termas Solares Instalados en Perú. ....	39
<b>Figura 2.8.</b> Preferencia de compra Sector Residencial. ....	40
<b>Figura 2.9.</b> Calentador solar de tubos al vacío. ....	41
<b>Figura 2.10.</b> Tubo Termosifónico. ....	43
<b>Figura 2.11.</b> Funcionamiento de un tubo termosifónico. ....	44
<b>Figura 3.1.</b> Climograma de Puno. ....	47
<b>Figura 4.1.</b> Vistas frontal y lateral del tanque de almacenamiento.....	71
<b>Figura 4.2.</b> Redes de resistencias térmicas. ....	74

## RESUMEN

La contaminación ambiental producida por el uso de los combustibles fósiles amenaza la estabilidad del clima y la vida en el planeta. Las consecuencias del cambio climático y del calentamiento global ya se observan, por eso se hace imperiosa la necesidad de tomar acciones para contrarrestar esas consecuencias, siendo el desarrollo de la tesis una de ellas, al propiciar el uso de la energía solar con el objetivo de diseñar una terma solar de tubos al vacío termosifónicos para las condiciones ambientales de Puno, considerando su ventaja competitiva de ser uno de los tres departamentos con mayor radiación solar del Perú y al mismo tiempo propiciar el uso de tubos al vacío, tecnología actual con menores costos de producción y mayor eficiencia que otras. La metodología aplicada empleada fue la teoría de la ingeniería de diseño mecánico en el marco referencial de criterios para el diseño de sistemas de calentamiento de agua de la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación. Los resultados del diseño del termostanque para una familia de 5 personas con una capacidad de 153 litros fueron de un diámetro de 420 mm, una longitud de 1100 mm de longitud y un espesor de aislante de 29 mm de fibra de vidrio; se diseñó que el colector solar de tubos de vacío debe tener 8 tubos de vacío termosifónicos de diámetro de 58 mm y longitud de 180 mm necesarios para calentar el agua hasta 40°C. El costo de la terma solar en el mercado regional sería de 920 soles y si la terma se fabricaría en China con las especificaciones técnicas del diseño realizado costaría 92 dólares. Conclusión importante de la tesis es que una terma solar de tubos al vacío termosifónico de 150 litros en el mercado regional se comercializa aproximadamente en 1400 soles y el colector solar tiene de 14 a 15 tubos, es decir de 6 a 7 tubos de más respecto a los 8 tubos del diseño, lo cual se explica porque no se han considerado las condiciones ambientales de Puno. Respecto al costo de producción de la terma en China y Puno, indudablemente la perspectiva técnico-económica es de hacerla fabricar en China e importarla, por las ganancias que necesariamente se tendrán.

**Palabras clave:** terma solar, diseño, tubos termosifónicos, radiación solar, energía solar.

## ABSTRACT

The environmental contamination taken place by the use of the fuel's fossil threat the stability of the climate and the life in the planet. The consequences of the climatic change and of the global heating they are already observed, for that reason it becomes imperious the necessity to take actions to counteract those consequences, belonging the development of the thesis one to them, when propitiating the use of the solar energy with the objective of designing a solar terms of tubes to the hole thermosifonic for the environmental conditions of Puno, considering their competitive advantage of being one of the three departments with bigger radiation of Peru and at the same time to propitiate the use of tubes to the hole, current technology with smaller production costs and bigger efficiency that others. The methodology used applicative was the theory of the engineering of design mechanic in the mark referential of approaches for the design of systems of heating of water of the Agency Switzerland for the Development and the Cooperation. The results of the design of the thermotank for a family of 5 people with a capacity of 153 liters were of a diameter of 420 mm, a longitude of 1100 mm of longitude and a thickness of insulating of 29 mm of glass fiber; it was designed that the solar collector of hole tubes should have 8 tubes of empty thermosifonic of diameter of 58 mm and longitude of 180 mm, necessary to heat the water up to 40°C. The cost of the solar thermal in the regional market would be of 920 suns and if the thermal would be manufactured in China with the technical specifications of the carried-out design it would cost 92 dollars. Important conclusion of the thesis is that a solar thermal of tubes to the hole thermosifonic of 150 liters in the regional market is marketed approximately in 1400 suns and the solar collector has from 14 to 15 tubes, that is to say from 6 to 7 tubes of more regarding the 8 tubes of the design, that which is explained because they have not been considered the environmental conditions of Puno. Regarding the cost of production of the thermal in China and Puno, undoubtedly the technician-economic perspective is of making it to manufacture in China and to care her, for the earnings that will necessarily be had.

**Keywords:** solar thermal, design, tubestermosifonicos, solar radiation, solar energy.

## CAPITULO 1

### 1.1. INTRODUCCIÓN.

No es posible pensar en el desarrollo actual, y mucho menos en el desarrollo sostenible, sin tener en cuenta el factor “energía”.

Como es sabido la contaminación ambiental producida por el uso de los combustibles fósiles amenaza la estabilidad del clima y la vida en el planeta. Las consecuencias del cambio climático y del calentamiento global ya se observan. Estados Unidos, país que consume más de la cuarta parte de la energía eléctrica que se genera en el mundo y cuyas emisiones de gases por la combustión de petróleo y el carbón llegan al 30% de todo el mundo, entorpece las medidas encaminadas a aumentar el empleo de las fuentes renovables de energía, que permitirían revertir la adversa situación ambiental actual.

En el mundo es común oír el planteamiento de que el poco uso de la energía solar se debe, principalmente, a la carencia de tecnologías económicamente ventajosas con respecto a las fuentes energéticas convencionales. Nada más falso que eso, las fuentes renovables de energía no se han desarrollado porque el petróleo, el carbón y los reactivos nucleares, o sea, los portadores de energía concentrada, son instrumentos de poder. Quien domine la energía, dominará el mundo. Mientras se gastan miles de millones de dólares en investigaciones y gastos militares para dominar la energía, son insignificantes los recursos

empleados en investigaciones científicas y tecnológicas para desarrollar las fuentes renovables.

La energía total que el sol envía por unidad de tiempo sobre la superficie de área unitaria situada normalmente a los rayos solares, a una distancia media igual a la de la tierra, pero sin atmósfera, es igual a  $1373 \text{ W/m}^2$ .

En este capítulo 1, se describe el proyecto de investigación de la tesis desarrollada: diseño de una terma solar de tubos al vacío termosifónicos para las condiciones ambientales de Puno, considerando que un colector de tubos al vacío es fabricado con alta calidad dada la baja emisividad del tubo (0,08), su alta absorptividad (0,93) y su aislamiento por vacío, se consiguen rendimientos superiores a otros tipos de colectores. Considerando también que Puno es uno de los tres departamentos con mayor radiación solar del Perú y que actualmente se comercializan en la región termas solares de tubos al vacío fabricados en China, en cuyas características técnicas de diseño no se han considerado las condiciones ambientales de Puno. El calentamiento solar de agua para consumo doméstico, como alternativa para sustituir las termas tradicionales (eléctricas, a gas, etc.), es una opción atractiva, si se toma en cuenta las bajas temperaturas que se necesitan para el uso doméstico ( $40^{\circ}\text{C}$  a  $60^{\circ}\text{C}$ ), además, desde el punto de vista de ahorro energético es la opción más favorable, ya que, en estos sistemas, la fuente de calor es la radiación solar, la cual sustituye los combustibles fósiles o la electricidad.

En el capítulo 2, se hace mención de los trabajos anteriores, tomando como referencia el cálculo del colector y el marco conceptual de los principales factores que influyen en el diseño de la terma solar de tubos termosifónicos de tubos al vacío, para aplicarlos en la región Puno. Las termas solares para calentamiento de agua están constituidas por dos elementos principales: Colector, encargado de recibir y transformar la energía incidente durante el día y el tanque de almacenamiento, aislado para el agua que ha sido calentada.

En el capítulo 3, se describe la cantidad de emisión solar que recibe nuestra región de acuerdo a su ubicación geográfica, por lo cual se define la orientación del panel solar de acuerdo a la latitud y longitud. Se hace un análisis de la demanda energética, se habla del colector, el área que deberá tener, así como el respectivo cálculo del número de tubos al vacío que requerirá. También el respectivo cálculo del aislamiento, siendo el diseño mecánico una especialidad relevante en la ingeniería, el desarrollo de la tesis contribuirá a la investigación aplicada de nuestra Escuela Profesional.

En el capítulo 4, se expone los requisitos para el dimensionamiento de la terma solar, con una descripción para los meses con mayor radiación solar, así como para los meses con menor radiación solar. Se dimensiona también el tanque de almacenamiento, con su respectivo aislamiento y los materiales elegidos. Todo esto justificado con los cálculos y resultados obtenidos en este capítulo.

En el capítulo 5, se menciona los objetivos alcanzados, la comparativa del diseño final de la terma solar con una ofertada en la región con similares especificaciones técnicas, así como la diferencia de precios entre nuestro diseño y una del mercado regular.

En el capítulo 6, se menciona los criterios que se deben tener en cuenta para diseñar una terma solar, también se insta a optimizar las tecnologías existentes para nuestra región Puno.

## **1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.**

A lo largo de la historia, la demanda global de energía ha aumentado de manera constante, debido a la modernización, urbanización y el aumento de la población. Casi el 80% de esta demanda es satisfecha por combustibles fósiles, entre los que se encuentran el petróleo, el carbón y el gas natural, pero el uso de estos en la coyuntura actual ha traído graves consecuencias ambientales, como el efecto invernadero. Por este motivo, la utilización de energías renovables se hace cada día más importante en la sociedad actual. Las energías renovables suelen clasificarse en convencionales y no convencionales, según sea el grado de desarrollo de las tecnologías para su utilización y la aplicación en los mercados energéticos. Dentro de las convencionales, la más difundida es la hidráulica a gran escala y como energías renovables no convencionales se considera la eólica, la solar, la geotérmica y mareomotriz.

Dentro de las energías renovables no convencionales mencionadas anteriormente, la energía solar es una de las que presenta

un mayor potencial en Puno, debido a la alta radiación que existe en esta región del Perú y siendo uno de los tres departamentos con mayor radiación junto a Cajamarca y Arequipa.

En este contexto, se desarrolló el proyecto de investigación de tesis “Diseño de una Terma Solar de tubos al vacío para las condiciones ambientales de Puno”, considerando que, en la región sur del país, específicamente en Arequipa se había desarrollado una tecnología de termas solares con colectores de placa plana, la cual ha sido desplazado actualmente por colectores solares de tubos al vacío, los cuales han elevado significativamente la eficiencia de las termas solares. Actualmente las termas solares de tubos al vacío que se venden en la región de Puno son distribuidas por empresas privadas que las importan de China por el costo económico, pero estas termas no están diseñadas específicamente para las condiciones ambientales de Puno, basado en estos fundamentos me formulé las preguntas de investigación que son el marco referencial que guió el desarrollo de mi tesis:

¿Es factible diseñar una terma solar de tubos al vacío para las condiciones ambientales de Puno?

¿Es posible diseñar las características técnicas del colector solar de tubos al vacío y; del tanque de almacenamiento de agua caliente?

¿Cómo determinaremos el costo económico de la terma solar de tubos al vacío incluido el soporte de la terma?

### 1.3. JUSTIFICACIÓN.

Actualmente en todos los países del mundo se están impulsando al desarrollo de proyectos de investigación de energías no convencionales, como la de la energía solar que es el tema de nuestra tesis; considerando el problema actual del calentamiento global que se debe ayudar a mitigar para prevenir catástrofes naturales como el del fenómeno del “Niño Costero” que se tuvo en el país por el calentamiento de las aguas del Océano Pacífico en la costa norte el Perú.

Otra justificación importante desde el punto de vista de la ingeniería, es el aspecto que las termas de colectores solares planos cuya tecnología se desarrolló en el pasado en Arequipa estuvo basado en diseño de termas para España y, actualmente las termas de tubos al vacío se están diseñando en China y exportando para la venta en la región sur del país, pero no con las características técnicas de diseño para Puno. A través de la tesis se aplicarán conocimientos de física, matemática, diseño, transferencia de calor y otras materias para diseñar una terma solar específicamente para las condiciones ambientales de Puno y que obviamente su funcionamiento será más eficiente.

Los tubos al vacío es una tecnología de alta eficiencia para la transferencia de la energía solar al agua a calentar en las termas y fue inventada en China, los tubos al vacío se venden en el mercado. Pero, un uso práctico de los resultados de la tesis sería solicitar la fabricación de las termas solares en china con las características técnicas de diseño determinados para Puno, por el costo económico de fabricación con el

que no se puede competir; como lo están haciendo algunas empresas de Juliaca pero con características técnicas que ellos no especifican y que lógicamente no son para Puno.

Académicamente la tesis se justifica porque investigar el tema del diseño es relevante en el Perú por no existir laboratorios ni apoyo económico y, se contribuirá al desarrollo de la investigación en la Universidad.

#### **1.4. HIPÓTESIS.**

La aplicación de los conocimientos de la ingeniería mecánica (transferencia de calor, diseño mecánico, etc.) nos permitirá diseñar una terma solar de tubos al vacío con características técnicas para las condiciones ambientales de Puno para un funcionamiento más eficiente.

#### **1.5. OBJETIVO GENERAL.**

Diseñar una terma solar de tubos termosifónicos al vacío para las condiciones ambientales de Puno.

#### **1.6. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- Diseñar las características técnicas del tanque de almacenamiento en cuanto a capacidad y espesor del aislamiento térmico, así como elegir los materiales para el diseño.
- Diseñar las características del colector solar de tubos al vacío en cuanto al número de tubos.
- Determinar el costo económico de la terma solar de tubos al vacío en Puno.

## CAPITULO 2

### ANTECEDENTES DEL PROYECTO.

#### 2.1. REVISIÓN DE LITERATURA.

2.1.1. Colque, O. - Condori, A. (2016). Determinación de la eficiencia de una terma solar de tubos al vacío en Puno. Tesis desarrollada en la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad Nacional del Altiplano, el objetivo de la tesis es determinar la eficiencia de una terma solar de tubos al vacío funcionando en Puno, en la que se concluye que la eficiencia está en el rango de 60 a 70%; la información sobre termas solares de tubos al vacío y aspectos referentes a la radiación solar en Puno serán importantes para nuestra tesis.

2.1.2. Bérriez, L. (2016). Calentador solar de tubos al vacío (pp 1-8) artículo de la Institución de Investigación CUBASOLAR, donde se manifiestan que los tubos al vacío son una opción eficiente y sostenible para el calentamiento de agua. Información sobre los diferentes tipos de tubos de vacío, eficiencia energética del calentador de tubos termo-sifónicos, las características de los calentadores de tubos al vacío y una evaluación de calentadores de tubos al vacío de dos tipos: tubos termosifónicos, y tubos calóricos.

2.1.3. Laqui, J. Incacutipa, E. (2004). Banco de ensayo para determinar la eficiencia de un colector solar plano de baja temperatura. Tesis desarrollada en la Escuela Profesional de ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad Nacional del Altiplano, cuyo objetivo es el diseño de un

banco de ensayo para determinar la eficiencia de colectores solares planos de baja temperatura, en sus conclusiones se dan características sobre el funcionamiento de colectores solares planos para obtener una eficiencia térmica óptima. Aunque esta tecnología de colectores solares planos ha sido desplazada por la tecnología de colectores solares de tubos al vacío, la información será importante como marco referencial de investigación.

2.1.4. Centro de Energías Renovables - CER-UNI. (2017). Institución de Investigación de Energías Renovables de la Universidad Nacional de Ingeniería de Lima, en su página web tiene diferentes artículos referentes a los colectores de tubos al vacío funcionando en diferentes departamentos del Perú, además es una institución que brinda asesoramiento en el área de la energía solar por su experiencia de más de 60 años de investigación en el Perú.

## 2.2. MARCO CONCEPTUAL.

### 2.2.1. El Sol<sup>1</sup>.

El Sol es el objeto central de nuestro sistema solar. Se ha formado hace 6.5 mil millones de años de una enorme nube interestelar de gas frío. Contiene prácticamente toda (99.8%) la masa del sistema solar y es más de 333,000 veces más masivo que la Tierra. Su radio, 700,000 km, es 109 veces más grande que el radio de la Tierra. Así que se necesitarían 1'300,000 planetas Tierra para llenarlo.

---

<sup>1</sup> Astronomía de las Altas energías, [www.astroscu.unam.mx](http://www.astroscu.unam.mx)

El Sol está compuesto principalmente de dos elementos hidrógeno y helio. Sus abundancias han cambiado a lo largo de su vida, por lo que hoy el hidrógeno y el helio representan el 74.9% y el 23.8%, respectivamente de su masa total. El oxígeno sólo contribuye con el 1%, el carbono con el 0.3% y el neón y el hierro con el 0.2%. (Figura 2.1).

La distancia que nos separa del Sol equivale a un poco más de ocho minutos a la velocidad de la luz. Es por eso, que cualquier cambio que sucede en la superficie solar, lo podemos ver con un retraso de ocho minutos. Esta distancia, conocida como unidad astronómica (u.a.), se traduce a 50 millones de kilómetros, lo cual es 390 veces más que la distancia a la Luna y 3,750 veces mayor que el largo del ecuador.

La temperatura en el Sol es tan alta, que el material se encuentra en estado plasma, esto es, separado en iones y electrones. El 99% de la materia visible en el universo está en estado plasma, a este estado se le conoce comúnmente como el cuarto estado de la materia, debido a la carga eléctrica de las partículas. El material de un plasma interactúa con campos eléctricos y magnéticos y se comporta de manera muy diferente a un gas neutro.

La superficie del sol está compuesta por gránulos (células de convección irregulares), sus dimensiones van desde 1000 a 3000 km y el tiempo de vida de las células es de pocos minutos.

**Figura 2.1.** Esquema del sol.

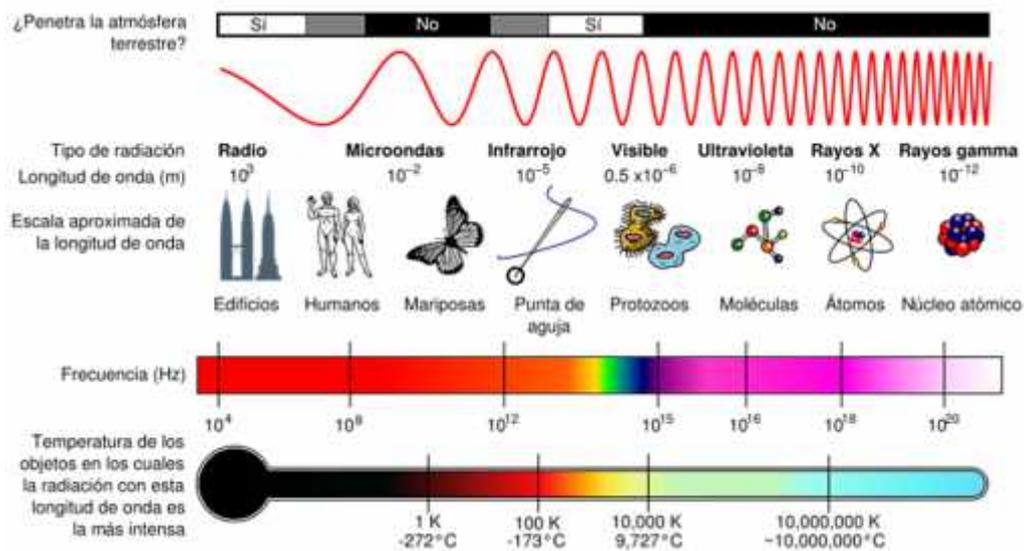
Fuente: <http://www.windows2universe.org/sun/sun>

### 2.2.2. Espectro Electromagnético<sup>2</sup>.

El espectro electromagnético es considerado en el rango de todas las posibles frecuencias de radiación electromagnética. El espectro electromagnético de un objeto se caracteriza por la distribución de radiación electromagnética emitida o absorbida por el objeto en particular. Las ondas electromagnéticas son capaces de transmitir energía de un lugar a otro, especialmente en el vacío.

Aquí se muestra un esquema (Figura 2.2) de los diferentes tipos de radiación y algunas de sus características primordiales.

<sup>2</sup> Astronomía de las Altas Energías, [www.astroscu.unam.mx](http://www.astroscu.unam.mx)

**Figura 2.2.** Tipos de Radiación Electromagnética.

Fuente: <http://noticiasdeabajo.wordpress.com>

La energía solar se encuentra dentro del espectro electromagnético como radiación infrarroja. La energía infrarroja es la que experimentamos cotidianamente en forma de calor, como la luz del sol, un incendio, un radiador o una acera caliente. Esto está entre las secciones visibles y de microondas del espectro electromagnético. La luz infrarroja tiene un rango de longitudes de onda desde la luz roja hasta la violeta. El porcentaje de energía radiante emitida por intervalo de unidad de longitud de onda es llamado función de la distribución de la energía espectral.

### 2.2.3. Energía Solar<sup>3</sup>.

La mayor parte de la energía renovable de la que disponemos proviene del sol. Su calor y su luz son la base de numerosas reacciones químicas para el desarrollo de los seres vivos, cuyos restos con el paso del tiempo dieron origen a los combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas

<sup>3</sup> Agencia Internacional de la Energía (AIE 2007)

natural). La energía solar es el resultado de la conversión de hidrogeno a helio, la cual, es transmitida a la Tierra en forma de ondas electromagnéticas, aunque también en forma de partículas (fotones). Es necesaria para la vida de plantas, animales y seres humanos. Es una solución óptima para la calidad de vida de los seres vivos debido a sus características (limpia, segura y relativamente inagotable).

La cantidad de energía interceptada por nuestro planeta es 170 billones de KW, una cifra 5,0 veces mayor a la suma de todas las demás energías. De esta cantidad el 30% es reflejado al espacio, 47% convertido en calor a baja temperatura y vuelto a radiar al espacio y el 23% acciona el ciclo de evaporación-condensación de la atmosfera; menos del 0,5% es representado en forma de energía cinética.

Algunos ejemplos en donde interviene la energía solar son:

- La radiación solar directa, que es aprovechada por las plantas para llevar a cabo el proceso de la fotosíntesis.
- La energía solar provoca el calentamiento de las masas de aire, las cuales, chocan con masas de aire frio dando origen al viento.
- La evaporación de los océanos da como resultado la lluvia.

De la energía solar se puede obtener calor y electricidad, es por ello que el estudio de la energía solar se lleva a cabo en base a las necesidades del ser humano.

La radiación solar llega a nuestro planeta de 3 formas (Figura 2.3):

- Radiación Directa: Es toda radiación incidente que no sufre ningún cambio en su trayectoria. Esta radiación es la causante de las sombras y además la que predomina en un día soleado.
- Radiación Difusa: Es toda la energía que llega después de haber incidido en cualquier momento con cualquier elemento de la atmosfera (polvo, nubes, contaminantes, etc.) por lo que la trayectoria es desviada. Este tipo de radiación es predominante en los días nublados.
- Radiación reflejada o albedo: Es la radiación reflejada por la superficie terrestre, la reflexión depende mucho de la zona donde incide la radiación, ya el ángulo de dispersión es diferente en nieve y en agua.

**Figura 2.3.** Tipos de radiación solar.



Fuente: <http://www.ecopotencia.com/incidencia.html>

Para poder medir la radiación incidente en el planeta aparece el concepto de radiación global, que es la suma de la radiación directa más la radiación difusa, la cual es medida con la ayuda de un instrumento llamado piranómetro (Figura 2.4).

**Figura 2.4.** Piranómetro.

Fuente: <http://www.ecopotencia.com/incidencia.html>

De acuerdo a lo anterior existen tres formas de clasificación de la radiación solar: directa, difusa y reflejada.

Con una insolación media de  $5 \text{ kWh/m}^2$ , el potencial en México es de los más altos del mundo. Se espera tener instalados 25 MW con tecnología fotovoltaica para 2013, y generar 14 GWh/año. Además, se esperaba contar para 2009 con un sistema híbrido de ciclo combinado acopiado a un campo solar de 25 MW (Agua Prieta II, Sonora).

#### 2.2.4. Ventajas y desventajas del aprovechamiento de la energía solar<sup>4</sup>.

##### Ventajas:

- La más importante de todas las ventajas es que este tipo de energía no contamina.
- Al estar hablando de la energía solar podemos afirmar que es una fuente inagotable.
- Es un sistema de aprovechamiento de energía idóneo para zonas donde el tendido eléctrico no llega (zonas rurales, montañosas, islas), o es dificultoso y de un costo alto por traslado.
- La mayor parte de los sistemas de captación solar que se suelen utilizar son de fácil mantenimiento, lo que facilita su elección.
- El costo disminuye a medida que la tecnología va avanzando, mientras que el costo de los combustibles fósiles aumenta con el paso del tiempo, debido a que cada vez son más escasos.
- La única inversión es el costo inicial de la infraestructura, pues no requiere de ningún combustible para su funcionamiento, además el costo se puede amortizar a los 5 años de su implantación.
- La energía solar fotovoltaica no requiere ocupar ningún espacio adicional, ya que puede instalarse en techos y edificios.
- La disponibilidad de energía solar reduce la dependencia de otros países para el abastecimiento de energía de la población.

---

<sup>4</sup><http://energia.fi-b.unam.mx/av/index.html>

- Es un sector que promueve la creación de empleo necesario para la fabricación de celdas y paneles solares, como para realizar la instalación y el mantenimiento de la misma.

**Desventajas:**

- El nivel de radiación de esta energía fluctúa de una zona a otra, y lo mismo ocurre entre una estación del año y otra, lo que puede no ser tan atractivo para el consumidor.
- Cuando se decide utilizar la energía solar para una parte importante de la población, se necesitan grandes extensiones de terreno, lo que dificulta que se escoja este tipo de energía.
- Inicialmente requiere una fuerte inversión económica, motivo por el cual, muchos consumidores no están dispuestos a implementar estas tecnologías.
- En diversas ocasiones se debe complementar este método de convertir energía con otros, como por ejemplo las instalaciones de agua caliente y calefacción, que requieren una bomba para hacer circular el fluido.
- Los lugares donde hay mayor radiación, son lugares desérticos y alejados, (energía que no se aprovecha para desarrollar actividad agrícola o industrial, etc.)

### 2.2.5. Energía Solar Térmica<sup>5</sup>.

La energía solar térmica se utiliza principalmente para calentar fluidos, por lo general es agua. Dependiendo de la temperatura final, los distintos sistemas se clasifican de la siguiente forma:

1. Baja Temperatura: Estos sistemas son los más utilizados para uso doméstico debido a que la temperatura del agua no rebasa los 90°C, ejemplos son el agua caliente sanitaria (ACS) para viviendas, deportivos, calentamiento de agua de piscinas etc.
2. Media Temperatura: Son aplicaciones que se encuentran en un rango de 80°C a 250°C, principalmente aplicaciones para procesos industriales y desalinización de agua.
3. Alta temperatura: Destinada a aquellas aplicaciones que requieren una temperatura superior a los 250°C, principalmente generación de vapor para producción de electricidad.

Para los sistemas fototérmicos (“concentradores”) los costos se estiman en un rango de 2,000 a 4,000 dólares por kW y de 10 a 25 centavos de dólar por kWh. El costo de inversión para los colectores solares planos es de 242 USD/m<sup>2</sup> instalado.

En el Perú hay industrias importantes que fabrican equipos de energía solar térmica de baja temperatura. Las primeras iniciaron desde 1980 en Arequipa, otras se han desarrollado a lo largo de los años, y varias tienen reconocimiento internacional.

---

<sup>5</sup>Valera, A. (2009). Energía Solar. (pp. 53-88). Lima. Editorial Hozlo S.C.R.L.

Los colectores solares que se usan para agua caliente a baja temperatura utilizan una tecnología conocida, pero requieren de un buen fabricante, diseño e instalación para que pueda durar al menos 10 o 15 años, y sean redituables.

El investigador Octavio García Valladares, académico del Instituto de Energías Renovables (IER) de la UNAM, destacó en su artículo (LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA, CON GRAN POTENCIAL EN MÉXICO) que varios diseños mexicanos se enfrentan con los chinos. En México hay industrias importantes en este sector, pero chocan de frente con las tecnologías de ese país asiático, que entran a México a bajo costo, debido a la falta de normas que eviten la llegada de equipos de baja calidad y, por consiguiente, de corto tiempo de vida.

#### **2.2.6. La Transferencia de Calor<sup>6</sup>.**

El estudio de la termodinámica nos refiere a la transferencia de energía mediante las interacciones de un sistema con su alrededor. En estas interacciones aparece el concepto de trabajo y calor. Sin embargo, la termodinámica trata sistemas en equilibrio; puede usarse para predecir la cantidad de energía requerida para llevar un sistema desde un estado de equilibrio a otro; no puede usarse, en cambio, para predecir lo rápido que será el cambio, ya que el sistema no está en equilibrio durante el proceso.

---

<sup>6</sup> Kreith, F. – Manglik, R. (2012). Principios de transferencia de calor (pp. 3-68). Editorial CENGAGE Learning, México

La transferencia de calor es la ciencia que trata de predecir el intercambio de energía que puede tener lugar entre cuerpos materiales, como resultado de una diferencia de temperatura. La ciencia de la transferencia de calor pretende no sólo explicar cómo la energía térmica puede ser transferida, sino también predecir la rapidez con la que, bajo ciertas condiciones específicas, tendrá lugar esa transferencia.

La transferencia de calor complementa los principios primero y segundo de la termodinámica, al proporcionar leyes experimentales adicionales que se usan para establecer la rapidez de la transferencia de energía.

#### **2.2.6.1. La transferencia de calor en ingeniería.**

Desde el punto de vista de la ingeniería, la determinación de la rapidez de transferencia de calor a una diferencia de temperaturas especificada constituye el problema principal. Con el objeto de estimar el costo la factibilidad y el tamaño del equipo necesario para transferir una cantidad determinada de calor en un tiempo dado debe realizarse un detallado análisis de transferencia de calor. Por ejemplo, las dimensiones de las calderas, calentadores, refrigeradores y cambiadores de calor dependen no solo de la cantidad de calor que deba ser transmitido, sino también, de la rapidez con que deba transferirse el calor bajo condiciones dadas. Así mismo en el diseño de máquinas, rodamientos, transformadores, colectores solares, etc. Debe hacerse un análisis de transferencia de calor con el objeto de evitar las condiciones que provocarían sobrecalentamiento y daño al equipo.

Estos distintos ejemplos muestran que en casi todas las ramas de la ingeniería se encuentran problemas relacionados con la transferencia de calor que no puede resolverse con un simple análisis termodinámico.

Tanto en la transferencia de calor, como en otras ramas de la ingeniería, la solución adecuada de un problema requiere hipótesis e idealizaciones. Es casi imposible describir los fenómenos físicos en forma exacta, y para expresar un problema en forma de una ecuación que pueda resolverse, es necesario hacer algunas aproximaciones. Cuando se considere necesario formular una hipótesis o una aproximación en la solución de un problema, el ingeniero debe confiar en su habilidad y experiencia. Por ello es necesario conocer y planear el fenómeno físico involucrado en el problema dado.

En la transferencia de calor existen cuatro mecanismos de transferencia de calor

- Conducción
- Convección
- Radiación
- Transferencia de calor por cambio de fase

#### **2.2.6.2. Conducción.**

Es la forma de transferir calor mediante la cual el calor fluye y existe un intercambio de energía que va de una región de mayor temperatura a una de menor temperatura dentro de un medio (sólido, líquido o

gaseoso) o entre medios diferentes en contacto físico directo, se da por el movimiento cinético o el impacto directo de las moléculas como en el caso de fluidos en reposo o por el arrastre de los electrones, como es el caso de los metales. La energía posee un elemento de materia debido a la velocidad y a la posición relativa de las moléculas, a esto se le conoce como energía interna. Por tanto, para un elemento dado de materia, mientras más rápidamente se muevan sus moléculas, mayor será su temperatura y su energía interna. Cuando las moléculas de una región adquieren una energía cinética media mayor que la de las moléculas de una región adyacente, lo que se manifiesta por una diferencia de temperatura, las moléculas que poseen mayor energía en transmitirán parte de ella a las moléculas de la región más baja temperatura.

Algunos sólidos son buenos conductores eléctricos, un gran número de electrones libres se mueven alrededor de una estructura cristalina, por esta razón los materiales que son buenos conductores de electricidad son generalmente buenos conductores de calor. Independientemente del mecanismo exacto, el efecto observable de la conducción de calor es un equilibrio de temperaturas.

La conducción de calor es el único mecanismo por el cual puede fluir calor en sólidos opacos. La conducción es también importante en fluidos, pero en medios no sólidos generalmente esta combinada con la convección, y en algunos casos, también con la radiación.

### **2.2.6.3. Convección.**

La convección es un proceso de transporte de energía por acción combinada de conducción de calor, almacenamiento de energía y movimiento de mezcla. Cuando un fluido en movimiento pasa sobre un cuerpo sólido o fluye dentro de un canal y si las temperaturas del fluido y del sólido o del canal son diferentes, habrá transferencia de calor entre el fluido y la superficie sólida debido al movimiento relativo entre el fluido y la superficie.

La transferencia de calor por convección se clasifica de acuerdo con la forma de inducir el flujo, en:

#### **2.2.6.3.1. Convección Libre.**

Cuando el movimiento mezclado tiene lugar exclusivamente como resultado de la diferencia de densidades causado por gradientes de temperatura, se refiere a una convección natural o convección libre.

#### **2.2.6.3.2. Convección Forzada.**

Cuando el movimiento de mezclado es inducido por algún agente externo, tal como una bomba o un agitador, en proceso se conoce como convección forzada.

### **2.2.6.4. Radiación.**

Es un proceso mediante el cual fluye calor de un cuerpo de mayor temperatura a uno de menor temperatura, cuando dos cuerpos de temperaturas diferentes están separados por un vacío perfecto. No es

posible la transferencia de calor entre ellos por los otros dos medios; en tal caso la transferencia de calor ocurre mediante radiación térmica. Es decir, la energía radiante emitida por un cuerpo debido a su temperatura, es transmitida hacia el espacio en forma de ondas electromagnéticas de acuerdo con la teoría clásica de Maxwell o en forma de fotones discretos, de acuerdo con la hipótesis de Planck. El término radiación es aplicado a toda clase de fenómenos de ondas electromagnéticas, pero en transferencia de calor, son de interés los fenómenos que son resultado de la temperatura y por medio de los cuales se establece un transporte de energía a través de un medio transparente o a través del espacio.

Todos los cuerpos emiten calor radiante en forma continua. La intensidad de la emisión depende de la temperatura y de la naturaleza de la superficie. La energía radiante viaja a la velocidad de la luz (300,000 km/s) y es un fenómeno semejante a la radiación de la luz. En realidad, de acuerdo con la teoría electromagnética, la luz y la radiación térmica difieren únicamente en sus respectivas longitudes de onda. Cuando las ondas de radiación encuentran algún otro objeto, su energía es absorbida cerca de su superficie. La importancia de la transferencia de calor por radiación se hace mayor conforme se incrementa la temperatura de un objeto. En los problemas de ingeniería que involucran temperaturas que se aproximan a las del medio ambiente, el calentamiento por radiación frecuentemente puede ser menospreciado.

### 2.2.7. Energía Solar en el Perú<sup>7</sup>.

#### Potencial:

La radiación solar es en la mayor parte del territorio nacional muy constante durante el año:

Promedios mensuales no varían más de  $\pm 20\%$ .

Costa, selva: 4 – 5 kWh/m<sup>2</sup> día

Sierra: 5 – 6 kWh/m<sup>2</sup> día

Esto lo diferencia de otras energías renovables, como la eólica que varía fuertemente de un lugar a otro y, en la mayoría de lugares, de un mes a otro.

**Tabla 2.1.** Radiación Solar en el Perú.

#### RADIACIÓN SOLAR EN EL PERÚ (Promedio Anual).

Lugar	Departamento	Altitud (m)	Rad. Solar (/d) KWh/- día
Zorritos	Tumbes	5	4.93
Guayabamba	Iquitos	122	4.46
Tablazo	Piura	147	5.12
Tarapoto	San Martín	356	4.43
Lambayeque	Lambayeque	18	5.00
Cajamarca	Cajamarca	2750	6.58
Cartavio	La Libertad	51	4.86
Huaraz	Ancash	3207	5.79
Huánuco	Huanuco	1800	5.15
Atacocha	Cerro de Pasco	4023	5.45

<sup>7</sup> Atlas Solar del Perú: [www.minem.gob.pe](http://www.minem.gob.pe)

Fdo Iberia	Madre de Dios	180	5.52
Huancayo	Junín	3350	6.78
La Molina	Lima	251	4.59
Túnel Cerro	Huancavelica	4600	5.87
Kayra	Cuzco	3219	5.28
Abancay	Apurímac	2398	5.21
lea	lea	398	5.28
Cachapampa	Ayacucho	2450	6.62
Puno	Puno	3825	6.80
Characato	Arequipa	2461	7.09
Moquegua	Moquegua	1420	6.14
Calaña	Tacna	590	5.8

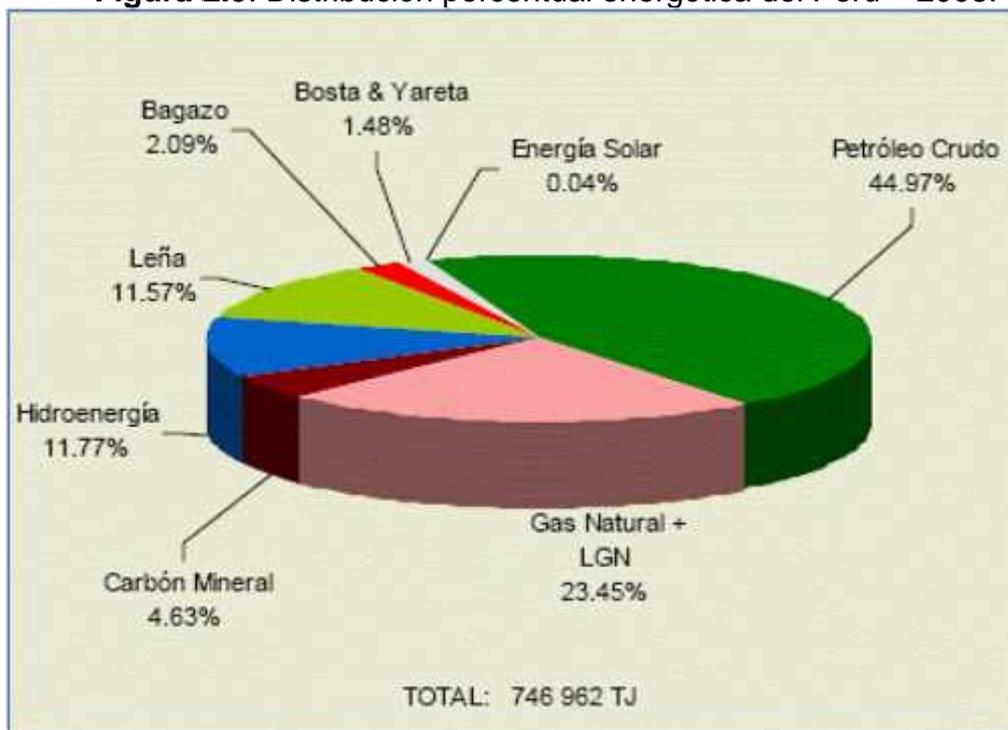
Fuente: Atlas Solar del Perú

#### 2.2.7.1. Matriz Energética Perú: 2008.

El Perú tiene la electricidad más económica de América Latina, sin embargo, casi toda la energía que utilizamos proviene de recursos energéticos no renovables.

El uso de energías renovables contribuye a la disminución de emisiones de Gases Energéticos Invernaderos (GEI) y otros gases contaminantes a la atmósfera.

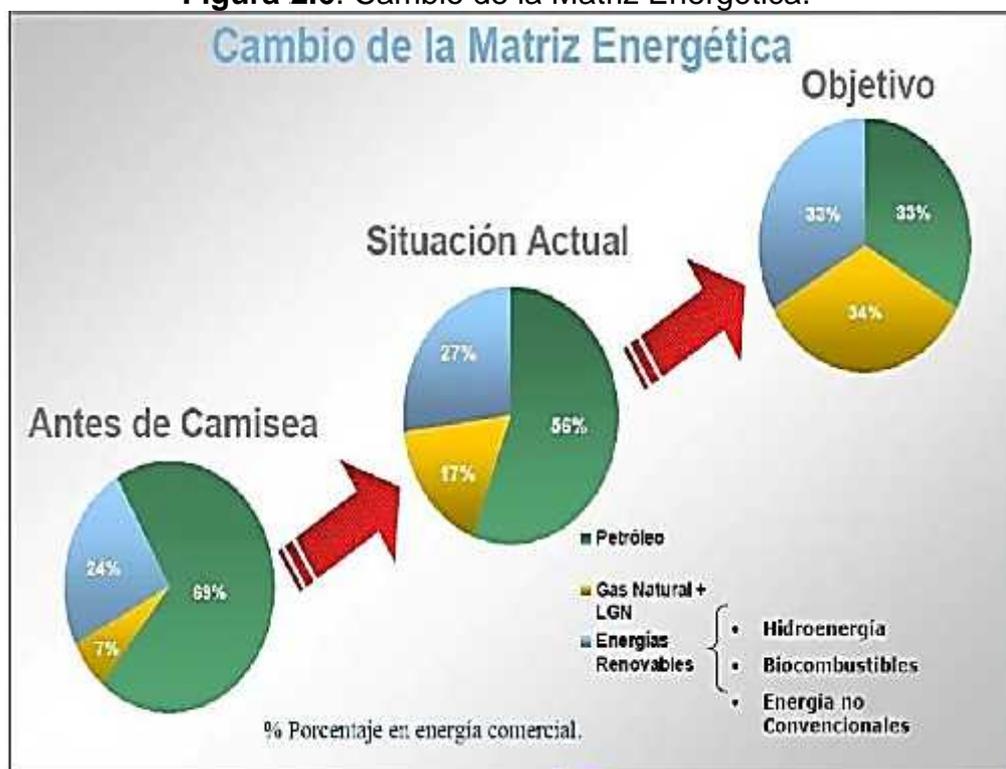
**Figura 2.5.** Distribución porcentual energética del Perú – 2008.



Fuente: Atlas Solar del Perú: [www.minem.gob.pe](http://www.minem.gob.pe)

**2.2.7.2. Panorama Energético en el Perú.**

**Figura 2.6.** Cambio de la Matriz Energética.



Fuente: Atlas Solar del Perú: [www.minem.gob.pe](http://www.minem.gob.pe)

### 2.2.7.3. Distribución de termas solares instaladas en el Perú

Por información (marzo 2011), existen más de 38700 Termas Solares en todo el Perú (94% en Arequipa).

**Figura 2.7.** Termas Solares Instalados en Perú.



Fuente: Atlas Solar del Perú: [www.minem.gob.pe](http://www.minem.gob.pe)

#### 2.2.7.4. Preferencia de Compra de Termas Solares en el Sector Residencial.

Figura 2.8. Preferencia de compra Sector Residencial.



Fuente: Atlas Solar del Perú.

#### 2.2.8. Terma Solar de Tubos al vacío.

Con el avance tecnológico se han ido desarrollando tipos de calentadores solares más eficientes y apropiados para diferentes usos, donde se necesite un rango de temperatura de trabajo mayor que la que se requiere para calentar agua para el aseo personal, tales como calentamiento industrial de fluidos, sistemas de refrigeración, etc. El que ha alcanzado mayor éxito es el calentador solar de tubos al vacío (Fig. 2.9).

Los calentadores de tubos al vacío tienen el mismo principio de trabajo que los colectores de plato plano, o sea, la radiación es recibida

por el absorbedor y llevada en forma de calor hacia un tanque acumulador. La diferencia consiste en que el absorbedor está formado por tubos en los cuales se ha hecho vacío para disminuir las pérdidas de calor y dentro del tubo van colocadas las secciones del plato absorbedor.

Hay varios modelos de colectores de tubos al vacío, en dependencia del movimiento del fluido y el método de transferencia de calor utilizado.

Los principales son:

- Tubos termosifónicos.
- Tubos en U.
- Tubos calóricos.

En todos los casos, los tubos van directamente acoplados al tanque-termo o a un cabezal, por donde fluye el agua o líquido a calentar.

**Figura 2.9.** Calentador solar de tubos al vacío.



Fuente: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca>

### 2.2.8.1. Tubos al vacío termosifónicos.

Renombrados institutos de investigación de Alemania e Inglaterra inventaron y experimentaron con tubos al vacío como colectores de energía solar. La tecnología es ahora muy aceptada por todo el mundo y ha sido usada por varios años en países como Alemania, Inglaterra, Canadá y China. Anteriormente este sistema era mucho más caro que el sistema común de serpentín. Recientemente el sistema de tubos al vacío se ha desarrollado, se han abierto más fábricas produciendo más volumen, y a su vez el precio está al alcance de más gente.

Cada tubo de vidrio al vacío consiste en dos tubos de vidrio. El tubo exterior está hecho de borosilicato transparente de alta resistencia capaz de resistir el impacto de un granizo de hasta 2.5 cms. de diámetro. El tubo interior está también hecho de vidrio de borosilicato, pero este está recubierto con nitrato de aluminio que tiene una excelente absorción del calor solar y mínimas propiedades de reflexión.

Durante la fabricación del tubo, perdiera el vacío, la capa, el aire es extraído (evacuado) del espacio entre los dos tubos de vidrio para formar el vacío, el cual elimina la pérdida de calor conductivo y convectivo. En orden a mantener el vacío un elemento de bario (como los tubos de televisión) es expuesto a alta temperatura, el cual causa que el fondo del tubo se cubra con una capa de bario puro (plateado). La capa de bario también es un indicador visual de que el tubo se mantiene al vacío. Si en algún caso el tubo de bario (plateada) se

convertiría en blanca. Esto ayuda a determinar si el tubo está operando eficientemente.

**Figura 2.10.** Tubo Termosifónico.

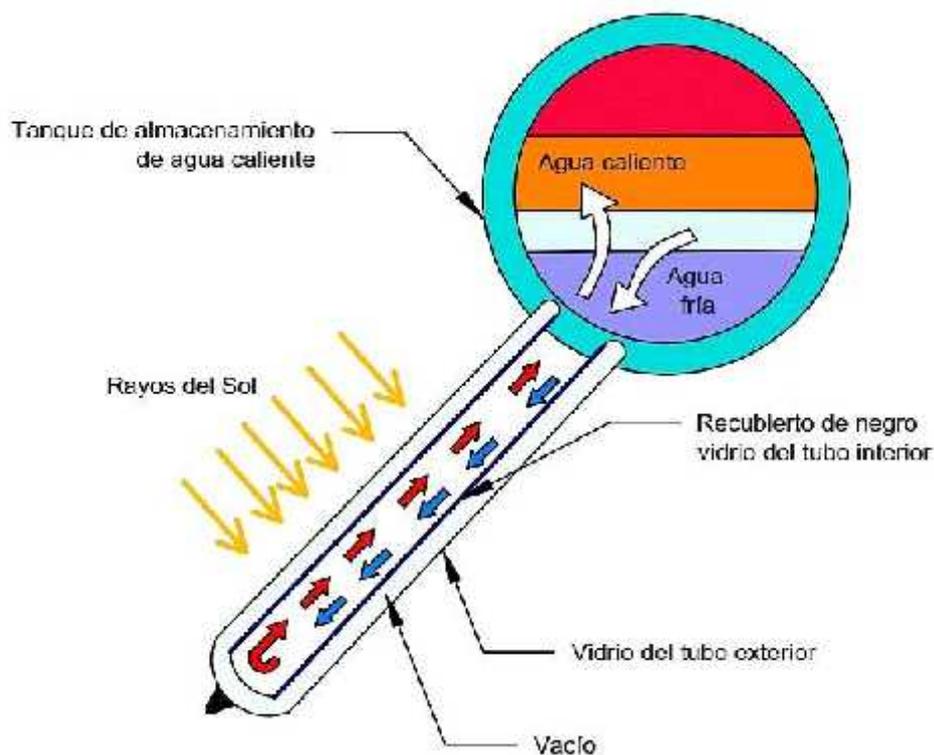


Fuente: <http://thermosol.com.mx>

#### 2.2.8.2. Funcionamiento.

El depósito acumulador de agua, recibe el agua fría y esta circula naturalmente por los tubos por diferencia de densidades, por lo que no requiere de una bomba ni otro elemento que le confiera movimiento.

El tubo de vacío recibe el agua fría de la parte inferior del termo tanque, el agua se calienta gracias a la energía solar absorbida y una vez caliente asciende de nuevo (por el mismo tubo) regresando al termo tanque, dando inicio una vez más al mismo ciclo.

**Figura 2.11.** Funcionamiento de un tubo termosifónico.Fuente: <http://thermosol.com.mx>**2.2.8.3. Ventajas de una terma solar de tubos al vacío.**

Los calentadores solares de tubos al vacío, son diferenciados por ser más eficientes que la terma de placa plana. La diferencia consiste en que el captador está formado por tubos en los cuales se ha hecho vacío para disminuir las pérdidas de calor; en el tubo interior está recubierto con una superficie reflectiva de triple capa (aluminio nitrato de plata).

**Ventajas:**

- Las ventajas principales son su alta eficiencia y su relativo bajo costo.

- Diseñados para trabajar sin problemas en zonas de congelamiento hasta 25°C bajo cero.
- La curvatura del tubo de vidrio ofrece una mayor resistencia a los impactos que los colectores planos. Se reporta que ha superado pruebas equivalentes a un granizo de 25 mm.
- En día nublado llega a calentar hasta 35°C.
- Puede alcanzar temperaturas superiores a los 70°C al día.

## CAPITULO 3

### MATERIALES Y MÉTODOS.

#### 3.1. MATERIALES PRELIMINARES.

Los datos y materiales, se presentan a continuación:

##### 3.1.1. Ubicación geográfica de Puno.

El departamento de Puno se encuentra localizado en la sierra del sudeste del país en la meseta del Collao a  $13^{\circ}66'00''$  y  $17^{\circ}17'30''$  de latitud Sur y los  $71^{\circ}06'57''$  y  $68^{\circ}48'46''$  de longitud Oeste del meridiano de Greenwich. Limita por el Sur, con la región Tacna. Por el Este, con la República de Bolivia y por el Oeste, con las regiones de Cusco, Arequipa y Moquegua.

La región Puno se encuentra en el altiplano entre los 3812 y 5500 m.s.n.m. y entre la ceja de selva y la selva alta entre los 4200 y 500 m.s.n.m. Cabe mencionar que la capital Puno, está ubicada a orillas del lago Titicaca el lago navegable más alto del mundo.

##### 3.1.2. Coordenadas geográficas de la ciudad de Puno

Las coordenadas geográficas de la ciudad de Puno son:

Latitud :  $15^{\circ} 50' 31''$  Sur.

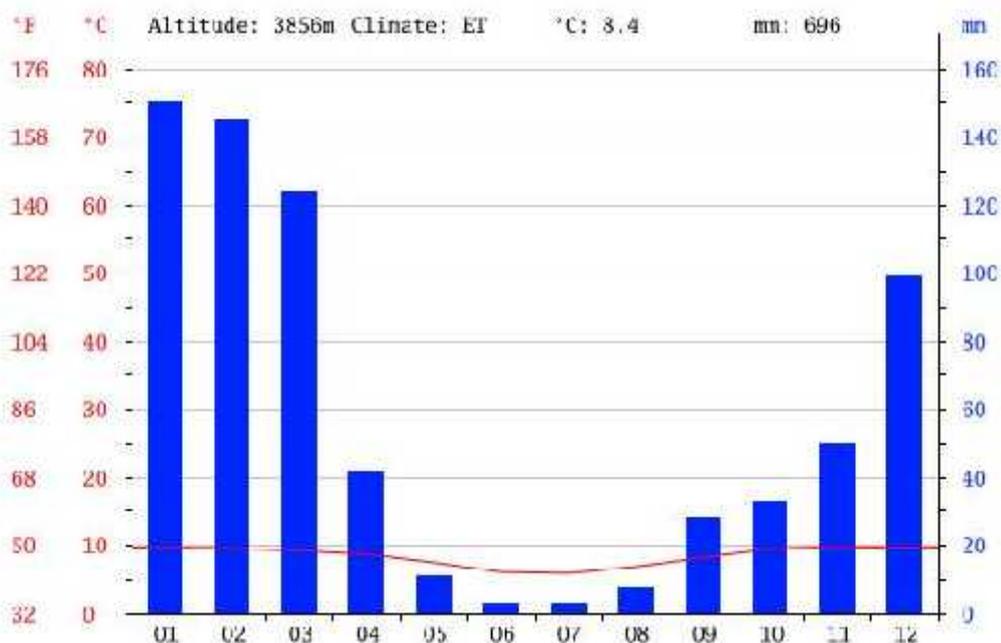
Longitud :  $70^{\circ} 01' 11''$  Oeste

Altitud sobre el nivel del mar: 3825 m.s.n.m.

### 3.1.3. Clima de Puno.

El clima en Puno es un clima de tundra, lo que significa que las temperaturas son muy bajas durante todo el año. La temperatura media anual en Puno se encuentra a 8,4°C. Con precipitaciones pluviales promedias de 696 mm. La variación en la precipitación entre los meses más secos y más húmedos es 147 mm. A lo largo del año, las temperaturas varían en 3,9°C. Las temperaturas son más altas en promedio en noviembre, alrededor de 9,8°C, Julio es el mes más frío, con temperaturas promedio de 5,9°C. La menor cantidad de lluvia ocurre en junio, el promedio de este mes es 3 mm. La mayor parte de la precipitación cae en enero, promediando 150 mm.

**Figura 3.1.** Climograma de Puno.



Fuente: <https://es.climate-data.org/location/1013/>

**3.1.4. Temperatura del aire promedio, mínima y máxima anual por Estación de medición, 1988 – 2015 en Puno.**

Información histórica de las temperaturas en Puno:

**Tabla 3.1.** Temperaturas promedio mínima y máxima anual en Puno (1988 – 2015).

Año	Ilo			Puno			Puerto Maldonado			SHNA	
	(Moquegua)			(Puno)			(Madre de Dios)			(Loreto)	
	Prom.	Min.	Mix.	Prom.	Min.	Mix.	Prom.	Min.	Mix.	Prom.	Mix.
1988	19.6	15.9	23.7	10.5	8.8	12.5	27.8	27.8	27.8	26.2	27.0
1989	19.7	16.2	24.6	9.7	8.4	10.9	26.4	24.9	27.5	...	26.1
1990	19.4	15.9	23.9	...	9.3	11.7	...	23.7	26.8	...	...
1991	19.8	16.4	23.4	10.3	8.6	11.3	...	26.1	27.5	...	...
1992	20.5	16.4	23.8	9.0	7.1	10.3	25.7	22.5	27.3	...	...
1993	20.0	17.0	24.0	7.7	6.5	8.7	...	24.2	27.8	...	...
1994	19.8	16.3	23.1	8.6	7.0	10.2	25.3	23.6	26.2	26.0	26.7
1995	19.5	15.9	23.8	9.9	7.2	13.4	...	23.6	26.2	26.6	27.2
1996	19.0	15.6	23.0	9.1	7.9	11.9	25.0	23.0	26.2	26.1	27.3
1997	21.7	19.6	23.8	9.4	7.8	12.2	24.7	23.4	25.7	26.6	27.8
1998	21.2	17.2	26.0	10.1	7.2	11.9	24.7	23.1	26.3	26.9	27.4
1999	20.2	17.1	24.4	9.9	8.4	11.1	...	24.7	24.7	26.1	27.0
2000	19.9	16.1	24.1	9.6	7.4	10.7	25.2	21.7	28.0	26.3	27.3
2001	20.0	15.9	24.6	8.2	6.5	9.8	...	23.4	27.6	26.1	27.0
2002	19.9	15.9	23.8	8.6	5.7	9.7	25.8	23.6	27.1	26.4	27.3
2003	19.9	15.8	24.6	8.9	5.9	10.9	25.4	23.7	26.5	26.5	27.1
2004	19.8	15.3	24.6	10.1	7.1	14.0	25.8	24.1	27.2	26.5	28.1
2005	19.8	16.5	24.3	11.5	8.4	12.9	25.2	24.5	26.1	26.9	27.4
2006	20.8	17.3	24.9	10.7	6.5	13.7	24.7	23.1	26.1	25.9	26.4
2007	18.7	14.8	24.6	11.4	8.6	13.5	23.8	21.7	25.6	26.2	27.6
2008	20.0	16.7	24.1	11.8	9.5	13.6	...	...	...	26.3	27.1
2009	20.5	16.2	24.9	11.9	10.1	13.4	...	...	...	26.6	27.7
2010	20.1	15.2	24.4	12.1	8.8	14.8	...	...	...	26.6	27.4
2011	20.4	16.7	24.4	11.9	10.7	14.2	...	...	...	26.1	26.6
2012	21.3	17.6	25.3	11.7	10.0	13.9	...	...	...	...	...
2013	20.3	17.0	24.9	11.6	9.5	14.2	...	...	...	...	...
2014	20.4	16.6	24.7	11.4	7.2	14.6	...	...	...	...	...
2015	21.9	18.6	25.7	12.0	11.1	12.9	26.6	21.9	31.4	27.4	22.9

Fuente: SENAMHI

3.1.5. Promedio diario mensual de radiación para el Perú (Kwh/m<sup>2</sup>/día).

Tabla 3.2: Tabla de Radiación Solar del Perú.

Site	Lat	Long	Ele	Yr	I	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Avg	Sr
Abancay	13,63 S	72,88	2398	2	1	5,42	4,89	5,03	4,94	4,72	4,56	4,81	5,11	5,08	5,86	5,97	5,33	5,14	H
Angostura	15,17 S	71,63	4155	3	1	5,47	4,92	4,89	4,97	4,83	4,78	4,89	5,36	5,42	6,86	6,14	5,64	5,28	H
Alacocha	10,58 S	76,22	4023	2	1	4,78	4,44	4,75	5,08	5,00	4,94	5,11	5,28	4,94	5,53	5,44	5,11	5,03	H
Bambamarca	6,68S	78,52	2600	3	1	4,75	4,67	4,64	4,69	4,56	4,94	5,11	5,17	5,17	5,17	5,53	5,39	4,96	H
Cajamarca	7,17S	78,52	2750	1	1	4,56	4,89	4,25	4,44	4,58	4,28	4,44	5,08	4,72	4,75	5,11	5,08	4,68	H
Calana	17,93 S	70,18	590	3	1	6,44	6,19	5,72	5,11	4,33	4,03	4,11	4,69	5,28	6,39	6,44	6,42	5,43	P
CampodeMarte	12,07 S	77,03	137	1	1	4,94	5,58	5,17	5,39	4,06	2,89	2,56	2,83	3,56	3,5	5,28	5,06	4,24	H
Capachica	15,63 S	69,83	3868	3	1	5,47	5,44	5,19	5,31	4,89	4,83	5,03	5,44	5,78	6,17	6,28	5,64	5,46	H
Cañete	13,10 S	76,30	36	3	1	5,19	5,19	5,14	4,97	3,92	2,97	2,92	3,17	3,56	4,25	4,75	5,22	4,27	H
Cartavio	7,92S	79,17	51	3	1	5,53	5,44	5,5	5,0	4,89	4,06	4,14	4,08	4,5	5,06	5,67	5,67	4,96	H
CasaGrande	7,77S	79,17	158	3	1	5,39	5,33	5,39	5,0	5,19	3,92	4,06	4,28	4,42	4,97	5,14	5,53	4,88	H
Caylloma	15,18 S	71,77	4320	2	1	5,56	4,92	4,78	4,86	4,75	4,78	4,97	5,44	5,31	6,06	6,14	5,86	5,28	H
Cayalli	6,88S	79,57	150	2	1	5,36	5,81	5,5	5,39	5,25	4,44	4,72	5,08	5,22	5,78	5,86	6,03	5,37	H
Characato	16,47 S	71,45	2461	3	1	6,14	5,33	6,56	5,50	5,22	4,81	5,19	5,64	6,11	6,92	7,06	6,58	5,84	H
Conococha	10,12 S	77,33	4020	3	1	4,86	4,33	4,44	4,72	4,78	4,89	5,17	5,42	5,25	4,69	5,53	5,08	4,95	H
CuencaRío Verde	15,48 S	70,67	4260	3	1	5,47	4,81	5,00	5,14	4,89	4,83	4,97	5,36	5,42	5,94	5,92	5,53	5,27	H
Cuzco	13,52 S	71,95	3365	3	1	5,19	4,69	4,92	5,03	4,81	4,78	5,06	5,11	5,17	5,64	5,75	5,22	5,11	H
Desaguadero	16,65 S	69,00	3850	3	1	5,72	5,56	5,58	5,53	4,92	4,67	4,81	5,39	5,47	6,17	6,06	5,67	5,46	H
DonMartin	11,03 S	77,68	50	3	1	5,33	5,06	5,06	4,86	4,0	3,25	3,36	3,58	3,97	4,36	5,03	5,44	4,44	H
El Fraile	16,15 S	71,18	4015	2	1	5,39	4,39	4,47	4,56	4,75	4,67	4,81	5,22	5,67	6,06	5,94	5,67	5,13	H
Fundolberia	11,35 S	69,57	180	3	1	4,81	4,67	4,64	4,31	4,25	4,31	4,69	5,25	5,03	5,0	5,06	4,61	4,72	H
GranjaM. Sassape	6,52S	79,92	45	1	1	5,75	5,81	6,22	6,28	5,83	5,0	4,86	5,31	5,81	6,0	5,94	5,89	5,72	H
HaciendaMajoro	14,83 S	74,97	620	3	1	5,56	5,72	5,81	5,06	5,03	4,28	4,53	5,06	5,81	6,58	6,36	5,94	5,48	H
Haciendita	17,02 S	71,62	450	2	1	6,42	5,58	5,92	5,33	4,39	4,06	3,94	4,5	4,78	6,08	6,42	5,56	5,25	H
Huaraz	9,53S	77,52	3207	2	1	5,06	4,83	5,08	5,11	5,25	5,11	5,39	5,72	5,47	5,28	5,72	5,5	5,29	H
Huancayo	12,05 S	75,18	3350	3	1	5,25	4,86	4,94	4,64	4,92	4,83	5,0	5,11	5,11	5,33	5,83	5,39	5,1	H
Huancayo	12,12 S	75,33	3380	3	1	7,38	6,71	6,54	6,54	6,18	6,28	6,3	6,75	7,18	7,47	7,75	7,21	6,86	P
Huánuco	9,90S	75,75	1912	2	1	4,67	4,53	4,64	4,64	4,78	4,58	4,81	5,14	4,86	5,08	5,33	4,89	4,83	H
Huraya-Moho	15,35 S	69,50	3890	3	1	5,25	4,69	5,0	5,31	4,83	4,83	5,14	5,56	5,69	5,86	6,03	5,31	5,29	H
Ica	14,08 S	75,73	398	2	1	5,86	5,0	5,42	5,11	4,78	5,75	4,17	4,81	5,25	6,17	6,44	6,14	5,41	H
Imata	15,82 S	71,07	4405	3	1	5,25	4,81	4,78	4,94	4,81	4,72	5,0	5,33	5,31	5,86	5,94	5,53	5,19	H
Juli	16,20 S	69,43	3862	2	1	5,5	4,81	4,47	5,25	5,11	4,78	4,97	4,97	5,47	6,06	6,06	5,33	5,23	H
Kayra	13,55 S	71,88	3219	2	1	5,0	4,47	4,61	4,86	4,64	4,78	4,97	5,03	5,08	5,33	5,56	4,89	4,93	H
Lagunillas	15,58 S	70,92	4280	3	1	5,67	5,22	5,11	5,03	4,67	4,53	4,89	5,53	5,58	6,28	6,39	5,75	5,39	H
Lambayeque	6,70S	79,90	18	3	1	5,17	5,61	5,5	5,31	5,08	4,64	4,39	4,72	5,03	5,47	5,64	5,81	5,2	H
LaMolina	12,08 S	76,95	251	3	1	5,03	5,17	5,25	5,0	3,97	3,33	3,31	3,56	3,75	4,36	4,83	5,08	4,39	H
Lampas Alto	10,08 S	77,28	4030	3	1	4,78	4,11	4,56	4,56	4,78	4,72	5,25	5,42	5,25	4,67	5,44	4,97	4,88	H
Lampas Bajo	10,07 S	77,37	3950	3	1	4,86	4,44	4,56	4,64	4,81	4,92	5,36	5,42	4,19	4,97	5,64	5,53	4,94	H
LaPunta	12,07 S	77,17	13	2	1	4,5	5,08	4,94	4,72	3,89	2,94	2,89	3,0	3,17	3,61	4,28	4,86	3,99	H
LaSalle	16,40 S	71,53	2330	3	1	6,14	5,33	5,58	5,33	5,22	4,72	5,11	5,64	5,94	6,58	7,06	6,58	5,77	H
Llaucan	6,68S	78,52	2600	1	1	4,64	4,89	4,56	4,08	4,14	4,47	4,39	4,72	5,03	5,28	5,53	5,69	4,78	H
LosCedros	3,13S	80,67	5	3	1	4,78	5,39	5,44	5,25	5,28	4,53	4,61	4,67	4,39	4,58	4,86	5,39	4,93	H
Moquegua	17,20 S	70,93	1420	2	1	7,67	5,19	5,89	5,92	5,14	4,92	5,0	5,75	6,5	7,03	7,33	7,28	6,13	H
Neshuya	8,63S	74,92	340	1	1	4,81	4,72	4,14	3,75	3,78	3,53	4,28	5,03	5,17	5,08	5,17	5,67	4,59	H
PampaBlanca	17,10 S	71,75	455	2	1	5,28	4,75	5,19	4,78	3,67	3,11	3,42	3,42	3,28	4,42	4,66	5,11	4,27	H
PampaDe Majes	16,35 S	72,17	1433	3	1	6,58	5,97	6,08	5,69	5,22	4,86	5,36	5,81	6,22	7,03	7,31	6,92	6,09	H
Pane	15,42 S	71,07	4524	3	1	5,03	4,69	4,58	4,67	4,33	4,61	4,64	4,83	4,83	5,22	5,72	5,31	4,87	H
Puno	15,83 S	70,03	3875	2	1	5,69	5,22	5,28	5,28	4,97	4,78	5,0	5,61	5,78	6,39	6,61	5,67	5,52	H
PuntadeCotes	17,68 S	71,38	15	2	1	6,67	6,36	6,61	5,19	4,14	3,25	3,0	3,67	3,42	4,58	6,36	6,28	4,96	P
Querococha	9,68S	77,35	3935	1	1	4,33	4,22	4,56	4,83	4,72	4,61	5,0	5,25	5,17	4,67	5,31	4,64	4,78	H
Quillabamba	12,83 S	72,72	1660	2	1	4,44	4,33	4,72	4,25	4,33	4,22	4,44	4,44	4,5	4,89	4,97	4,56	4,51	H
Salcedo	15,32 S	70,02	3852	3	1	5,47	5,11	5,11	5,14	4,83	4,61	4,69	5,28	5,5	6,17	5,36	5,64	5,34	H
San Jacinto	9,17S	78,32	283	3	1	5,06	4,33	5,17	4,94	4,75	4,0	4,33	4,5	4,97	5,72	5,83	5,83	4,95	H
San Jorge	8,53S	74,87	270	2	1	4,81	4,61	4,67	4,5	4,42	4,36	4,92	5,39	5,0	5,19	4,53	4,61	4,75	H
San Lorenzo	9,75S	77,47	3750	1	1	4,86	4,44	4,56	4,92	4,72	4,75	5,28	5,42	5,36	5,19	5,75	5,19	5,04	H
San Ramon	11,15 S	75,38	800	3	1	4,5	4,33	4,44	4,5	4,53	4,25	4,64	4,69	4,72	5,19	5,14	5,14	4,67	H
Sibayo	15,48 S	71,45	3847	3	1	5,36	4,69	4,69	4,94	4,81	4,75	4,89	5,0	5,22	5,86	5,94	5,53	5,14	H
Tablazo	5,37S	81,78	147	3	1	4,19	5,28	5,61	5,17	5,33	4,64	4,83	5,44	5,64	5,89	5,78	6,14	5,33	H
Tarapoto	6,58S	76,32	356	3	1	4,75	4,67	4,36	4,28	4,17	4,06	4,58	4,83	4,72	4,72	4,69	4,83	4,57	H
Tejedores	4,75S	80,23	2500	3	1	4,47	4,75	5,08	4,81	5,28	4,86	5,05	5,39	5,64	5,75	5,78	5,58	5,2	H
Tinajones	6,67S	79,47	220	3	1	5,44	5,61	5,39	5,58	5,72	5,06	5,75	5,86	6,0	6,22	6,5	6,64	5,81	H
Tunelcero	13,12 S	75,07	4600	3	1	4,97	4,67	5,14	4,97	4,67	4,81	5,08	5,42	5,28	5,66	6,97	5,44	5,19	H
Yurac	9,00S	75,67	420	3	1	4,31	4,0	4,14	4,11	3,94	3,67	4,17	4,72	4,69	4,67	4,64	4,31	4,28	H
Zorritos	3,67S	80,67	5	2	1	5,03	5,53	5,08	5,42	5,25	5,11	4,75	4,25	4,56	5,11	5,42	5,33	5,07	H

Fuente: SENAMHI

### 3.1.6. Radiación Solar en el Perú (promedio diario anual).

**Tabla 3.3.** Promedio diario anual de radiación solar en el Perú.

Lugar	Departamento	Altitud (m)	Radiación.Solar ( <i>I<sub>d</sub></i> ) (kWh/m <sup>2</sup> -día)
Zorritos	Tumbes	5	4,93
Guayabamba	Iquitos	122	4,46
Tablazo	Piura	147	5,12
Tarapoto	SanMartín	356	4,43
Lambayeque	Lambayeque	18	5,00
Cajamarca	Cajamarca	2.750	6,58
Cartavio	LaLibertad	51	4,86
Huaraz	Ancash	3.207	5,79
Huánuco	Huánuco	1.800	5,15
Atacocha	CerrodePasco	4.023	5,45
Fdo.Iberia	MadredeDios	180	4,52
Huancayo	Junín	3.350	6,78
LaMolina	Lima	251	4,09
TúnelCerro	Huancavelica	4.600	5,87
Kayra	Cusco	3.219	5,28
Abancay	Apurimac	2.398	5,21
Ica	Ica	398	5,28
Cachapampa	Ayacucho	2.450	6,62
Puno	Puno	3.825	6,80
Characato	Arequipa	2.461	7,09
Moquegua	Moquegua	1.420	6,14
Calana	Tacna	590	5,43

Fuente: World Solar Irradiation Database.

### 3.1.7. Orientación del Colector Solar de Tubos al Vacío

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

- **Ángulo de azimut ( $r$ ):** ángulo que forma la proyección sobre el plano horizontal de la perpendicular a la superficie del generador y la dirección Sur, vale  $0^\circ$  si coincide con la orientación Sur, es positiva hacia el Oeste y negativo hacia el Este. Si coincide con el Este su valor es  $-90^\circ$  y si coincide con el Oeste su valor es  $+90^\circ$ .
- **Ángulo de inclinación ( $s$ ):** ángulo que forma la superficie del generador con el plano horizontal. Su valor es  $0^\circ$  si el módulo se coloca horizontal y  $90^\circ$  si se coloca vertical.

Una superficie recibe la mayor cantidad posible de energía solar si es perpendicular a la dirección del sol. Como la posición del solo varía a lo largo del día, la posición óptima de la superficie también tendrá que ser variable; para que la superficie reciba la radiación solar perpendicularmente tendremos que inclinar la superficie un ángulo  $\beta$  con la horizontal igual al que forma la vertical del lugar con la radiación solar.

La orientación óptima será un valor constante, con una inclinación ( $\beta$ ) que va a depender de la latitud  $\phi$  del lugar y un azimut ( $\alpha$ ) que depende del hemisferio en el que está situado el colector solar.

Si pretendemos maximizar la captación de energía solar, la superficie tendrá que estar orientada hacia el Sur y por lo tanto el ángulo de azimut ( $\alpha$ ) debe ser nulo. El azimut óptimo debe ser cero ( $\alpha=0$ ), 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.

La inclinación óptima en función de la latitud del lugar se calcula por la expresión:

$$S_{opt} = 3,7 + 0,69(w) \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde:

$\beta_{opt}$ : ángulo de inclinación óptima (grados)

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

En la práctica se utiliza la expresión basada en la experiencia y la observación, que proporciona la inclinación óptima en función del periodo de tiempo y el uso que se le va a dar en el colector.

**Tabla 3.4.** Inclinaciones recomendadas para colectores solares.

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

Fuente: Guía práctica energía solar. Energía. AEN – España.

### 3.2. MÉTODOS.

En la metodología para diseñar la terma solar de tubos al vacío y tener éxito en los sistemas de calentamiento solar de agua influyen dos factores. El primer factor es el nivel de radiación solar en el lugar de instalación del calentador de agua y el segundo factor es el diseño del colector solar de tubos al vacío. La combinación de ambos factores determina el costo del sistema. Estos costos se reducen notablemente en regiones de alta incidencia solar.

#### 3.2.1. Aspectos generales.

Un aspecto importante a tener en cuenta en el diseño de calentadores solares es el régimen de uso del agua caliente, ya que éste puede variar debido a diversos factores. Por ejemplo, si una familia en la cual todos sus integrantes trabajan, el uso del agua caliente se hace al empezar el día o al terminar el mismo; sin embargo, en un baño comunitario, el uso del agua caliente se realiza durante todo el día, es decir conforme se produce el agua caliente, ésta se consume. Estas dos formas de uso del agua caliente se denominan sistema puntual y sistema continuo respectivamente.

En el diseño de sistemas de calentamiento es necesario disponer de datos que definan el sistema los cuales están representados por:

- Radiación solar
- Demanda energética
- Número de tubos al vacío del colector

- Volumen y aislamiento del depósito de almacenamiento del agua caliente.

### 3.2.2. Radiación solar.

En el diseño del sistema de calentamiento es necesario, en lo posible, conocer los datos de radiación solar diaria, los que se pueden encontrar en los reportes de radiación solar de las estaciones meteorológicas (SENAMHI).

En los sistemas de calentamiento del agua es importante definir los periodos de uso, ya que, como consecuencia de las estaciones climáticas, los valores de la radiación solar cambian por cada época del año.

Los criterios para la selección del valor de radiación solar en un periodo determinado, son:

- Baja radiación:** Se aplica cuando se desea cubrir durante todo el año la demanda de agua caliente con energía solar. En épocas de alta radiación esto hace ineficiente el sistema, por cuanto al incrementarse la radiación se produce un exceso de agua caliente.
- Alta radiación:** Se diseña con este valor cuando se cuenta con un sistema auxiliar para el calentamiento de agua, como electricidad, gas y en algunos casos leña. Son los sistemas más eficientes, pero su aplicación está limitada por el empleo de un sistema auxiliar.
- Valor promedio de radiación:** Satisface parcialmente la demanda en los meses de baja radiación.

### 3.2.3. Demanda energética.

Es la energía necesaria para elevar la temperatura de la masa de agua (M) desde la temperatura del agua fría ( $T_i$ ) hasta la temperatura de consumo final ( $T_f$ ). El calor ganado por el agua se calcula por la teoría de calorimetría de física:  $Q = MC_p (T_f - T_i)$

$$E = M C_p (T_f - T_i) \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Donde: E: Demanda energética (KJ/día)  
 M: Masa de agua a calentar en un día (Kg/día)  
 $C_p$ : Calor específico del agua (4,18 KJ/Kg-°C)  
 $T_i$ : Temperatura del agua fría que ingresa a la termo (°C)  
 $T_f$ : Temperatura de consumo del agua (°C)

La densidad del agua es:  $\rho_{H_2O} = M/V_p$ ; despejando la masa:

$$M = n_p \rho_{H_2O} V_p \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Donde:  $n_p$ : Número de personas (personas/día)  
 $V_p$ : Volumen de agua per cápita (Lt/persona)  
 $\rho_{H_2O}$ : Densidad del agua (1000 Kg/m<sup>3</sup>)

El volumen de agua per cápita  $V_p$  es la cantidad de agua que necesita una persona diariamente, este volumen varía en un rango de 20 a 60 litros.

### 3.2.4. Colector Solar de Tubos al Vacío.

En la determinación del número de tubos de vacío del sistema de calentamiento de agua es necesario conocer el área de captación y la eficiencia global del colector.

#### 3.2.4.1. Área de Captación Solar.

Es el área necesaria para captar la energía solar que pueda satisfacer la demanda energética. La calculamos dividiendo la energía necesaria para calentar el agua (E) entre la radiación solar promedio corregida ( $H_p \cdot \alpha_s$ ).

$$A_{\text{cap}} = \frac{E}{H_p \cdot \alpha_s} \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Donde:  $A_{\text{cap}}$ : Área de captación ( $\text{m}^2$ )

$H_p$ : Radiación solar ( $\text{Wh}/\text{m}^2$ )

$\alpha_s$ : Factor de corrección del tubo al vacío

#### 3.2.4.2. Factor de corrección del tubo al vacío.

El factor de corrección evalúa qué parte de la radiación solar incidente es captada realmente por el tubo de vacío. Es determinada en transferencia de calor en función a las propiedades ópticas del material del tubo de vacío.

$$\alpha_s = \frac{\tau_d}{1 - (1 - \tau_d)} < 1 \quad (\text{Ec. 3.5})$$

Donde:  $\tau$  : transmisividad de los tubos de vidrio de boro silicato con emisividad de  $\varepsilon = 0,88$

$\alpha$  : Absortividad de los tubos recubiertos de nitrato de aluminio y su emisividad de  $\varepsilon = 0,1$

$\rho_d$ : Reflectancia difusa de los tubos de vacío.

### 3.2.4.3. Número de tubos al vacío.

La cantidad de tubos al vacío necesario para satisfacer la demanda energética está determinada por la relación:

$$N_t = \frac{A_{cap} \cdot F_s}{A_t} \quad (\text{Ec. 3.6})$$

Donde:  $N_t$ : Número de tubos

$A_{cap}$ : Área de captación ( $m^2$ )

$A_t$ : Área de un tubo al vacío ( $m^2$ )

$F_s$ : Factor de seguridad (1 – 1,5)

### 3.2.5. Volumen y aislamiento del depósito de almacenamiento.

La temperatura a la que se almacena el agua, se denomina “temperatura equivalente” ( $T_{eq}$ ) la cual varía en función de la temperatura del agua fría. Sin embargo, el incremento de temperatura, es decir la temperatura equivalente menos la temperatura del agua fría, es un valor aproximadamente constante para cada sistema,  $35^{\circ}C$  en el sistema puntual y  $20^{\circ}C$  en el sistema continuo.

Con el valor de la temperatura equivalente se recalcula la demanda energética, y se obtiene otro valor de la masa de agua, que se denomina masa de agua a almacenar.

En los cálculos se reemplaza el valor de la temperatura de consumo por el de la temperatura equivalente, y el valor de la masa a calentar por el de masa a almacenar.

El volumen del depósito está determinado por la masa de agua a almacenar y por el tipo de uso, ya sea un sistema puntual o un sistema continuo.

En el sistema puntual, el volumen se calcula 15% más que la masa de agua a almacenar en un día:

$$V_{\text{dep}} = 1,15 M \quad (\text{Ec. 3.7})$$

Donde:  $V_{\text{dep}}$ : Volumen de depósito de almacenamiento (litros)

M: Masa de agua a almacenar (Kg/día)

En el sistema continuo, el volumen se calcula 20% de la masa de agua a almacenar, sin embargo, por detalles constructivos la capacidad del depósito no debe ser menor a 80 litros.

La selección del tipo y espesor del aislamiento del depósito de almacenamiento se presenta en la tabla 3.5.

**Tabla 3.5:** Tipo de Aislamiento y espesor recomendado.

Tipo de aislamiento	Espesor recomendado (mm)		Conductividad Térmica (W/m-°C)
	Sistema puntual	Sistema continuo	
Algodón	50	75	0,059
Asbesto	75	125	0,174
Lana o fibra de vidrio	35	50	0,038
Paja	50	100	0,090

Fuente: OPS/CEPIS/03.87-UNATSABAR.

## CAPITULO 4

### DIMENSIONAMIENTO DE LA TERMA SOLAR DE TUBOS AL VACÍO.

#### 4.1. PARÁMETROS DE LA TERMA SOLAR DE TUBOS AL VACÍO.

##### 4.1.1. Determinación del consumo de agua caliente y del patrón de demanda.

Para determinar el tamaño óptimo de una terma, primero se necesita conocer la demanda de agua caliente. Para calcular el consumo de agua caliente y el patrón de demanda de una casa, hotel o empresa, usamos la siguiente tabla de demanda agua de caliente.

**Tabla 4.1.** Cantidad de agua caliente usada por diferentes sectores.

Criterio de demanda	Litros ACS/día	
Viviendas unifamiliares	30	por persona
Viviendas multifamiliares	22	por persona
Hospitales y clínicas	55	por cama
Hotel****	70	por cama
Hotel***	55	por cama
Hotel/Hostal**	40	por cama
Camping	40	por emplazamiento
Hostal/Pensión*	35	por cama
Residencia (ancianos, estudiantes, etc.)	55	por cama
Vestuarios/Duchas colectivas	15	por servicio
Escuelas	3	por alumno
Cuarteles	20	por persona
Fábrica y talleres	15	por persona
Administrativos	3	por persona
Gimnasios	20 a 25	por usuario
lavanderías	3 a 5	por kilo de ropa
Restaurantes	5 a 10	por comida
Cafeterías	1	por almuerzo

Fuente: Reglamento de instalaciones térmicas de los edificios (RITE-España).

Se diseñará una terma solar para calentamiento de agua para satisfacer las necesidades de agua de una familia de cinco personas en la ciudad de Puno. La familia requiere de 30 litros de agua a 40°C por persona, considerando que la temperatura es alta para permitir que se mezcle con el agua fría proveniente de la red hidráulica de la casa, y permitir un mayor rendimiento del agua caliente almacenada en el tanque acumulador del sistema, es decir cada persona tendrá aproximadamente 60 litros de agua tibia, puesto que la temperatura de confort es aproximadamente 20°C. La utilización de agua caliente es solo para cubrir las necesidades básicas del baño y la cocina.

Condiciones de uso durante un año:

- En los meses de octubre a abril los integrantes de la familia utilizan el agua caliente en las noches y lo hacen todos los días sin excepción. El agua fría ingresa a un promedio de 11°C.
- En los meses de mayo a setiembre, los integrantes de la familia utilizan el agua caliente dejando un día. El agua fría ingresa a un promedio de 7°C.

Se diseñará un sistema puntual debido a que el uso del agua caliente se realizará al finalizar el día, para ello se partirá de un colector solar de tubos al vacío imaginario cuya eficiencia global es de 45%.

Planteamos dos sistemas, uno para los meses de octubre a abril (meses de alta radiación) y otro diseño para los meses de mayo a setiembre (meses de baja radiación). Luego por consideraciones de

diseño compararemos las áreas de captación solar necesario, se seleccionará el sistema de mayor área que garantizará la radiación solar necesaria para el calentamiento del agua.

Entonces el consumo de agua caliente en un día, la que tendrá que calentar la terma solar es igual a: 30 litros por persona/día.

#### 4.1.2. Diseño para los meses de alta radiación octubre a abril

##### 4.1.2.1. Radiación Promedio.

A partir de la tabla se determinan los valores de radiación mensuales para la ciudad de Puno, debido a que los valores no varían demasiado tomamos el valor promedio para efectuar los cálculos:

$$H_p = \frac{H_{\text{oct}} + H_{\text{nov}} + H_{\text{dic}} + H_{\text{ene}} + H_{\text{feb}} + H_{\text{mar}} + H_{\text{abr}}}{7} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

$$H_p = \frac{6,39 + 6,61 + 5,67 + 5,69 + 5,22 + 5,28 + 5,28}{7}$$

$$H_p = 5,73 \text{ Kwh/m}^2$$

##### 4.1.2.2. Demanda energética.

Se tiene las siguientes consideraciones de diseño:

$C_p$ : 4,18 KJ/Kg°C : Calor específico del agua

$T_i$ : 11°C : Temperatura del agua que ingresa a la terma

$T_f$ : 40°C : Temperatura final de calentamiento del agua

$n_p$ : 5 : Familia de cinco personas

$V_P$ : 30 L : Litros de agua caliente que requiere cada persona

$$\rho_{H_2O}: 1000 \text{ Kg/m}^3$$

Reemplazando en la ecuación (3.3):

$$M = n_p \rho_{H_2O} V_P$$

$$M = 5 \times 1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times 30 \text{L} \left( \frac{\text{m}^3}{1000 \text{L}} \right)$$

$$M = 150 \text{ Kg}$$

Luego, la demanda energética se calcula en la ecuación (3.2):

$$E = M C_p (T_f - T_i)$$

$$E = 150 \text{ Kg} \times 4,18 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} (40 - 11)^\circ\text{C}$$

$$E = 18183 \text{ KJ}$$

#### 4.1.2.3. Numero de tubos al vacío del Colector Solar.

Para determinar el número de tubos al vacío se emplea la siguiente información.

Los tubos a emplear en el diseño son los tubos termosifónicos, en los cuales el agua del termotanque fluye directamente por dentro del tubo interior, y su movimiento dentro del mismo se debe al cambio de densidad del agua más caliente, la cual sube, y la menos caliente, que baja. En este caso, la presión del termotanque se transmite al tubo de

vidrio. Los tubos de vacío tienen casi nula reflectividad, y las bajas pérdidas por radiación debido a que están hechos de boro-silicato, y la placa de nitrato de aluminio que se encuentra adherido al tubo receptor. Las características técnicas de los tubos de vacío termosifónicos son estándares en la región:

Espesor	: 3 mm
Diámetro exterior	: 58 mm
Diámetro interior	: 50 mm
Longitud	: 1800 mm (50 mm se insertan en el termotanque en el montaje).
Longitud útil	: 1750 mm

El área de captación de la radiación o irradiación solar está dada por la ecuación (3.4):

$$A_{\text{cap}} = \frac{E}{H_p \cdot \alpha_s}$$

Donde:

$E = 18183 \text{ KJ}$  : Demanda energética calculada

$H_p = 5,73 \text{ Kwh/m}^2$  : Radiación promedio calculada

$\alpha_s$ : factor de corrección.

El factor  $\alpha_s$  determina el porcentaje de la radiación incidente que llega a los tubos de vacío y es determinado por la ecuación (3.5):

$$\alpha_s = \frac{1}{1 - (1 - r_d)}$$

Donde:

$\tau = 0,74$  (transmisividad de los tubos de vidrio de boro silicato y tiene una emisividad  $\varepsilon = 0,88$ )

$\alpha = 0,99$  (absortividad de los tubos recubiertos de nitrato de aluminio y su emisividad es de  $\varepsilon_p = 0,1$ )

$\rho_d = 0,16$  (reflectancia difusa de los tubos de vacío).

Reemplazando en la ecuación (3.5):

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

$$s = 0,733$$

El área de captación solar necesario es igual a:

$$A_{\text{cap}} = \frac{18183 \text{ KJ}}{5,73 \frac{\text{Kwh}}{\text{m}^2} \times 0,733 \frac{\text{KJ/S}}{\text{KW}} \left( \frac{3600 \text{ S}}{\text{h}} \right)} \quad (\text{Ec. 4.2})$$

$$A_{\text{cap}} = 1,20 \text{ m}^2 \quad (\text{área del colector solar de tubos de vacío})$$

Para el cálculo del área de incidencia de cada tubo al vacío, se consideró con un margen de seguridad de diseño, que la radiación solar solo incide sobre la mitad de la superficie cilíndrica exterior de los tubos de vacío; para un tubo de vacío su área cilíndrica exterior ( $A_t$ ) será:

$$A_t = \frac{d_e \cdot L}{2} \quad (\text{Ec. 4.3})$$

Donde:  $d_e = 0,058$  (diámetro exterior)

$L = 1,75$  m (longitud útil)

$$A_t = \frac{0,058 \times \pi \times 1,75}{2}$$

$$A_t = 0,16 \text{ m}^2$$

El número de tubos de vacío empleando la ecuación (3.6):

$$N_t = \frac{A_{\text{cap}} \times \text{F.S.}}{A_t}$$

Donde:

F.S. = 1,00 (Factor seguridad). La presión del termo tanque se transmite al tubo de vidrio. Estos calentadores de tubos temosifónicos no resisten sobrepresión y normalmente trabajan a presión atmosférica. No necesitan intercambiadores de calor, ya que calientan el líquido directamente. Si un tubo se rompe, el sistema entero colapsa porque se queda sin agua. Entonces para este caso el F.S. = 1,00.

$$N_t = \frac{1,20 \text{ m}^2 \times 1,00}{0,16 \text{ m}^2}$$

$$N_t = 7,5 \text{ tubos de vacío}$$

∴ Para el diseño se considerarán:

$$N_t = 8 \text{ tubos de vacío}$$

#### 4.1.3. Diseño para los meses de mayo a setiembre (meses de baja radiación).

##### 4.1.3.1. Radiación promedio.

De la tabla 3.2 obtenemos los valores de radiación mensuales para la ciudad de Puno.

$$H_p = \frac{H_{\text{may}} + H_{\text{jun}} + H_{\text{jul}} + H_{\text{ago}} + H_{\text{set}}}{5} \quad (\text{Ec. 4.4})$$

$$H_p = \frac{4,97 + 4,78 + 5,0 + 5,61 + 5,78}{5}$$

$$H_p = 5,23 \text{ Kwh/m}^2$$

##### 4.1.3.2. Demanda energética.

Se tiene los siguientes datos:

$$T_i: \quad 7^\circ\text{C}$$

$$T_f: \quad 40^\circ\text{C}$$

$$V_P: \quad 30 \text{ L}$$

El número de personas se considera la mitad debido a que en estos meses el uso del agua caliente es Inter diario, por lo tanto, el número de personas será  $5/2$  igual a 2,5, considerando para el diseño 3 personas.

Reemplazando los datos en la ecuación (3.3):

$$M = 3 \times 1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times 30 \text{L} \left( \frac{\text{n}^3}{1000 \text{L}} \right) = 90 \text{ Kg}$$

Luego la demanda energética será, en la ecuación (3.2):

$$E = 90 \text{ Kg} \times 4,18 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} (40 - 7)^\circ\text{C}$$

$$E = 12414,60 \text{ KJ}$$

#### 4.1.3.3. Número de tubos al vacío del colector solar.

Los parámetros  $A_t$ ,  $\alpha_s$  y F.S fueron calculados en el ítem 4.1.2.3:

$$A_t = 0,16 \text{ m}^2 \quad : \text{área superficial del tubo de vacío}$$

$$\alpha_s = 0,733 \quad : \text{factor de corrección del tubo de vacío}$$

$$F.S = 1,00 \quad : \text{factor de seguridad}$$

$$H_p = 5,23 \text{ Kwh/m}^2 \quad : \text{radiación solar promedio}$$

Reemplazando en la ecuación (3.4) y aplicando factores de conversión:

$$A_{\text{cap}} = \frac{E}{H_p \cdot s}$$

$$A_{\text{cap}} = \frac{12414,60 \text{ KJ}}{5,23 \frac{\text{Kwh}}{\text{m}^2} \times 0,733 \frac{\text{KJ/S}}{\text{KW}} \left( \frac{3600 \text{ S}}{\text{h}} \right)}$$

$$A_{\text{cap}} = 0,90 \text{ m}^2$$

El número de tubos al vacío del colector solar se determina en la ecuación (3.6):

$$N_t = \frac{A_{\text{cap}} \times F.S}{A_t}$$

$$N_t = \frac{0,90 \text{ m}^2 \times 1,00}{0,16 \text{ m}^2}$$

$$N_t = 5,63 \text{ tubos al vacío}$$

Por consiguiente, para el diseño se considerarán:

$$N_t = 6 \text{ tubos al vacío}$$

Comparando los dos diseños, consideramos el de 8 tubos de vacío, que nos dará la seguridad de satisfacer la demanda de agua caliente durante todo el año.

#### 4.1.4. Dimensionamiento del tanque de almacenamiento.

Se diseñó considerando el sistema puntual de calentamiento de agua, el incremento de temperatura es de 35°C por consideraciones de diseño.

Entonces la temperatura equivalente a la que se almacenará el agua es:

$$T_{\text{eq}} = T_i + 35 = 11 + 35 = 46^\circ\text{C}$$

Recalculando la demanda energética que podrá cubrir la terma solar diseñada con 8 tubos; en la ecuación (3.4):

$$E = N_t \times H_P \times A_t \times \alpha_s$$

Donde:

$$N_t = 8 \text{ tubos de vacío}$$

$$H_P = 5,73 \text{ Kwh/m}^2$$

$$A_t = 0,16 \text{ m}^2$$

$$\alpha_s = 0,733$$

Reemplazando los datos:

$$E = 8 \times 5,73 \frac{\text{Kwh}}{\text{m}^2} \times 0,16 \text{ m}^2 \times 0,733 \times \left( \frac{3600\text{S}}{\text{h}} \times \frac{\text{KJ/S}}{\text{Kw}} \right)$$

$$E = 19354,01 \text{ KJ}$$

Despejando la masa en (3.2):

$$M = \frac{E}{4,18 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} (T_{\text{eq}} - T_i)}$$

Donde:

$$E = 19354,01 \text{ KJ}$$

$$T_{\text{eq}} = 46^\circ\text{C}$$

$$T_i = 11^\circ\text{C}$$

Reemplazando:

$$M = \frac{19354,01 \text{ KJ}}{4,18 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} (46 - 11)}$$

$$M = 132,29 \text{ Kg}$$

Por lo que el volumen del depósito de almacenamiento, por consideraciones de diseño el factor de seguridad es de 15% más, en la ecuación (3.7):

$$V_{\text{dep}} = 1,15 \times 132,29$$

$$V_{\text{dep}} = 152,13 \text{ L}$$

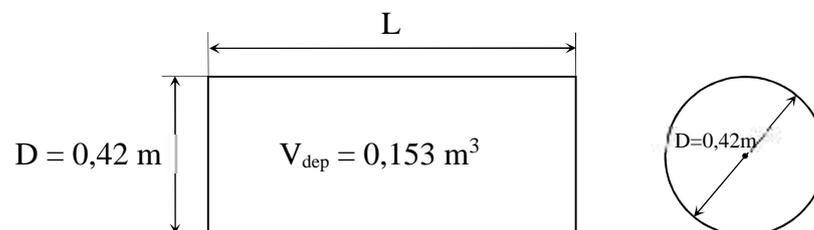
Entonces:

$$V_{\text{dep}} = 153 \text{ L} = 0,153 \text{ m}^3$$

#### 4.1.4.1. Dimensionamiento del tanque de almacenamiento.

Considerando el diámetro del tanque cilíndrico de 420mm = 0,42m:

**Figura 4.1.** Vistas frontal y lateral del tanque de almacenamiento.



Fuente: elaboración propia.

Se sabe que el volumen cilíndrico es:

$$V_{\text{dep}} = \frac{f D^2}{4} \cdot L \quad (\text{Fórmula matemática del volumen de un cilindro}).$$

Donde:

$$V_{\text{dep}} = 0,153 \text{ m}^3$$

$$D = 0,42 \text{ m}$$

$$L = ?$$

Reemplazando datos:

$$0,153\text{m}^3 = \frac{f (0,42\text{m})^2}{4} \cdot L$$

Operando:

$$L = 1,10 \text{ m}$$

Las dimensiones interiores del tanque de almacenamiento serán:

$$D = 0,42 \text{ m} = 420 \text{ mm}$$

$$L = 1,10 \text{ m} = 1100 \text{ mm}$$

#### **4.1.4.2. Cálculo del espesor de aislamiento del tanque de almacenamiento de agua caliente.**

Para el cálculo del espesor de aislamiento necesario para mantener la temperatura del agua caliente en el tanque de almacenamiento, establecemos el esquema de la pared cilíndrica del tanque (fig. 4.2); solo calcularemos las pérdidas de calor por la superficie cilíndrica del tanque, puesto que las pérdidas de calor por las tapas del tanque son insignificantes con respecto a las de la superficie cilíndrica.

##### **4.1.4.2.1. Pérdidas por conducción en la superficie cilíndrica del tanque.**

Aplicando transferencia de calor, la ecuación<sup>8</sup> en función a la resistencia térmica total la establecemos en la Figura 4.2:

---

<sup>8</sup> Kreith, F. & Manglik, R. (2012). Principios de transferencia de calor (pp. 24-36). México, Editorial CENGAGE Learning.

$$Q_{\text{conduc}} = \frac{T_{\text{eq}} - T_a}{R_{\text{total}}} \quad (\text{Ec. 4.5})$$

Donde:

$T_{\text{eq}}$ : Temperatura en el interior del tanque

$T_a$ : Temperatura del ambiente

$R_{\text{total}}$ : Suma de resistencia por conducción en cada una de las capas del tanque.

$$R_{\text{total}} = R_{c1} + R_{c2} + R_{c3} \quad (\text{Ec. 4.6})$$

Para el cálculo de cada una de las resistencias térmicas por conducción para superficies cilíndricas, la teoría de la transferencia de calor establece la ecuación:

$$R_c = \frac{\ln\left(\frac{D}{d}\right)}{2 L K} \quad (\text{Ec. 4.7})$$

Donde:

D: diámetro mayor de la capa que se está calculando

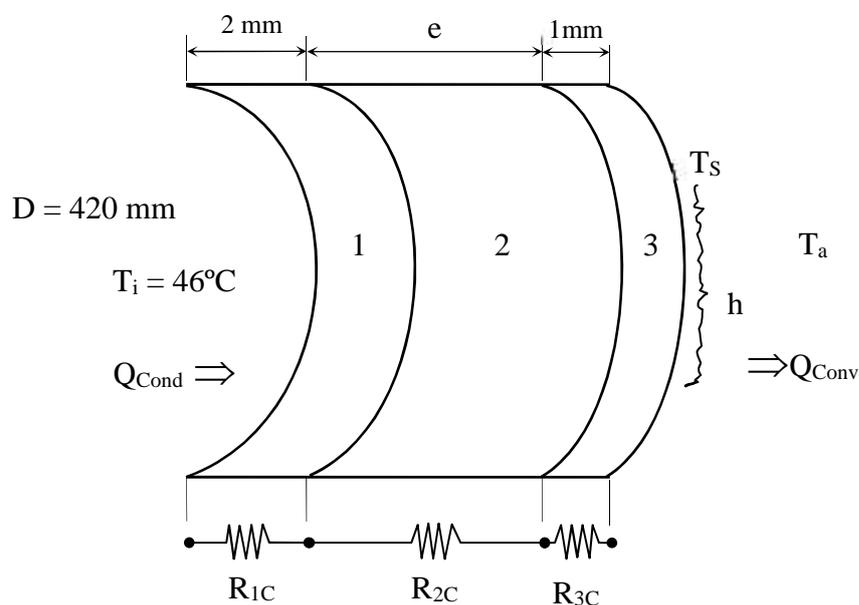
d: diámetro menor de la capa

L: longitud del cilindro

K: coeficiente de conductividad térmica de los materiales.

Tabla 4.2.

**Figura 4.2.** Redes de resistencias térmicas.



1. Plancha acero inoxidable
2. Aislante fibra de vidrio
3. Plancha negra acero dulce

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4.2.** Coeficiente de conductividad térmica de materiales.

MATERIAL	COEFICIENTE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA K (W/m°C)
Plancha de acero inoxidable	15,75
Aislante fibra de vidrio	0,038
Plancha negra acero dulce	58,600

Fuente: Kreith, F. (2011). Principios de transferencia de calor (pp. 297-325).

Para los cálculos del espesor (e) de aislamiento necesario, la temperatura del ambiente ( $T_a$ ) la consideraremos el promedio de la temperatura mínima de los años 2001 – 2015, de la tabla 3.2:

$$T_a = (6,5 + 5,7 + 5,7 + 7,1 + 8,4 + 6,5 + 8,6 + 9,5 + 10,1 + 8,8 + 10,7 + 10,0 + 9,5 + 7,2 + 11,1) / 15$$

$$T_a = 8,37 \text{ }^\circ\text{C}$$

En el esquema de la figura 4.2, se debe cumplir por el principio de la conservación de la energía:

$$Q_{\text{conduc}} = Q_{\text{convec}} \quad (\text{Ec. 4.8})$$

Consideración que utilizaremos para calcular el espesor “e” del aislamiento de fibra de vidrio, lo realizaremos iterando valores de “e”, hasta que se cumpla la igualdad, que según la tabla 3.5 debe estar alrededor de 35 mm como recomendación. También considerando el coeficiente de transferencia de calor por convección  $h=19,20 \text{ w}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , por estar instaladas las termas solares en las azoteas, donde existe viento.

**Tabla 4.3.** Valores típicos del coeficiente de transferencia de Calor.

PROCESO	(W/hm <sup>2</sup> °C)
CONVECCIÓN NATURAL	
Gases	2 – 25
Líquidos	50 – 1000
CONVECCIÓN FORZADA	
Gases	25 – 250
Líquidos	50 – 20000

Fuente: Incropera, F-Witt. D. (1996). Introduction to heat transfer, 3ª ed. John Wiley.

Para calcular el espesor del aislamiento “e” del tanque de almacenamiento, realizamos un proceso iterativo, dando valores al espesor “e” hasta que se cumpla la igualdad de la ecuación (4.8):

$$Q_{\text{conduc}} = Q_{\text{convec.}}$$

### Cálculo del $Q_{\text{conduc}}$ considerando $e = 29 \text{ mm}$

$$R_{1C} = \frac{\ln\left(\frac{0,422}{0,420}\right)}{2 (1,10)15,75} \quad (\text{Ec. 4.7})$$

$$R_{1C} = 0,0000436 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_{2C} = \frac{\ln\left(\frac{0,451}{0,422}\right)}{2 (1,10)0,038}$$

$$R_{1C} = 0,253056597 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_{3C} = \frac{\ln\left(\frac{0,452}{0,451}\right)}{2 (1,10)58,6}$$

$$R_{1C} = 0,000005468 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

Entonces:

$$R_{\text{total}} = 0,253105706 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

Por consiguiente, reemplazando en la ecuación (4.5):

$$Q_{\text{conduc}} = \frac{(46 - 8,37)^\circ\text{C}}{0,253105706 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}}$$

$$Q_{\text{conduc}} = 148,6731 \text{ W}$$

### Cálculo del calor $Q_{\text{convec}}$ considerando $e = 29 \text{ mm}$

Por transferencia de calor:

$$Q_{\text{convec}} = h A_s (T_s - T_a) \quad (\text{Ec. 4.9})$$

Donde:

$$h = 20,85 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$A_s$  = área superficial del tanque

$T_s$  = temperatura de la superficie del tanque,  $13^\circ\text{C}$

$T_a$  = temperatura del ambiente,  $8,37^\circ\text{C}$

Cálculo de  $A_s$ :

$$A_s = \pi D_e \cdot L$$

$$A_s = \pi (0,484 \text{ m}) (1,10 \text{ m})$$

$$A_s = 1,67 \text{ m}^2$$

$$\text{Entonces: } Q_{\text{convec}} = 19,20 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C}} \times 1,67 \text{ m}^2 (13 - 8,37)^\circ\text{C}$$

$$Q_{\text{convec}} = 148,46 \text{ W}$$

Siendo  $Q_{\text{conduc}} = Q_{\text{convec}}$ , por consiguiente, el espesor de aislante de fibra de vidrio será igual  $e = 29$  mm en el diseño.

#### 4.2. DETERMINACIÓN DE LA ORIENTACIÓN E INCLINACIÓN DEL COLECTOR SOLAR DE TUBOS AL VACÍO.

El colector solar se debe orientar de forma que a lo largo del periodo anual de utilización aproveche al máximo la radiación solar disponible. Como Puno está situado en el hemisferio sur entonces la orientación del colector solar debe ser hacia el norte geográfico, 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.

La superficie de nuestro colector solar de tubos al vacío recibirá 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 inclinación óptima ( $\beta_{\text{opt}}$ ) depende de la latitud ( $\phi$ ) de Puno y de su azimut ( $\alpha$ ), el cual para que la superficie fija reciba la mayor cantidad posible de energía solar debe ser cero ( $\alpha=0^\circ$ ).

Entonces calculamos la inclinación óptima en la ecuación:

$$\beta_{\text{opt}} = 3,7 + 0,69 |\phi| \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde:

$|\phi|$  : Latitud de Puno, sin signo (grados)

$\beta_{\text{opt}}$ : ángulo de inclinación óptimo (grados)

Latitud de Puno:  $15^{\circ}50'31'' = 15,8386^{\circ}$

Entonces:

$$\beta_{\text{opt}} = 3,7 + 0,69 |15,8386|$$

$$\beta_{\text{opt}} = 14,63$$

Utilizando la tabla (3.4) de inclinaciones recomendadas, se tiene para un consumo anual constante.

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

Entonces para la ciudad de Puno:

$$\beta_{\text{opt}} = 15,8386^{\circ}$$

Cuya variación porcentual con respecto a la primera determinación de  $\beta_{\text{opt}} + 1,2086$  (8,26%).

Variaciones<sup>9</sup> de  $\pm 10^{\circ}$  con respecto al ángulo de inclinación óptima no afectan sensiblemente el rendimiento y la energía térmica útil aportada por el equipo.

#### 4.3. DISCUSIÓN.

En el desarrollo de la tesis, la determinación de las condiciones que debe reunir la terma solar de tubos se hizo en función a las

---

<sup>9</sup> Tobajas, C. (2008). Energía solar térmica (pp. 98-107). España. Edit. Técnica España.

recomendaciones del reglamento de instalaciones térmicas de los edificios (RITE).

Determinándose que la terma solar de tubos al vacío termosifónico es para una familia de 5 personas, con un consumo de 30 litros de agua caliente por persona, constituyendo la capacidad del termotanque de almacenamiento del agua caliente de 150 litros a una temperatura de 40°C, lo cual es suficiente para las tareas domésticas que necesiten agua caliente y, es más considerando que la temperatura confort del agua es 20°C en los manuales de calefacción, el agua a 40°C tendrá que mezclarse con agua fría para aumentar la producción del agua caliente aproximadamente 300 litros a una temperatura de 20°C.

En el mercado regional se expenden termas con una capacidad de 150 litros con un termotanque de diámetro de 450 mm y una longitud de 1200 mm y el colector de tubos al vacío tiene de 14 a 15 tubos y su costo aproximado es de 1300 soles.

La terma solar diseñada en la tesis tiene una capacidad del termotanque de 153 litros con un diámetro de 420 mm y 1100 mm de longitud; el colector solar de tubos de vacío solo tiene 8 tubos y su costo aproximado es de 920 soles.

La diferencia principal en cuanto al número de tubos que es significativa de 6 a 7 tubos y que determina el precio de la terma, se explica a que las termas que se venden en la región están sobredimensionados en cuanto a su diseño, al no considerarse las condiciones ambientales de Puno en cuanto a la radiación solar y la

inclinación del colector solar; en ese sentido estas termas para que aseguren el calentamiento del agua a 40°C tienen de 6 a 7 tubos en exceso y un ángulo de inclinación del colector mayor de 40° siendo el ángulo óptimo para Puno de aproximadamente 16°. Estas sobredimensiones de diseño repercuten en el precio obviamente.

Desde el punto de vista técnico-económica la terma solar diseñada en la tesis se debe fabricar en la China por el menor costo de producción significativo de 92 dólares aproximadamente respecto a los 920 soles de fabricación en Puno y, la importación de la terma desde china no debe ser problema considerando la coyuntura comercial de nuestro mundo globalizado y la perspectiva de buenas ganancias económicas.

## CAPITULO 5

### CONCLUSIONES.

Se diseñó una terma solar de tubos termosifónicos al vacío para las condiciones ambientales de Puno.

- Las características técnicas del tanque de almacenamiento de agua caliente de la terma solar son las siguientes: es cilíndrico de una longitud de 1,10 m y un diámetro de 0,42 m con una capacidad volumétrica de 153 litros. La pared interna del termotanque cilíndrico en contacto con el agua estará constituida por una plancha interior de acero inoxidable de 2 mm de espesor, el aislante de lana de fibra de vidrio es de 29 mm de espesor y una plancha para el recubrimiento exterior de acero dulce negro de 1 mm de espesor.
- El colector solar de la terma llevará 08 tubos al vacío del tipo termosifónicos, cuyas especificaciones técnicas del tubo son: diámetro exterior 58 mm, diámetro interior 50 mm, espesor 3 mm, longitud 1800 mm y longitud útil 1750 mm.
- El costo económico total de la terma solar diseñada es de 920 soles, siendo los componentes: los tubos termosifónicos, el termotanque y la estructura del soporte metálico. Cada tubo en la región cuesta 50 soles por consiguiente el costo de los tubos sería 400 soles; en la industria metalmeccánica el costo del termotanque es 80% del costo de los tubos al vacío, es decir 320 soles y el soporte metálico de la terma 50% del costo de los tubos y su precio será de 200 soles. Concluyéndose que

la terma solar diseñada con capacidad de 153 litros, con 8 tubos al vacío; costaría en Puno un 34,23% menos que una terma de capacidad similar ofertada en una tienda a 1400 soles, con las especificaciones de 150 litros y 15 tubos al vacío.

## CAPITULO 6

### RECOMENDACIONES.

Desde el punto de vista de ahorro energético el uso de termas solares, es la opción más favorable, ya que en estos sistemas, la fuente de calor es la radiación solar, (que no cuesta nada) la cual sustituye los combustibles fósiles o la electricidad; y en función a la experiencia adquirida en el desarrollo de la tesis, se recomienda que la Escuela Profesional y la Universidad impulsen la investigación en el área de la energía solar por las ventajas competitivas de la región de Puno, que ayudarán a elevar el nivel de vida social y económica de la población a través del uso de termas solares económicas, aplicación en la calefacción solar de habitaciones y el surgimiento de empresas dedicados al diseño para solucionar problemas de ingeniería solar.

Recomiendo también la investigación en temas de optimización de tecnologías existentes a nivel mundial que están calculadas a nivel del mar y cierta ubicación geográfica, las cuales se pueden optimizar específicamente para nuestra región Puno, como el presente trabajo de tesis.

## CAPITULO 7

### REFERENCIAS.

- Valera, A. (2010). Energía Solar (pp. 53-90). Lima. Editorial Hazlo S.C.R.L.
- Orbegozo, C. (2012). Calentamiento de agua mediante el uso de termas solares (pp. 35-46). Lima. Editorial Toolconsult.
- Rosenthal, P. (2013). Sistemas solares (pp. 121-152). Cochabamba. Editorial Proper Bolivia.
- Horn, M. (2012). Ingeniería del secado solar (pp. 4-16). Lima. Editores Corvalan.
- Cengel, Y. – Ghajar, A. (2014). Transferencia de calor y masa. (pp.17-48). Editorial McGraw Hill.
- Kreith, F. (2011). Principios de transferencia de calor (pp. 297-325). México. Editorial CENGAGE Learning.
- Burbano, J. – Restropo, a. (2006). Diseño y Construcción de un Calentador Solar de agua operando por termosifón (pp. 85-90). Colombia. Scientia et Technica. Año XII, N° 31, agosto.
- Colque, O. – Condori, A. (2016). Determinación de la eficiencia de una terma solar de tubos al vacío en Puno (pp. 35-55) Puno. Tesis Ingeniería Mecánica Eléctrica. Universidad Nacional del altiplano de Puno.

- Laqui, J. – Incacutipa, E. (2004). Banco de ensayo para determinar la eficiencia de un colector solar plano de baja temperatura (pp. 37-81) Puno. Tesis Ingeniería Mecánica Eléctrica. Universidad Nacional del Altiplano de Puno.
- Berriz, L. (2017). Calentador de tubos al vacío (pp. 1-8). Cuba.  
<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/articulo02.htm>
- <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/energia39/html/articulo02.htm>
- [https://es.made-in-china.com/tag\\_search\\_product/Borosilicate-Solar-Vacuum-Tube\\_nrrriogn\\_1.html](https://es.made-in-china.com/tag_search_product/Borosilicate-Solar-Vacuum-Tube_nrrriogn_1.html)

## ANEXOS.

### ANEXO 01. DIMENSIONES DE PLANCHAS ACEROS AREQUIPA.

## Planchas de Acero Inoxidable (Sheets and Plates) ASTM A240 / ASME SA240

### CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO

Tipo de Producto	Norma	Aplicación según la norma	Acabado	Grado	Espesor (mm)	Formato					
						1219 mm X 2438 mm (4' x 8')	1500 mm X 3000 mm	1524 mm X 3048 mm (5' x 10')	1500 mm X 6000 mm	1524 mm X 6096 mm (5' x 20')	1800 mm X 6000 mm
Planchas	A-240	Industria Petroquímica, tanques, etc.	NO. 1	304/304 L	3.0 – 50.0	*	*	*	*	*	
				316/316 L	4.5 – 50.0	*	*	*	*	*	
				310 S	3.0 – 25.0	*	*	*	*	*	
				253MA	6.0 – 20.0	*	*	*	*	*	
				DUPLEX 2304S	6.0 – 32.0						*
				41003 (CROMGARD®)	3.0 – 12.0				*	*	
			2B	201	0.4 – 3.0	*					
					304/304 L	0.4 – 0.5	*				
						0.6	*	*	*		
						0.7	*				
				0.8 -2.5		*	*	*			
				316/316 L	3.0 – 6.0	*	*	*	*	*	
					430	0.4 -0.9	*				
						1.0	*	*	*		
						1.2	*				
				1.5 – 2.5		*	*	*			
				BA	430	0.4 – 2.0	*				
						BA-PVC	430	0.4 – 0.6	*		
			N4-PVC	201	0.5 -1.5			*			
					304/304 L	0.4 – 0.7	*				
				0.8 -2.0		*	*	*			
				430	0.4 – 0.9	*					
					1.0 – 1.2	*	*	*			
				1.5 – 2.0	*						

\* Otros formatos a pedido.

ANEXO 02. PRECIOS DE TUBOS AL VACÍO EN CHINA.

**Alibaba.com**  
Global trade starts here.™

Catálogo de fabricantes - X  
Es seguro | <https://spanish.alibaba.com/g/solar-vacuum-tube.html>

**Filtros de producto**  
+ Ver más

**Uso**

- Termal solar (0163)
- Calentador de agua (9383)
- sistema de aire acondicionado (112)

**Material de la pila**

- Vidrio (12703)
- Cobre (2222)
- PVC (21)

Pedido mínimo:  OK

**Filtros de proveedor**

**Proveedor por área**

- East Asia (51992)
- Middle East (51)
- South Asia (30)
- North America (12)
- Europa (9)
- Southeast Asia (4)
- Africa (3)

**Proveedor por país/región**

Recomendación

<p><b>Económico tubo de vacío solar</b></p> <p>Haining Mayca Solar Technology Co., Ltd.</p> <p>US \$1-1.5 / Unidad 3000 Unidad/es (Pedido mínimo)</p> <p>Contactar Proveedor</p>	<p><b>Tubo de vacío solar</b></p> <p>Haining Jiating Solar Energy Co., Ltd.</p> <p>US \$5-7 / Set 100 Set/s (Pedido mínimo)</p> <p>Contactar Proveedor</p>	<p><b>56mm/1800mm tubos de vacío solar tubos</b></p> <p>Haining ChaoDa Solar Collector Tubi...</p> <p>US \$1.5-2.5 / Unidad 100 Unidad/es (Pedido mínimo)</p> <p>Contactar Proveedor</p>	<p><b>Babysun plata titanio tubos de vacío solar</b></p> <p>Zhejiang Babysun New Energy Tech...</p> <p>US \$1.5-2.5 / Barra 100 Barra/s (Pedido mínimo)</p> <p>Contactar Proveedor</p>
<p><b>BTE vacío para u tubo colector solar en china</b></p> <p>Dezhou BTE Solar Co., Ltd.</p> <p>US \$70-300 / Unidad 1 Unidad/es (Pedido mínimo)</p> <p>Contactar Proveedor</p>	<p><b>Alta calidad todo vidrio evacuado solar tubos de vacío</b></p> <p>Shandong Yaoguo Solar Science Ab...</p> <p>US \$1-2.5 / Unidad 1 Unidad/es (Pedido mínimo)</p> <p>Contactar Proveedor</p>	<p><b>Tubos de vacío solar</b></p> <p>Zhejiang Huitas Solar Energy Techni...</p> <p>US \$2.16-9.33 / Unidad 100 Unidad/es (Pedido mínimo)</p> <p>Contactar Proveedor</p>	<p><b>Pila de calor del calentador de agua solar tubos de vacío con</b></p> <p>Haining Diceso Import And Export C...</p> <p>US \$5.55-6.5 / Unidad 100 Unidad/es (Pedido mínimo)</p> <p>Contactar Proveedor</p>

ANEXO 03. SOPORTE DE TERMA SOLAR.

