



Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad de Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables

Carrera de Ingeniería Electromecánica

**Implementación, experimentación y evaluación térmica de un calentador solar
de agua en espiral, para la vivienda sustentable de la Facultad de la Energía,
las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables.**

**Trabajo de Titulación previo a la
obtención del Título de Ingeniero
Electromecánico**

AUTOR:

Daniel Alejandro Sáenz Sócola

DIRECTOR:

Ing. Thuesman Estuardo Montaña Peralta Mg.Sc.

Loja - Ecuador

2022

Certificación

Loja, 7 de septiembre de 2022

Ing. Thuesman Estuardo Montaña Peralta. Mg.Sc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

C e r t i f i c o:

Que he revisado y orientado todo el proceso de elaboración del Trabajo de Titulación denominado: **Implementación, experimentación y evaluación térmica de un calentador solar de agua en espiral, para la vivienda sustentable de la Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Electromecánico**, de la autoría de la estudiante, **Daniel Alejandro Sáenz Sócola**, con **cédula de identidad Nro.1400881650**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja, para el efecto, autorizo la presentación del mismo para su respectiva sustentación y defensa.

Digitally signed by THUESMAN ESTUARDO
MONTANO PERALTA
Date: 2022.09.07 16:25:24 COT

Ing. Thueman Esatuardo Montaña Peralta. Mg.Sc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Autoría

Yo, **Daniel Alejandro Sáenz Sócola**, declaro ser autor del presente Trabajo de Titulación y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos o acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi Trabajo de Titulación en el Repositorio Institucional - Biblioteca Virtual.



Firma:

Cédula: 1400881650

Fecha: 13 de diciembre del 2022

Correo electrónico: daniel.saenz@unl.edu.ec

Teléfono: (07)2722752 / 0967074430

Carta de Autorización por parte del autor, para la consulta, producción parcial o total y/o publicación electrónica del texto completo, del Trabajo de Titulación.

Yo **Daniel Alejandro Sáenz Sócola**, declaro ser el autor del Trabajo de Titulación denominado : **Implementación, experimentación y evaluación térmica de un calentador solar de agua en espiral, para la vivienda sustentable de la Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables**, como requisito para optar por el título de: **Ingeniero Electromecánico**, autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los trece días del mes de diciembre del dos mil veintidós.

Firma:



Autor: Daniel Alejandro Sáenz Sócola

Cédula: 1400881650

Correo electrónico: daniel.saenz@unl.edu.ec

Teléfono: (07)2722752 / 0967074430

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director de Trabajo de titulación: Ing. Thuesman Estuardo Montaña Peralta Mg.Sc.

Dedicatoria

Este Trabajo de Titulación va dedicado a:

A mi padre Galo Sáenz quien con su paciencia, esfuerzo, amor y dedicación me ha permitido cumplir hoy uno de mis más grandes sueños, gracias por todo el tiempo que usaste para enseñarme todo lo necesario para poder salir adelante, no solo con palabras sino también con acciones, siempre serás un ejemplo de lo que significa ser un hombre de bien y todo lo que uno debe sacrificar con el fin proteger y cuidar a la familia, en silencio observaba tu manera de actuar con los demás, respetando el valor de la vida de cada persona, me enseñaste a siempre ser humilde con todos y nunca dudar de extender la mano a quien lo necesita, aún falta muchas cosas que necesito comprender de este mundo y espero que sigas a mi lado aconsejándome mientras continuo en el camino de la vida.

Las siguientes palabras van dedicadas a mi madre Deici Sócola por su cariño y apoyo incondicional, durante todo mi camino educacional siempre estuviste a mi lado, vigilándome, enseñándome, cuidándome, nunca me he sentido solo gracias a que siempre sabía que podía contar contigo e hiciste mucho esfuerzo para que saliera adelante con mis estudios, cuando era niño me protegiste de los peligros del mundo y fuiste la primera maestra que me enseñó a comportarme, gracias por estar siempre atenta a todo lo que me sucede y por estar preocupada si me encuentro triste o enfermo, siempre seré tu hijo y deseo cada día devolverte el amor que me das.

A mis hermanos Génesis Sáenz y Dylan Sáenz que siempre han sido mi apoyo emocional, son buenos hermanos y estoy orgulloso de ustedes, siempre contarán con mi apoyo, cariño y amor, así que como ustedes me lo entregan todo el tiempo.

Daniel Alejandro Sáenz Sócola

Agradecimiento

Agradezco a la Universidad Nacional de Loja por la educación superior impartida y por el apoyo que me brindaron durante mis años de estudios.

A mis profesores por compartir sus conocimientos y experiencias laborales con el fin de formarnos como profesionales.

A mi director de Trabajo de Titulación por su paciencia y dedicación para salir adelante con este proyecto.

A mis familiares que siempre estuvieron dando ánimos y alentándome a seguir adelante hasta completar la carrera.

A mis compañeros de carrera que estuvieron junto a mí durante todos estos años, quienes siempre me brindaron su ayuda y buenos deseos.

Nuevamente a la Universidad Nacional de Loja por permitirme construir e instalar el calentador solar dentro del establecimiento y cerca de otros proyectos previos para resaltar el conocimiento de los estudios realizados dentro de la carrera.

Daniel Alejandro Sáenz Sócola

Índice de contenidos

Portada	i
Certificación	ii
Autoría	iii
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vi
Índice de contenidos	vii
Índice de tablas	xi
Índice de figuras	xi
Índice de anexos	xi
Índice de simbología y acrónimos	xi
1. Título	¡Error! Marcador no definido.
2. Resumen	2
2.1. Abstract	3
3. Introducción	4
4. Marco Teórico	6
4.1. Radiación solar	6
4.1.1. Irradiación solar	7
4.1.2. Tipos de radiación solar sobre superficies	7
4.1.3. Formas de transmitir calor	8
4.1.4. Radiación solar en la provincia de Loja	8
4.2. Zona climática de la ciudad de Loja	9
4.3. Energía solar térmica	9
4.3.1. Aplicaciones solares térmicas	10
4.3.1.1. Calentamiento directo.	10
4.3.1.2. Acumulación de calor	10
4.4. Instalación solar térmica	10
4.4.1. Sistema de captación	11
4.4.2. Sistema de acumulación	11
4.4.3. Sistema auxiliar	11
4.4.4. Sistema de distribución	11

4.4.5. Sistema de control y regulación	11
4.5. Algunas aplicaciones de una instalación solar térmica	12
4.5.1. Producción de agua caliente sanitaria (A.C.S).....	12
4.5.2. Calefacción.....	12
4.5.3. Calentamiento de piscinas.....	12
4.6. Calentadores solares de agua.....	12
4.6.1. Calentador de tubos de al vacío.....	13
4.6.1.1. Colector de vacío de tubos de calor (Heat-Pipe).....	13
4.6.1.2. Colector de vacío de tubo en "U" (U-Tube).....	14
4.6.1.3. Colector de vacío de flujo directo.	14
4.6.2. Calentador de placa plana	15
4.6.3. Calentador solar de agua en espiral (CSE).....	16
4.6.3.1. Descripción del calentador en espiral.....	16
4.6.3.2. Primeras investigaciones.....	16
4.7. Tipología de viviendas de interés social	17
4.7.1. Normativa MIDUVI.....	17
4.7.2. Selección de tuberías.....	17
4.7.3. Dimensionamiento de tuberías	18
4.7.4. Sistema termosifón.....	18
5. Metodología.....	20
5.1. Materiales	20
5.2. Métodos.....	22
5.2.1. Experimentación del prototipo original.....	22
5.2.1.2. Adquisición y análisis de datos del prototipo original.	22
5.2.2. Análisis de la zona donde se implementará el proyecto.....	23
5.2.2.1. Exploración de la geografía local.....	23
5.2.2.2. Caracterización de la energía solar en el lugar de emplazamiento.	23
5.2.2.3. Análisis del clima en la FEINNR.....	24
5.2.2.4. Consumo de agua caliente sanitaria.	24
5.2.3. Investigar sobre la estructura y funcionamiento del sistema.....	24
5.2.3.1. Realizar una investigación sobre avances de calentadores solares.	24

5.2.3.2. Establecimiento de la metodología teórica de diseño.	24
5.2.3.3. Consultar sobre los componentes necesarios para el calentador solar.	24
5.2.4. Diseño del calentador solar	24
5.2.4.1. Demanda energética.	24
5.2.4.2. Área de captación.	25
5.2.5. Balance de energía del calentador solar	25
5.2.5.1. Coeficiente total de transferencia de calor (U_l).	27
5.2.5.1.1. Conductancia en la parte superior (U_t).	27
5.2.5.1.2. Conductancia en la parte inferior (U_b).	28
5.2.5.1.3. Conductancia en la parte lateral (U_e).	29
5.2.5.2. Factor de eficiencia del colector (F')	29
5.2.5.3. Factor de remoción de calor (F_R).	29
5.2.5.4. Cálculo del calor útil (Q_U).	30
5.2.6. Volumen y aislamiento del depósito de almacenamiento	30
5.2.7. Pérdida de calor en el depósito de almacenamiento.....	31
5.2.8. Pérdida de calor en las tuberías de agua caliente	32
5.2.9. Eficiencia del colector solar	32
5.3. Cálculo de pérdidas por fricción y accesorios.....	33
5.4. Construcción del prototipo final.....	35
5.5. Implementación del calentador solar.....	35
5.6. Evaluar térmicamente el sistema de calefacción en espiral en la vivienda sustentable de la FEIRNNR.....	35
6. Resultados	37
6.1. Objetivo 1	37
6.1.1. Descripción general del prototipo original del proyecto	37
6.1.2. Adquisición de datos del prototipo original	39
6.1.3. Análisis de los datos de temperatura del prototipo original.	40
6.1.4. Formulación de hipótesis para correcciones del prototipo original	41
6.1.5. Experimentación del funcionamiento del sistema de calefacción en espiral ...	42
5.1.5.1. Estructura de soporte del calentador solar.....	42
5.1.5.2. Implementación de los componentes del calentador solar.	42

6.2. Objetivo 2.....	46
6.2.1. Diseño del calentador solar en forma de espiral plano.....	46
6.2.2. Diseño del colector solar.....	47
6.2.2.1. Área de captación.....	47
6.2.2.2. Área efectiva del colector.....	48
6.2.2.3. Selección de la caja aislante.....	51
6.2.2.4. Selección del aislante inferior.....	52
6.2.2.6. Selección del aislante lateral.....	52
6.2.2.7. Selección del material reflectante.....	52
6.2.2.8. Selección de la cubierta de vidrio.....	52
6.2.2.9. Ensamblaje del colector solar en espiral plano.....	53
6.2.3. Coeficiente total de transferencia de calor.....	54
6.2.3.1. Coeficiente de pérdidas de la parte superior.....	54
6.2.3.2. Coeficiente de pérdidas de la parte inferior.....	55
6.2.3.3. Coeficiente de pérdidas en la parte lateral.....	55
6.2.4. Cálculo del factor de remoción de calor.....	56
6.2.5. Cálculo del calor útil ganado por el colector.....	56
6.2.6. Cálculo del rendimiento teórico del colector solar.....	56
6.2.7. Cálculo del depósito de almacenamiento.....	57
6.2.7.1. Selección del depósito de almacenamiento.....	57
6.2.7.2. Pérdidas térmicas en el depósito de almacenamiento.....	58
6.2.8. Pérdidas por fricción en las tuberías de agua.....	62
6.2.9. Cálculo de pérdidas térmicas en la tubería de agua caliente.....	65
6.2.10. Cálculo de la presión manométrica en el rollo de mangueras.....	69
6.2.11. Construcción del prototipo final.....	70
6.2.12. Implementación del calentador solar.....	72
6.3. Objetivo 3.....	73
6.3.1. Monitoreo y validación funcional de la instalación solar.....	75
6.4. Evaluación económica del sistema de calentamiento de agua diseñado.....	78
6.4.1. Presupuesto para la construcción del calentador solar.....	78
6.4.2. Estudio económico de la instalación solar.....	80

6.4.3. Aporte a la reducción de CO ₂ con respecto al GLP.	84
7. Discusión	85
8. Conclusiones	86
9. Recomendaciones	87
10. Bibliografía	88
11. Anexos	94

Índice de tablas:

Tabla 1. Materiales del prototipo de calentador	21
Tabla 2. Tipo de aislamiento y espesor recomendado.....	31
Tabla 3. Longitud equivalente para cada accesorio.	34
Tabla 4. Factor de fricción según el diámetro de tubería.	35
Tabla 5. Propiedades termo físicas del agua a temperatura media.....	58
Tabla 6. Propiedades termo físicas del aire a temperatura T ₃	61
Tabla 7. Propiedades termo físicas del agua a temperatura media.....	66
Tabla 8. Propiedades termo físicas del aire a T ₃	68
Tabla 9. Eficiencia del colector en los días de prueba.	75
Tabla 10. Comparación de la eficiencia de calentadores solares.	78
Tabla 11. Presupuesto para la construcción del calentador solar	78
Tabla 12. Análisis económico del calentador solar	84

Índice de figuras:

Figura 1. Radiación solar.	6
Figura 2. Componentes de la radiación solar terrestre.	7
Figura 3. Formas de transmitir calor.	8
Figura 4. Componentes de una instalación solar térmica.....	10
Figura 5. Partes de un calentador solar de tubos al vacío.	13
Figura 6. Tubo de vacío del tipo Heat Pipe.....	14
Figura 7. Tubo de vacío del tipo tubo en "U".	14
Figura 8. Partes de un calentador solar de placa plana.	15
Figura 9. Calentador solar en espiral.....	16

Figura 10. Sistema termosifón.	19
Figura 11. Metodología propuesta para el desarrollo del proyecto.....	22
Figura 12. Flujo de calor del colector solar.....	26
Figura 13. Diagrama térmico de un colector solar plano.	27
Figura 14. Transferencia de calor para un cilindro corto y largo.....	31
Figura 15. Diagrama térmico de un termotanque sencillo.	32
Figura 16. Fotografía del prototipo original.....	37
Figura 17. Colector solar cónico de doble espiral.....	38
Figura 18. Termotanque herméticamente aislado.	39
Figura 19. Sistema de adquisición de datos (DAQ).....	39
Figura 20. Datos de temperatura del prototipo cónico.....	40
Figura 21. Datos adquiridos del colector solar original en enero de 2022.....	41
Figura 22. Adquisición de datos del prototipo original.....	41
Figura 23. Adecuación de la estructura de soporte del calentador solar.	42
Figura 24. Instalación de los componentes del calentador solar.	42
Figura 25. Experimentación con la diferencia de altura.	43
Figura 26. Experimentación en el aislamiento térmico de las tuberías.....	43
Figura 27. Experimentación en el aislamiento térmico en el termotanque.	44
Figura 28. Experimentación en la cubierta del colector.....	45
Figura 29. Experimentación con el diámetro de manguera del colector.....	46
Figura 30. Generación del espiral en SolidWorks 2018.	48
Figura 31. Diseño del rollo de mangueras en SolidWorks 2018.....	50
Figura 32. Dimensionamiento de la caja aislante.....	51
Figura 33. Armado de caja en SolidWorks 2018.	52
Figura 34. Vista Superior del colector solar en SolidWorks 2018.....	53
Figura 35. Vista isométrica del colector solar en SolidWorks 2018.....	53
Figura 36. Diagrama de flujo para determinar el coeficiente de convección h_2	58
Figura 37. Diagrama de flujo para determinar el coeficiente de convección h_2	65
Figura 38. Ensamble del colector solar.	71
Figura 39. Instalación del colector solar.	72
Figura 40. Inclinación del colector solar.....	72

Figura 41. Conexión de tuberías PVC de agua caliente y agua fría.....	73
Figura 42. Calentador instalado en la vivienda sustentable.	73
Figura 43. Sistema DAQ con 3 termocuplas.....	74
Figura 44. Sistema instalado en el lugar de estudio.	74
Figura 45. Tanque auto llenado por flotador.....	75
Figura 46. Gráfico de temperaturas de las termocuplas 10/10/2022.....	76
Figura 47. Gráfico de temperaturas de las termocuplas 11/10/2022.....	76
Figura 48. Gráfico de temperaturas de las termocuplas 12/10/2022.....	76
Figura 49. Gráfico de temperaturas de las termocuplas 13/10/2022.....	77
Figura 50. Gráfico de temperaturas de las termocuplas 14/10/2022.....	77

Índice de anexos:

Anexo 1. Temperatura promedio mensual de la ciudad de Loja – Provincia de Loja.	94
Anexo 2. Demanda de agua unitaria diaria referencia (60°C).	95
Anexo 3. Valores de radiación global promedio en la FEIRNNR.....	96
Anexo 4. Temperatura promedio del agua del mes de enero, ciudad de Loja	97
Anexo 5. Propiedades físicas, térmicas y mecánicas de la manguera de polietileno..	98
Anexo 6. Tipos de manguera de polietileno del mercado.....	99
Anexo 7. Dimensiones y especificaciones de la plancha de acero inoxidable.	100
Anexo 8. Propiedades de la madera de contrachapado (Plywood)	101
Anexo 9. Propiedades del poliestireno expandido (Espumaflex).	102
Anexo 10. Propiedades de la cubierta de vidrio.....	103
Anexo 11. Tablas de Monitoreo para Análisis del Calentador Solar en Espiral.....	104
Anexo 12. Perfiles de la Caja Metálica.....	116
Anexo 13. Datos Adquiridos del Calentador	117
Anexo 14. Datos del flujo másico del calentador solar.....	118
Anexo 15. Piezas del calentador solar en SolidWorks ubicado en el CD-R Nro. 1	
Anexo 16. Certificación de traducción del resumen	118

Índice de simbología y acrónimos

<i>A_{cap}</i>	Área de captación, [m ²]
<i>A_e</i>	Área efectiva del colector solar, [m ²]
<i>ACS</i>	Agua caliente sanitaria
<i>A_l</i>	Área lateral, [m ²]
<i>C_p</i>	Calor específico, [kJ / kg°C]
<i>D_e</i>	Diámetro exterior de la manguera, [m]
<i>D_{ACS}</i>	Demanda de agua caliente sanitaria, [kWh/día]
<i>D_i</i>	Diámetro interior de la manguera, [m]
<i>e_t</i>	Espesor de pared del tanque acumulador, [m]
<i>e_{tubería}</i>	Espesor de pared de la tubería [m]
<i>F</i>	Eficiencia geométrica, [adimensional]
<i>F'</i>	Factor de eficiencia del colector, [adimensional]
<i>F''</i>	Factor de flujo del colector, [adimensional]
<i>F_R</i>	Factor de remoción de calor, [adimensional]
<i>F.S.</i>	Factor de seguridad o de proyección de demanda, [adimensional]
<i>h_{fi}</i>	Coefficiente de transferencia de calor entre tubo y fluido, [W/m ² K]
<i>h₁,h₂</i>	Coefficiente de convección, [W/m ² K]
<i>H_r</i>	Pérdida de carga, [m.c.a]
<i>H_{rp}</i>	Pérdidas primarias, [m.c.a]
<i>H_{rs}</i>	Pérdidas secundarias, [m.c.a]
<i>H_T</i>	Radiación solar promedio, [kWh/m ²]
<i>h_v</i>	Coefficiente de transferencia de calor del viento, [W/m ² °C]
<i>k_b</i>	Conductividad térmica del aislante en el fondo, [W/K]
<i>k_e</i>	Conductividad térmica del aislante lateral, [W/K]
<i>l_b</i>	Espesor del aislante en el fondo, [m]
<i>l_e</i>	Espesor del aislante lateral, [m]

l	Longitud de manguera, [m]
\dot{m}	Caudal másico, [kg/s]
M	Masa de agua a calentar en un día, [kg/día]
N	Número de cubiertas de vidrio
n_p	Número de personas, [personas/día]
N_{UD}	Número de Nusselt, [adimensional]
Pr	Número de Prandtl, [adimensional]
ρ	Presión de red de alimentación, [N/m ²]
r	Radio del tanque acumulador, [m]
Q	Caudal volumétrico, [m ³ /s]
Q_{cs}	Pérdida de calor en el colector solar, [W]
Q_{cx}	Pérdida de calor en las tuberías de agua caliente, [W]
Q_{da}	Pérdida de calor en el depósito de almacenamiento, [W]
Q_u	Energía útil absorbida por el colector, [W]
Re	Número de Reynolds, [adimensional]
R_{total}	Resistencia térmica total, [K/W]
S	Radiación total absorbida por el colector, [W/m ²]
SST	Sistema solar térmico
T_a	Temperatura ambiente, [K]
T_f	Temperatura de consumo del agua, [K]
T_{fi}	Temperatura a la entrada del colector, [°C]
T_{fo}	Temperatura a la salida del colector, [°C]
T_i	Temperatura inicial del agua, [K]
T_m	Temperatura media, [°C]
T_{pm}	Temperatura promedio de la manguera, [K]
T_s	Temperatura en la superficie, [°C]
U_b	Conductancia en la parte inferior del colector, [W/m ² K]
U_e	Conductancia en la parte lateral del colector, [W/m ² K]

U_L	Coefficiente total de transferencia de calor, [W/m ² K]
U_t	Conductancia en la parte superior del colector, [W/m ² K]
v	Velocidad, [m/s]
V_{dep}	Volumen del depósito de almacenamiento, [l]
V_P	Volumen de agua per cápita, [L/persona]
α	Absortividad de la manguera
β	Ángulo de inclinación del colector
ρ_{H_2O}	Densidad del agua, [kg/m ³]
ϵ_c	Emitancia de la cubierta, [[adimensional]
ϵ_p	Emitancia de la manguera, [adimensional]
η	Eficiencia del colector solar, [%]
η_g	Eficiencia global diaria del sistema, [%]
η_s	Coefficiente de seguridad mecánico, [adimensional]
τ	Transmitancia del vidrio, [adimensional]
μ	Viscosidad dinámica a la temperatura T_m , [kg/m*s]
μ_s	Viscosidad dinámica a la temperatura T_s , [kg/m*s]
σ	Coefficiente de radiación de Stefan-Boltzmann, [W/(m ² K ⁴)]
$(\tau\alpha)^e$	Producto transmisividad del vidrio - absorbencia de la placa [adimensional]

1. Título

Implementación, experimentación y evaluación térmica de un calentador solar de agua en espiral, para la vivienda sustentable de la Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables.

2. Resumen

El presente trabajo de titulación es un estudio realizado sobre un tipo experimental de calentador solar con colector en forma de espiral, el cual es de bajo nivel de potencia y tiene como finalidad la obtención de agua caliente sanitaria en la vivienda sustentable tipo oficina de la Facultad de energía, Industrias y Recursos Naturales No Renovables de la Universidad Nacional de Loja, aprovechando la radiación solar que existe en el sector.

El prototipo de colector de espiral plano parte del estudio de un prototipo espiral cónico, realizando cambios para la mejora del funcionamiento de este último. Dependiendo de las condiciones topográficas, climatológicas y económicas, se seleccionó, diseñó, construyó, implementó y evaluó el calentador utilizando la metodología de Sixto Guevara Vásquez en la *“Teoría para el diseño de calentadores solares de agua”*.

El calentador tuvo como resultado una eficiencia del 37% durante los días de prueba, implementando para ello el diseño de una caja para conservar el calor producido durante las horas de sol. El colector está compuesto por un total de 11.5 revoluciones de manguera de polietileno de 3/4", teniendo una longitud total de 26.9 m, la caja tiene un área de (1.2 x1.2) m², altura 10 cm, aislado con lámina de aluminio EPS y placas de aluminio, el tanque está diseñado para una capacidad de 15.2 litros con llenado automático por flotador, y aislado con lana de vidrio.

Palabras Claves: Colector, Experimentación, Radiación Solar, Agua Caliente Sanitaria.

2.1. Abstract

The present titling work is a study carried out on an experimental type of solar heater with a spiral-shaped collector, which is of low power level and whose purpose is to obtain sanitary hot water in the sustainable office-type housing of the Faculty. Energy, Industries and Non-Renewable Natural Resources of the National University of Loja, taking advantage of the solar radiation that exists in the sector.

The flat spiral collector prototype is based on the study of a conical spiral prototype, making changes to improve the operation of the latter. Depending on the topographic, climatic and economic conditions, the heater was selected, designed, built, implemented and evaluated using the methodology of Sixto Guevara Vásquez in the " Teoría para el diseño de calentadores solares de agua".

The heater resulted in an efficiency of 37% during the test days, implementing a box design to conserve the heat produced during sunny hours. The collector is composed of a total of 11.5 revolutions of 3/4" polyethylene hose, having a total length of 26.9 m, the box has an area of (1.2 x 1.2) m², height 10 cm, insulated with EPS aluminum foil and aluminum plates, the tank is designed for a capacity of 15.2 liters with float filling, and insulated with glass wool.

Keywords: Collector, Experimentation, Solar Radiation, Sanitary Hot Water.

3. Introducción

Desde tiempos remotos la forma de calentar agua ha sido un tema importante para la humanidad, la cual ha evolucionado con mayor énfasis en los últimos años, partiendo desde el uso de la leña, avanzando tiempo después con el consumo del keroseno, hasta continuar con el gas licuado, para hoy en día emplear la energía eléctrica como uno de los métodos más usados en los hogares.

Hoy en día, las principales potencias mundiales están enfocadas en el desarrollo de mejorar la calidad y eficiencia de las energías renovables, avanzando significativamente en las últimas décadas, sin embargo, a nivel de país este proceso se ha visto retrasado por la falta de inversión en el desarrollo tecnológico, por tal motivo, existen organizaciones, universidades y fundaciones que destinan sus recursos en la creación de iniciativas que promueven este desarrollo, especialmente en el uso de la energía solar, energía eólica, biomasa, entre otras que son renovables y amigables con el ambiente (Valencia, 2018).

De todas estas energías mencionadas, la energía solar se encuentra en todas partes y de manera gratuita, la cual se la puede aprovechar. Los equipos de calefacción aprovechan esta energía y con eso se evita el consumo de combustibles tradicionales, entre ellos lo más dañinos ambientalmente los combustibles fósiles (Petróleo) (Vargas et al., 2016).

La ciudad de Loja se encuentra ubicada a una altitud de 2060 msnm, durante el transcurso del año, la variación térmica está dada entre 9 °C a 21 °C y rara vez baja a menos de 7 °C o sube a más de 23 °C, generalmente entre los meses de enero a abril y noviembre a diciembre la sensación térmica del clima es caluroso, mientras que entre junio y agosto la sensación térmica del clima es fresco (MAGAP, 2013).

En esta ciudad es de uso frecuente los calentadores de agua de uso domiciliario, por ello se opta por utilizar varias fuentes de energía para realizar el intercambio térmico de calor y así obtener agua caliente, como, por ejemplo: La energía eléctrica, el gas licuado de petróleo, la energía solar, etc.

Entre los sistemas de agua caliente sanitaria (ACS) más comunes están: Las calderas de gas, bombas de calor, calentamiento eléctrico, calentadores solares, entre otros. El uso de cierto sistema depende principalmente de las posibilidades económicas de los usuarios, la frecuencia de uso, acceso de la energía, la venta de equipos, etc.

Por su ubicación en la región del sur del Ecuador, específicamente en Loja se posee un recurso energético de gran potencial, la radiación solar expresada como brillo solar o heliofanía, la cuál puede ser aprovechada para el calentamiento de agua para uso doméstico y así aplicar un sistema que sea amigable con el ambiente y promover el uso de energía renovable (Vaca et al., 2019).

Los calentadores solares para agua caliente sanitaria más comunes en el mercado son de tubos al vacío que puede alcanzar temperaturas entre los 50°C y los 190 °C y de placa plana que puede alcanzar temperaturas entre 30°C y 70°C, además existe un sin número de calentadores caseros implementados en viviendas utilizando materiales reciclados y ecológicos.

Los calentadores solares poco a poco van ganando espacio en el mercado lojano, pero por falta de información de sistemas alternativos para el calentamiento del agua de uso doméstico, no se tiene demasiado conocimiento en el aplicativo y ventajas que conllevan su uso, generalmente, los usuarios prefieren gastar un poco más en las planillas por el consumo de electricidad o gastar en cilindros de GLP (Gas licuado de petróleo), el cual no se sabe hasta cuándo será subsidiado, y por tanto es necesario estar preparados para el momento de que deje de estarlo, trabajando en alternativas para el calentamiento de agua.

Uno de los grandes problemas que se tiene en el calentamiento de agua en Loja es el uso desmedido del gas licuado de petróleo, el mismo que actualmente es subsidiado, de los calentadores solares que existen en nuestro medio son de placa plana y de tubos al vacío, sin existir estudios o experiencias de otras formas de calentamiento solar (E. Peña, 2017).

Objetivos

➤ *Objetivo general*

Proyectar una propuesta de sistema de calefacción solar en espiral para agua sanitaria.

➤ *Objetivos específicos*

- Experimentar el funcionamiento del sistema de calefacción en espiral a diferentes condiciones.
- Implementar el sistema de calefacción en espiral.
- Evaluar térmicamente el sistema de calefacción en espiral en la vivienda sustentable de la FEIRNNR.

4. Marco Teórico

Una de las grandes preocupaciones mundiales es el agotamiento de los hidrocarburos como fuente principal de energía (Riba, 2011); lo cual ha generado preocupación en las naciones encaminándolas en la búsqueda de nuevas opciones de energía alternativas; una de ellas es la radiación solar. En el presente trabajo se trata de explicar los grandes beneficios económicos y energéticos que tiene la utilización de la radiación solar para calentar agua de uso sanitario, un tipo de energía libre y gratuita que puede ser aprovechada fácilmente; así como la construcción de un colector solar y su forma de obtener calor a través de los materiales y dimensiones que se escojan.

El Ecuador es exportador de petróleo y éste se constituye la principal fuente de ingresos, pero adicionalmente posee un gran potencial solar; lo cual se puede aprovechar para contar con otras fuentes de energía renovable y disminuir los problemas de contaminación ambiental. El presente proyecto está enfocado en obtener agua caliente a través de la utilización de radiación solar en un cuerpo negro, por medio de los procesos de transferencia de calor como son: radiación, convección y conducción del calor. El movimiento y circulación de agua puede funcionar de forma autónoma sólo dependiendo de la cantidad de radiación y diferencia de altura que se aplique sobre el colector y tanque. Por otro lado, los calentadores de agua pueden funcionar con un sistema auxiliar que les permita trabajar de forma conjunta o alternada en caso de falta del recurso solar.

4.1. Radiación solar

La radiación solar es la energía emitida por el sol, que se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas. Esa energía es el motor que determina la dinámica de los procesos atmosféricos y el clima. La energía procedente del sol es radiación electromagnética proporcionada por las reacciones del hidrógeno en el núcleo del sol por fusión nuclear y emitida por la superficie solar. En la figura 1 se puede apreciar la radiación solar.



Figura 1. Radiación solar.
(HG Ingeniería y Construcciones S.A.S, 2018).

4.1.1. Irradiación solar

La irradiancia solar es el valor de la radiación incidente en una superficie. En el caso del Sol, se define como la energía solar recibida por cada m^2 en un segundo. Cuando la irradiancia alcanza la cima de la atmósfera y en dirección perpendicular a los rayos del sol, se obtiene un valor medio de 1367 W/m^2 , lo cual se conoce como constante solar, ya que, se mantiene aproximadamente constante a lo largo de decena o cientos de años variando muy poco debido a los factores astronómicos y astrofísicos (Lorente, 2010).

Dentro de la construcción de equipos calentadores de agua es necesario conocer los valores de radiación solar diaria obtenida de estaciones meteorológicas u obtenidas mediante cálculo de geometría solar mediante modelos matemáticos, ya que de estos se puede estimar el potencial de calor que se puede obtener para calentar agua.

4.1.2. Tipos de radiación solar sobre superficies

La energía transmitida por el sol viaja por el espacio en forma de radiación electromagnética, al llegar a la atmósfera parte de la energía es absorbida y el resto se dirige a la corteza terrestre, pero también, parte de la radiación se refleja de la plancha de aluminio de vuelta a la atmósfera como se observa en la figura 2.

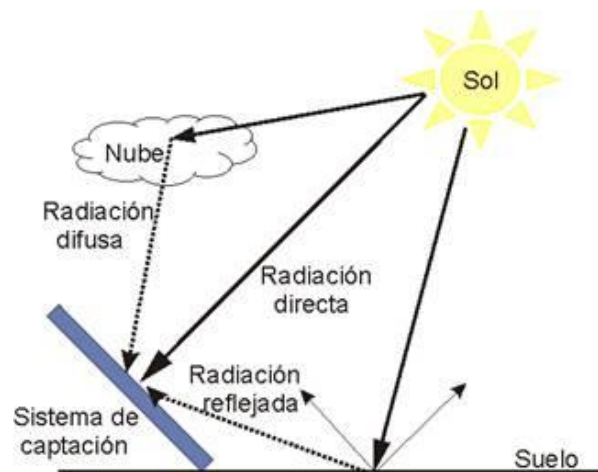


Figura 2. Componentes de la radiación solar terrestre.
(Hernández, 2014).

- **La radiación directa:** Es aquella que proviene directamente del disco solar sin sufrir modificaciones, posee una dirección de incidencia, se puede concentrar y en un día soleado se encuentra en mayor proporción.

- **La radiación difusa:** Es aquella que, al entrar en contacto con polvo, nubes, contaminantes o cualquier elemento con el cual interactúa, cambia su dirección original y en un día nublado se encuentra en mayor proporción.
- **La radiación reflejada:** También conocida como albedo, es aquella que se produce cuando entra en contacto con la superficie terrestre y dependiendo de la zona se reflejará en mayor o menor cantidad.

4.1.3. Formas de transmitir calor



Figura 3. *Formas de transmitir calor.*
(Enciclopedia de Ejemplos, 2019).

El calor se transfiere mediante tres mecanismos: conducción, convección y radiación como se ve en la figura 3.

- **La conducción:** Es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia a las adyacentes menos energéticas, como resultado de la interacción entre partículas.
- **La convección:** Es la transferencia de energía entre una superficie sólida y el fluido adyacente que se encuentra en movimiento, y tiene que ver con los efectos combinados de la conducción y el movimiento del fluido.
- **La radiación:** Es la transferencia de energía debida a la emisión de ondas electromagnéticas (o fotones) (Cengel, 2012).

4.1.4. Radiación solar en la provincia de Loja

Debido a su posición geográfica, Ecuador posee un recurso solar privilegiado, gracias a que el ángulo de incidencia del sol es perpendicular a su superficie durante todo el año, lo que permite un excelente aprovechamiento del sol a diferencia de otros países en los que la geometría solar tiene un papel más importante.

A su vez, Ecuador tiene sus propias condiciones climatológicas en su territorio nacional, mismas que son registradas por 41 estaciones meteorológicas terrestres que pertenecen a DMQ

(Distrito metropolitano de Quito), INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología) e IIGE (Instituto de Investigación Geológico y Energético).

Desde el año 2008 hasta 2019 Ecuador cuenta con Atlas solares que permiten conocer la radiación solar diaria con datos promedio mensuales y anuales, así como también un desglose de la radiación total (directa y difusa) y global independientemente una de otra expresadas en Wh/m².

En 2019 fue actualizado el mapa solar del Ecuador comparando el modelo de irradiación solar del NREL (Laboratorio de Energías Renovables de los Estados Unidos) con las 41 estaciones meteorológicas presentes en Ecuador (Vaca et al., 2019).

4.2. Zona climática de la ciudad de Loja.

La ciudad de Loja se encuentra ubicada a una altitud de 2060 msnm, durante el transcurso del año, la oscilación térmica varía entre 9 °C a 21 °C y rara vez baja a menos de 7 °C o sube a más de 23 °C, generalmente entre los meses de enero a abril y noviembre a diciembre el promedio del clima es caluroso, mientras que entre junio y agosto el promedio del clima es fresco (MAGAP, 2013).

Adicionalmente la temperatura ambiente media mensual del sector la Argelia – Loja, se toma del [Anexo 1], datos proporcionados por el anuario meteorológico del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI, 2015), éstos valores corresponden a temperaturas promedio de cada mes.

4.3. Energía solar térmica

La tecnología solar térmica se empezó a estudiar con énfasis desde hace varios siglos, la “caja caliente” es un invento de 1767 que pretendía analizar el fenómeno que se producía al colocar bajo el sol una caja con fondo negro, paredes recubiertas de lana y una tapa de vidrio, pronto al medir la temperatura interior de la caja se descubrió que se podía llegar a temperaturas de hasta de 120 grados centígrados, imitando el comportamiento del efecto invernadero. Pronto, se empezó con el estudio de diferentes materiales y formas que permitan acumular el calor del sol hasta llegar a nuestra época (Bulnes et al., 2005).

Un sistema que utiliza energía solar térmica debe tener ese principio, para lo cual se debe aprovechar la radiación solar mediante el uso de materiales oscuros, en general de color negro o mate con la finalidad de absorber la mayor cantidad de radiación solar y así adquirir un aumento de temperatura para calentar el fluido.

4.3.1. Aplicaciones solares térmicas

Hay muchas y diferentes aplicaciones solares térmicas, que se caracterizan por diferentes requerimientos de temperatura: calentamiento de agua para albercas (27-30 °C), calentamiento de agua para uso sanitario y climatización de espacios (30-45 °C), calentamiento de aire para secado y climatización de espacios (35-50 °C), cocción de alimentos (90-120 °C), calor para procesos industriales (40-225 °C). Según (Bulnes et al., 2005), la refrigeración y aire acondicionado solar tiene una temperatura aproximada entre 85 a 200 °C, generación termo-solar de potencia eléctrica (250-1000 °C) y producción de combustibles solares (500-2000 °C)

4.3.1.1. Calentamiento directo.

Para aprovechar el calor del sol en espacios cerrados muchas de las edificaciones se han modificado para captar la energía solar y calentar el ambiente, así como también optimizar el uso de calefacción y aire acondicionado, esto sin la necesidad de transformar esta energía.

4.3.1.2. Acumulación de calor.

En zonas donde se necesita almacenar calor sobre un fluido (generalmente para calentar agua para uso doméstico o aire para secado) se requiere de la ayuda de paneles solares que transformen la energía solar o de estructuras especiales como placas o tubos que permitan acumular el calor en el fluido para luego ser almacenado en un depósito, logrando reducir gastos por consumo de GLP o electricidad.

4.4. Instalación solar térmica

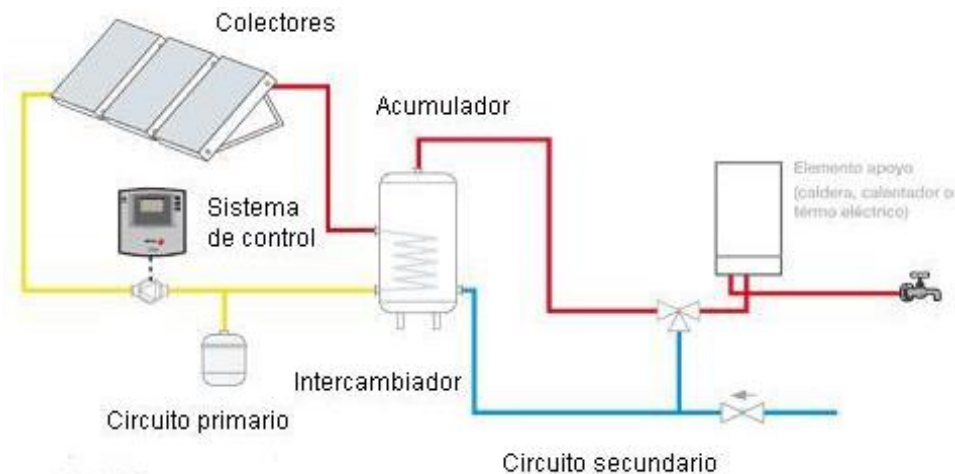


Figura 4. Componentes de una instalación solar térmica. (Nergetia, 2015).

La figura 4 muestra una instalación solar térmica la cual consta esencialmente de los siguientes sistemas:

4.4.1. Sistema de captación

Este sistema es el encargado de captar la radiación solar mediante el uso de captadores conectados entre sí, donde su principio de funcionamiento es el de un cuerpo oscuro que absorbe la radiación directa que llega del sol transformándose en calor que es acumulado para una aplicación específica.

4.4.2. Sistema de acumulación

Cumple la función de almacenar el calor del fluido a calentar en un depósito específico, por ello es necesario que se encuentre debidamente aislado y en un lugar estratégico para poder distribuir el fluido caliente. En ciertos casos el sistema de acumulación suele actuar también como un intercambiador de calor cuando existe recirculación del fluido.

Es importante resaltar que no todo el tiempo hay la suficiente radiación para utilizar la instalación solar en ese momento, por ello el sistema de acumulación permite retener el calor el tiempo que se considere necesario y usarse en el momento que se necesite.

4.4.3. Sistema auxiliar

Constituye un sistema que suministra calor mediante una fuente distinta de la instalación solar térmica, y tiene el objetivo de asistirle en aquellos momentos donde la radiación del momento no es suficiente o cuando la demanda de calor sobrepasa lo usual.

Generalmente la instalación solar térmica está diseñada para suplir como mínimo el 60% de las necesidades energéticas, un porcentaje superior requeriría de un diseño con costos superiores que implica una tasa de retorno mucho mayor, y con el riesgo de que en temporadas de calor excesivo pueda sobre calentar la instalación térmica dañándose en el proceso (Planas, 2011).

4.4.4. Sistema de distribución

Una vez que se obtiene el fluido caliente se lo debe de trasladar al lugar donde será usado para un fin específico, este sistema está comprendido por el conjunto de control, tuberías, conducciones, expansiones, bombas, reductores, purgadores, válvulas, termosifón, etc.

4.4.5. Sistema de control y regulación

Para asegurar el correcto funcionamiento de la instalación se deben conectar circuitos que permitan proporcionar la cantidad adecuada de energía y proteger los equipos frente a un sobrecalentamiento.

- **Circuito primario:** Es el encargado de trasladar el fluido del sistema de captación hasta el sistema de acumulación.
- **Circuito secundario:** Suministra el fluido frío desde la acometida hacia el sistema de acumulación y de este depósito hasta los puntos de consumo (Planas, 2011).

4.5. Algunas aplicaciones de una instalación solar térmica

Debido a que el recurso solar es gratuito e ilimitado sus aplicaciones han permitido mejorar el estilo de vida de población.

4.5.1. Producción de agua caliente sanitaria (A.C.S)

Comercialmente es la aplicación más conocida la cual generalmente es destinada al consumo en viviendas unifamiliares, oficinas, hoteles e incluso hospitales, los sistemas de captación suelen tener niveles bajos de temperatura de entre 40 y 35 °C, lo que es normal para el mercado de calentadores de este tipo (H. Peña, 2018).

4.5.2. Calefacción

Suelen servir para mantener el fluido caliente, pero no lo suficiente para lo que se requiere en épocas de invierno en los países alejados de la línea ecuatorial que está entre 70 u 80 °C, por lo que se acopla a un sistema auxiliar que eleva la temperatura hasta alcanzar lo necesario, lo que permite ahorrar costos a largo plazo (H. Peña, 2018).

4.5.3. Calentamiento de piscinas

Es una de los procesos que requiere poco calentamiento, el agua necesita una temperatura promedio de 30 °C. Para piscinas descubiertas la instalación es bastante simple ya que no necesita un intercambiador de calor o acumulador, sin embargo, para piscinas cubiertas se requiere de un sistema auxiliar que trabaje en conjunto (H. Peña, 2018).

4.6. Calentadores solares de agua

Un calentador solar de agua (CSA) es un sistema que calienta el agua solamente con la energía solar, sin necesidad de gas o electricidad. Un sistema típico de CSA consta básicamente de tres componentes:

- **Colector solar:** capta la energía solar y la transfiere al agua.
- **Termotanque:** almacena el agua caliente.
- **Sistema de tuberías y válvulas:**” transporta” el agua entre colector, termotanque y sistema sanitario mediante el efecto termosifón.

4.6.1. Calentador de tubos de al vacío

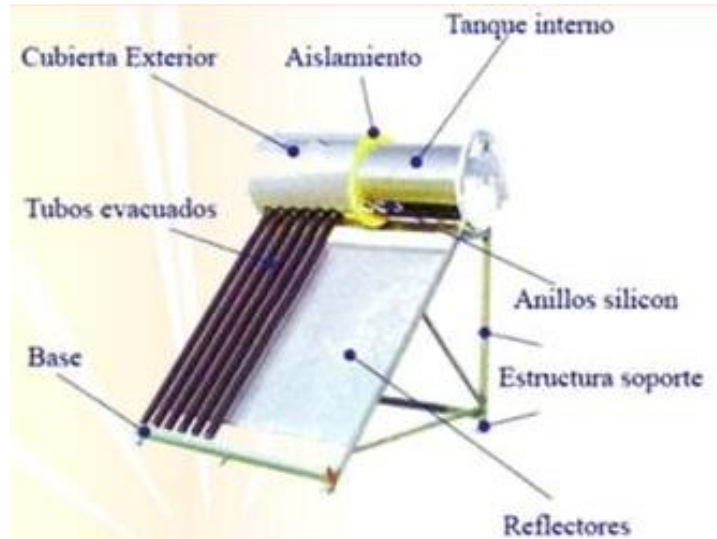


Figura 5. Partes de un calentador solar de tubos al vacío.
(Termasolar, 2011).

Este diseño de calentador reduce en gran medida las pérdidas térmicas de conducción y convección debido al vaciado interno de tubos, lo que permite obtener niveles altos de temperatura.

Está formado por un conjunto de tubos, estos se encuentran conectados a un distribuidor formado por más tubos donde circula el fluido que se le entregará el calor y también por un tubo de vidrio que hace de cubierta exterior, como se observa en la figura 5.

Está compuesto por colectores planos dispuestos herméticamente y vaciados en el interior, posee soportes que evitan que la carcasa y la cubierta caigan hacia dentro del vacío.

4.6.1.1. Colector de vacío de tubos de calor (Heat-Pipe).

En la figura 6 se observa que, en el interior del tubo vaciado existe un tubo cerrado, el cual funciona como herramienta de succión y en cuyo interior hay un fluido caliente a una presión adecuada para que este evapore y condense en un cierto rango de temperaturas.

Al calentarse el tubo se evapora una parte del líquido que se desplaza, en forma de vapor, a la parte superior del tubo donde, en un bloque de transferencia de calor, cede calor a otro fluido de trabajo, se condensa y vuelve a un estado líquido para descender por el tubo hasta que se evapore otra vez (Martínez et al., 2013).

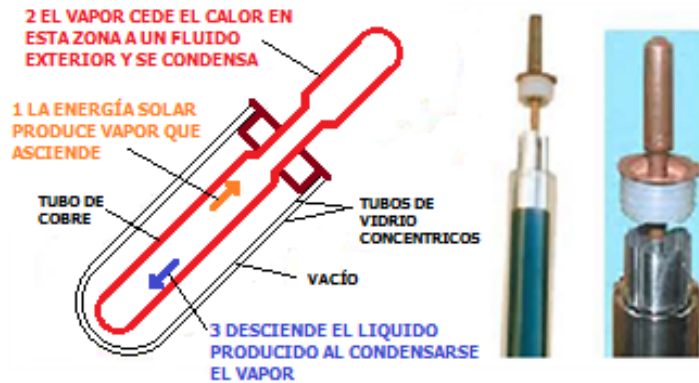


Figura 6. *Tubo de vacío del tipo Heat Pipe.*
(Martínez et al., 2013).

4.6.1.2. Colector de vacío de tubo en “U” (U-Tube).

En la figura 7 se observa que, en el interior del tubo evacuado hay un tubo de paso del fluido caloportador en el cual por uno de los extremos el fluido entra a baja temperatura para luego recorrer el circuito de “U” y salir a mayor temperatura. El absorbedor adosado a los dos tubos es de morfología plana (Martínez et al., 2013).

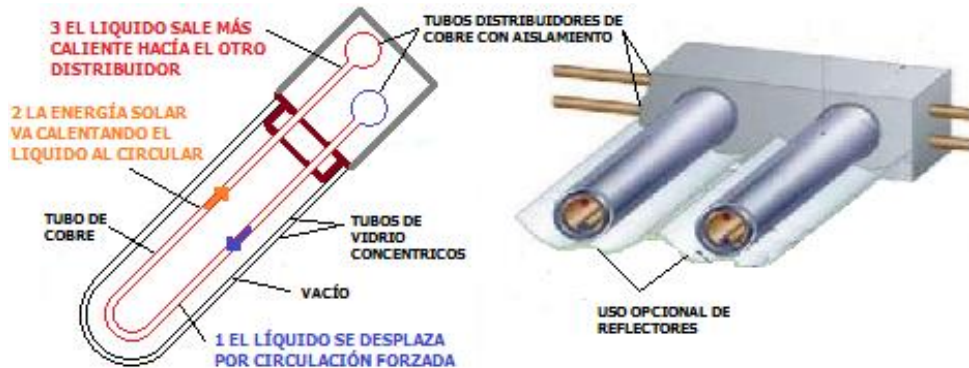


Figura 7. *Tubo de vacío del tipo tubo en “U”.*
(Martínez et al., 2013).

4.6.1.3. Colector de vacío de flujo directo.

En el interior del tubo evacuado existe un absorbedor plano con un tubo en el centro que contiene el fluido de trabajo; este entra por un tubo concéntrico de menor diámetro, circula hasta el final del tubo y vuelve por el tubo exterior calentándose.

Dentro de determinados márgenes, los absorbedores se pueden girar en el interior del tubo para optimizar su inclinación. Esto permite, además, instalar los colectores solares verticales u

horizontales para conseguir una mejor integración arquitectónica y simplificar la estructura soporte (Martínez et al., 2013).

4.6.2. *Calentador de placa plana*

Como se indica en la figura 8, este tipo de colector tiene forma plana y funciona con base en la absorción de la radiación solar. Utiliza la radiación solar difusa y la radiación solar directa, de esta manera el colector solar plano alcanza temperaturas entre 65 - 90 °C con una eficiencia promedio 40 - 60 %, dependiendo en gran parte del tipo de conformado de la placa absorbente.

En nuestro país y en la mayoría de los países de Sudamérica, el clima tiene muchos días parcialmente nublados, lo cual contempla que, en el Ecuador y más específicamente en la ciudad de Loja, durante un día promedio tendría algunas horas nubladas, por lo que un colector de placa plana producirá más energía calórica que uno del tipo concentrador.

Además, existen algunas restricciones para emplear un colector de concentración, como: la vida del material de reflexión, necesidad de seguimiento del concentrador hacia el sol, es relativamente difícil, pero no imposible de construir etc.

Los colectores concentradores son principalmente utilizados para aplicaciones donde se necesita una temperatura elevada o particularmente donde no se puede emplear los colectores planos, como por ejemplo para las aplicaciones industriales y para generar electricidad por efecto foto-térmico (Nandwani, 2005).

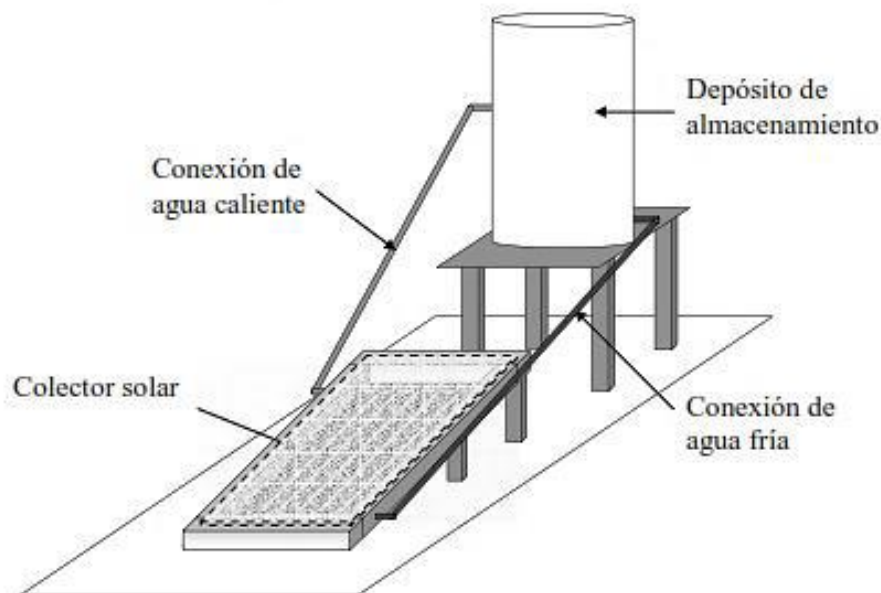


Figura 8. *Partes de un calentador solar de placa plana.*
(Guevara Vásquez, 2003b).

4.6.3. Calentador solar de agua en espiral (CSE)

4.6.3.1. Descripción del calentador en espiral.

Como se observa en la figura 9, el prototipo está basado en el calentador de agua de bobina de manguera, es un calentador de nivel bajo de temperatura, se caracteriza por un enrollado de tubos en forma de espiral, protegido por una cubierta de vidrio transparente para evitar el influjo del viento, es colocado sobre una superficie plana refractante con inclinación a 14° , posee un sistema de recirculación de agua a través de un termotanque.



Figura 9. *Calentador solar en espiral.*
(PILESOL, 2019).

4.6.3.2. Primeras investigaciones.

Fueron desarrolladas por (Dean, 1927) y (Dean, 1928) las primeras investigaciones acerca del movimiento de flujo en una tubería curva con sección transversal circular, a partir de entonces, se efectuaron un gran número de estudios sobre tubos enrollados en espiral

(Bellos et al., 2019) investigaron el rendimiento comparativo entre diferentes diseños de receptores en un concentrador solar, la observación experimental apoyada por simulación estableció que un receptor de cavidad cónica sobresale tanto en eficiencia óptica como térmica.

Diversos estudios han demostrado que las tuberías en espiral en aplicaciones de transferencia de calor tienen un mejor rendimiento (Kong et al., 2018), (Prabhanjan et al., 2002).

La mejora de la transferencia de calor del tubo en espiral se puede atribuir al aumento de la sinergia entre el vector de velocidad y el gradiente de temperatura debido al flujo secundario (Guo & Huai, 2016).

(Zheng et al., 2018) investigaron el tubo de bobina de doble espiral, se encontró que el sistema con tubos de bobina doble en espiral tiene un mejor rendimiento térmico que el tubo de bobina simple.

(Hu et al., 2019) investigaron experimental y numéricamente el intercambiador de calor de doble espiral aplicado en una bomba de calor de fuente de aire para descongelar, se encontraron que este diseño tiene una rápida tasa de liberación y almacenamiento de calor.

4.7. Tipología de viviendas de interés social

4.7.1. Normativa MIDUVI

De acuerdo a la norma ecuatoriana de construcción para energías renovables (NEC-HS-ER) del año 2020 de nombre “Sistemas térmicos para agua caliente sanitaria (ACS) – aplicaciones menores a 100 °C” la demanda de agua unitaria diaria para oficinas es de 2 Litros por persona, ver [Anexo 2] (NEC-HS-ER, 2020).

4.7.2. Selección de tuberías

La selección del material de las tuberías se debe realizar teniendo en cuenta los siguientes aspectos: compatibilidad con el tipo de fluido empleado, su comportamiento dentro del rango de temperaturas y presiones de trabajo, resistencia a la corrosión, facilidad de instalación, durabilidad, entre otros.

Las tuberías que transportan agua caliente destinada al consumo humano deberán ser de cobre, acero inoxidable, polipropileno u otros plásticos de grado alimenticio que soporten la temperatura de diseño. Si su funcionalidad es la de transportar un fluido caloportador sin entrar en contacto con el consumo humano, se puede emplear acero negro.

En los circuitos hidráulicos podrán utilizarse tuberías de cobre, de acero inoxidable o de termoplásticos, con uniones roscadas, termo fusionadas, soldadas o bridadas y protección exterior con pintura anticorrosiva.

En el circuito hidráulico primario de los Sistema Solar Térmico (SST) para producción de agua caliente sanitaria (ACS), podrán utilizarse tuberías de cobre y acero inoxidable; con uniones roscadas, soldadas o bridadas y protección exterior con pintura anticorrosiva.

En el circuito hidráulico secundario o de servicio de agua caliente sanitaria, podrán utilizarse cobre, acero inoxidable o de materiales termoplásticos, empleando uniones roscadas, soldadas, termo-fusionadas o bridadas.

4.7.3. Dimensionamiento de tuberías

El caudal del fluido de trabajo se determinará de acuerdo a las especificaciones técnicas del fabricante del captador. En su defecto según (NEC-HS-ER, 2020) se estimará un valor comprendido entre 43.2 l/h y 72 l/h por cada metro cuadrado de superficie de captación, y en el caso de los de bajo flujo entre 15 y 25 l/h por metro cuadrado de captación.

En las instalaciones en las que los captadores estén conectados en serie, se obtendrá el caudal aplicando el anterior criterio y dividiendo el resultado por el número de captadores conectados en serie. Existen captadores con menor caudal. Dado un caudal nominal, el diámetro de la tubería se seleccionará de manera que se cumplan las condiciones siguientes:

- La velocidad de circulación del fluido en el circuito de consumo será inferior a 2.0 m/s cuando la tubería discurra por locales habitados e inferior a 3.0 m/s cuando el trazado sea al exterior o por locales no habitados.
- La velocidad de circulación del fluido calor portador en el circuito primario será inferior a 2.0 m/s. Siendo el valor mínimo de 0.3 m/s para evitar la entrada de aire. Cuando la circulación del fluido se realice por el interior de locales habitados la velocidad se limitará a 1 m/s.
- En circuitos secundarios la velocidad recomendada es en torno a 2.5 m/s.
- La pérdida de carga unitaria en tuberías nunca será superior a 40 mm de columna de agua por metro lineal de tubería.
- El circuito hidráulico entre el colector y el acumulador debe diseñarse para permitir la recirculación del fluido entre el acumulador y el colector, de tal manera, que no permita el reflujó del agua caliente en horas de baja o inexistente radiación, desde el tanque hacia el colector y debe disponer de aislamiento.
- El suministro de agua caliente proveniente del SST, se debe conectar con la red de agua caliente existente de la edificación. (NEC-HS-ER, 2020)

4.7.4. Sistema termosifón

Al ser un prototipo y constar de una baja demanda energética utiliza un sistema por termosifón, el cual reemplaza el uso de una bomba de agua, utilizando la diferencia de densidad del fluido de transferencia de calor entre el agua caliente y el agua fría, para lograr la circulación entre el colector y el dispositivo acumulador, o el intercambiador de calor como se aprecia en la figura

10. El diseño e instalación en estos sistemas deberá estar supeditado al fácil flujo del fluido caliente, este flujo ascendente de fluido calor portador caliente se deberá a dos factores:

- **Diferencia media de densidades**, es decir, de temperaturas entre el fluido caliente que sale del colector y el frío de la parte baja del acumulador (ΔT).
- **Diferencia de altura (h)** entre el depósito acumulador y el colector.

Esta suma de factores se denomina carga hidráulica del sistema, que nos proporciona la energía existente para el movimiento del fluido, siendo este movimiento más fácil cuanto mayores sean las diferencias entre las temperaturas (ΔT) y menor sea la altura (h).

En instalaciones por termosifón evitaremos tuberías largas y estrechas, recorridos tortuosos, cambios bruscos de sección o excesivos accesorios, ya que provocarán una reducción del caudal, aunque tengamos altos valores de ΔT , reduciéndose el calor recogido.

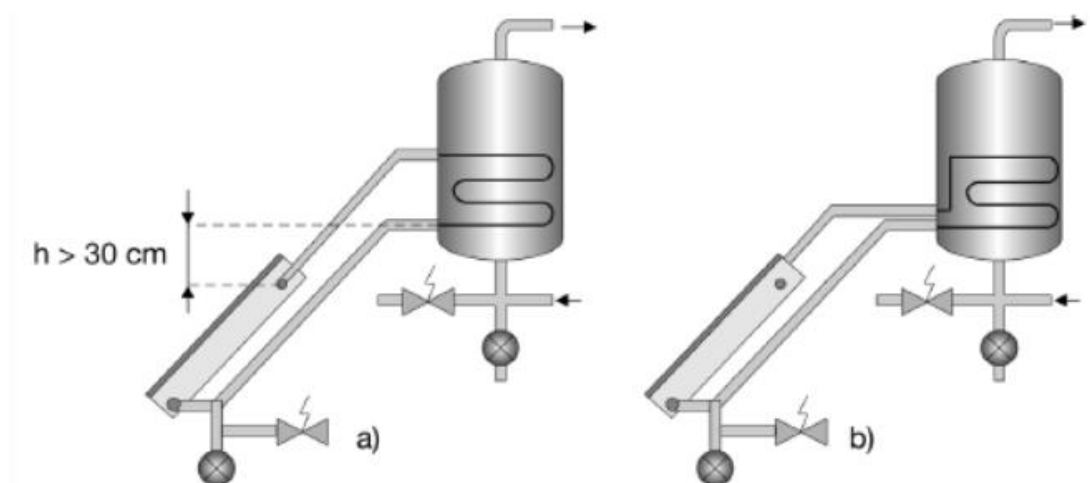


Figura 10. Sistema termosifón.
(Eficiencia Energética, 2019).

Como se observa en la figura 10, usualmente se tiene dos posiciones para el termosifón, en a) para facilitar el efecto termosifón conviene que h sea superior a 30 cm, en b) esta disposición es preferible a la de la figura anterior, pues, al quedar la mayor parte del tramo ascendente de la tubería de ida dentro del propio acumulador y, por tanto, aislado térmicamente del exterior, se minimiza el riesgo de que, debido a un posible enfriamiento de dicho tramo (por ejemplo, por la noche), se produzca una circulación en sentido inverso al deseado.

5. Metodología

5.1. Materiales

Los medios destinados para el desarrollo del presente trabajo de titulación se describen a través de la siguiente lista:

Materiales de oficina

- Material bibliográfico
- Libros de termodinámica, física y calentadores solares.
- Informes de trabajo de titulación.
- Revistas científicas.
- Artículos de investigación.
- Páginas web.

Equipos de medición

- Sensores de temperatura (Termocuplas)
- Arduino Nano (Adquisición y almacenamiento de datos)
- Placa de baquelita, display, reloj digital, amplificadores y lector micro SD.

Software

- SolidWorks 2018.
- Excel 2016

Material constructivo del prototipo

- En la tabla 1, se detallan los materiales usados para la elaboración del prototipo de calentador solar.

Tabla 1. Materiales del prototipo de calentador

Elementos	Descripción
Manguera	<ul style="list-style-type: none">• Polietileno.• Baja densidad.• Diámetro de ¾”.• Espesor de 1.2 mm.• Longitud de 26.9 m.
Caja	<ul style="list-style-type: none">• Plancha de acero inoxidable de 1.22*2.44m y 0.7 mm de espesor.• Madera plywood de 1.1*1.1 m y 9 mm de espesor.• 4 pedazos de espuma flex de 10*8.5 cm y 5 cm de espesor.• Vidrio translucido de 6 mm de espesor.• 2 rollos de papel aluminio.• 2 libras de clavos sin punta.• 1 lb de alambre galvanizado
Termotanque	<ul style="list-style-type: none">• Tanque de polietileno de 30 litros, plástico, hermético y boca ancha.• 2 rollos de lana de vidrio de 5 cm de espesor.• 1 rollo de papel film.• Flotador para tanque.• 3 salidas para tanque de ½”.• Entrada flotador - tanque de ½”.• 1 cinta gris de ducto.• Válvula de alivio de 6 mm
Conexiones	<ul style="list-style-type: none">• 0.6 m tubería PVC de ½” para agua caliente.• 0.7 m tubería PVC de ½” para agua fría.• 2 codos roscables de 45° de ½”.• 3 codos roscables de 90° de ½”.• 0.6 m de rubatex de ½”.• 2 uniones universales roscables de ½”.• 3 neoplos de ½”.• Unión recta de ½”.• Teflón de ½”• Llave de chorro plástica de ½”

5.2. Métodos

Para el correcto funcionamiento del siguiente proyecto se indicará los pasos a desarrollar, para cumplir con el objetivo detallado en la figura 11.

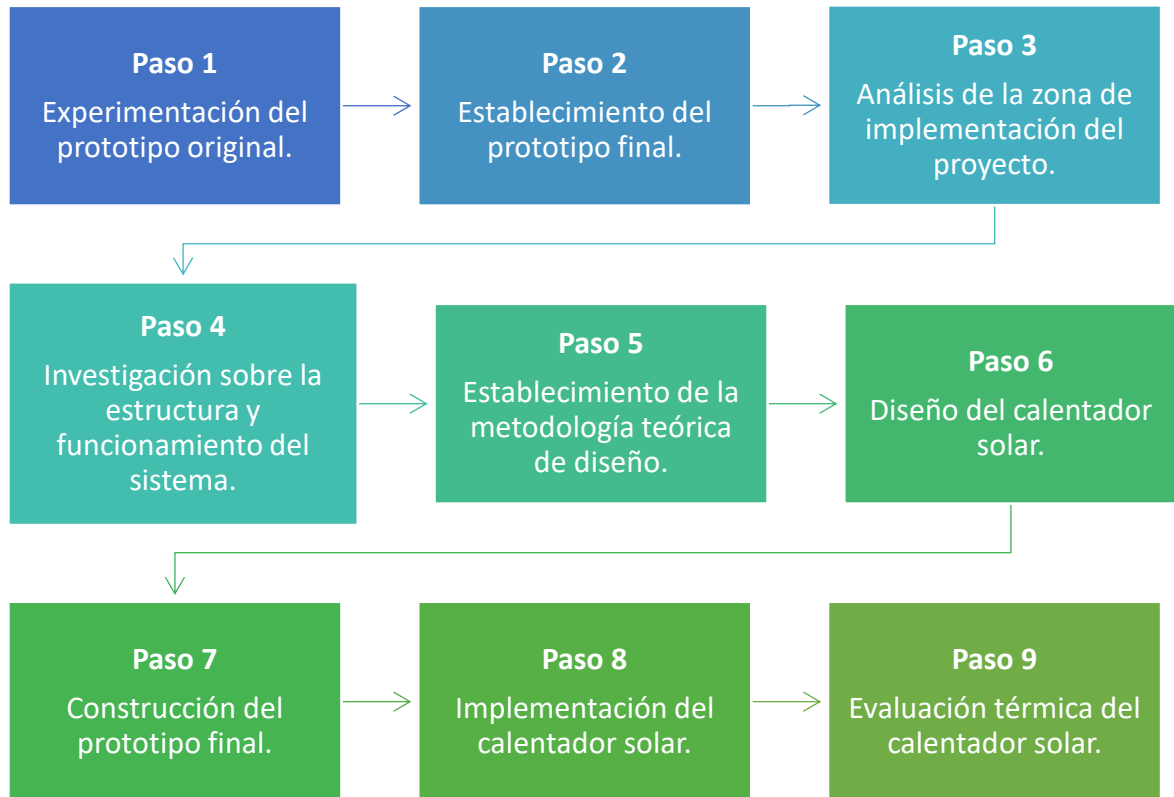


Figura 11. Metodología propuesta para el desarrollo del proyecto.

5.2.1. Experimentación del prototipo original

5.2.1.1. Descripción general del prototipo original del proyecto.

Primero se realiza una breve presentación y descripción del prototipo original que permita entender el estado inicial y las diferentes piezas que lo componen todo el calentador.

5.2.1.2. Adquisición y análisis de datos del prototipo original.

Previo a la experimentación del proyecto se debe obtener y analizar los valores de temperaturas mediante un dispositivo de adquisición de datos, que permitan comprender el estado del prototipo original del calentador solar.

5.2.1.3. Formulación de hipótesis para correcciones del prototipo original.

Tras haber analizado los datos de temperatura, se deben plantear hipótesis que permitan comprender los posibles errores que impidan el correcto funcionamiento del calentador solar.

5.2.1.4. Experimentación del funcionamiento del sistema de calefacción en espiral.

Una vez que se hayan formulado las suficientes teorías, se procede a realizar los cambios que permitan corregir los posibles errores de funcionamiento, experimentando con cada hipótesis planteada con el fin de mejorar el prototipo.

5.2.1.5. Establecimiento del prototipo final.

Finalmente realizados los cambios respectivos se obtendrá un producto final cuyo funcionamiento cumpla con los requerimientos de calentamiento de agua caliente sanitaria y que deberá ser implementado y evaluado en la vivienda sustentable de la FEIRNNR.

5.2.2. *Análisis de la zona donde se implementará el proyecto.*

Para iniciar en el diseño y cálculos del calentador solar es necesario conocer las condiciones geográficas y climáticas que existen en la vivienda sustentable.

5.2.2.1. Exploración de la geografía local.

Los calentadores son sistemas que se acoplan fácilmente a cualquier tipo de vivienda cuyo espacio físico no presente demasiada sombra, por lo que el emplazamiento del calentador deberá estar en la medida de lo posible en un lugar alto con respecto a la vivienda, de esta forma se aprovecha mejor la radiación incidente sobre el colector.

La ubicación del presente proyecto se encuentra en las coordenadas Lat./Lon. -4.0324/-79.1997 junto a la vivienda sustentable a la Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables de la Universidad Nacional de Loja, cuyo terreno está destinado al desarrollo de tecnologías mediante el uso de recursos renovables, en este caso, la energía solar.

5.2.2.2. Caracterización de la energía solar en el lugar de emplazamiento.

Para este cometido se utilizaron los datos de radiación solar provenientes del estudio realizado por (INAMHI, 2015) cuyos datos fueron recopilados de los años 2013, 2014 y 2015 de la estación meteorológica de la Facultad de la Energía.

La estación utiliza un piranómetro como instrumento de medición, cuya instalación y calibrado fue realizado por un técnico de la empresa Sistemas Tecnológicos, la cual está calificada por el (INAMHI, 2015) para la instalación y montaje de estaciones meteorológicas.

En el [Anexo 3] se encuentran los valores promedio de la radiación solar diaria y mensual de los años 2013, 2014 y 2015.

5.2.2.3. Análisis del clima en la FEINNR.

Para realizar los cálculos necesarios en el balance de energía se requiere conocer el valor de la temperatura del agua en la red, así como la velocidad del viento que incide sobre la vivienda sustentable. Por ello se utilizaron los datos obtenidos por (E. Peña, 2017), cuya información fue recopilada por el mismo autor y se encuentra en el [Anexo 1] y [Anexo 4].

5.2.2.4. Consumo de agua caliente sanitaria.

El valor de la temperatura de confort y los valores de demanda de agua de referencia a (60°C) fueron obtenidos de (NEC-HS-ER, 2020) “Norma Ecuatoriana de la Construcción” específica para Energías Renovables (NEC-HS-ER) y se encuentra en el [Anexo 2].

5.2.3. Investigar sobre la estructura y funcionamiento del sistema.

5.2.3.1. Realizar una investigación sobre avances referentes a calentadores solares.

La energía solar es un tipo de energía renovable, limpia y gratuita, cuyo uso varía de acuerdo a la aplicación, en este caso para la obtención de agua caliente sanitaria (ACS) mediante el uso de un colector solar prototipo, para ello se realizó una búsqueda de tipos de calentadores solares, con el fin de tener una guía de diseño y cálculo de los componentes que conforman el calentador solar.

5.2.3.2. Establecimiento de la metodología teórica de diseño.

Para empezar, se consideró los datos climatológicos en función de la ubicación de la vivienda sustentable para su estudio, por ello se ocupó la metodología de (Guevara Vásquez, 2003b) “Teoría para el diseño de calentadores solares de agua” como referencia para el estudio del calentador prototipo.

5.2.3.3. Consultar sobre los componentes necesarios para el calentador solar.

Los componentes necesarios de referencia para el prototipo de calentador solar fueron sacados de (NEC-HS-ER, 2020), donde establecen parámetros de diseño del colector, el termotanque y las conexiones tanto de la acometida como de la vivienda.

5.2.4. Diseño del calentador solar

5.2.4.1. Demanda energética.

Es la energía necesaria para elevar la temperatura de un volumen determinado de agua, desde una temperatura inicial (T_i) hasta una temperatura final de consumo (T_f).

$$D_{ACS} = M * C_P (T_f - T_i) \quad \text{[Ecuación 1]}$$

Donde:

- D_{ACS} : Demanda energética (kW-h/día)
- M : Masa de agua a calentar en un día (kg/día)
- C_p : Calor específico del agua (1.163×10^{-3} kWh/kg °C)
- T_i : Temperatura inicial del agua (Temperatura en red en °C)
- T_f : Temperatura de consumo del agua (°C)

Para calcular la masa de agua M, se utiliza la siguiente ecuación:

$$M = n_p * \rho_{H2O} * V_p \quad \text{[Ecuación 2]}$$

Donde:

- n_p : Número de personas (personas/día)
- ρ_{H2O} : Densidad del agua (999.1 kg/m^3)
- V_p : Volumen de agua per cápita (l/persona)

5.2.4.2. Área de captación.

Es el área que se requiere para captar la energía suficiente para abastecer la demanda energética, depende de la radiación global que reciba y de la instalación solar térmica.

$$A_{cap} = \frac{D_{ACS}}{H_T * \eta_g} * F_s \quad \text{[Ecuación 3]}$$

Donde:

- A_{cap} : Área de captación (m^2)
- H_T : Radiación solar promedio (kW-h/m^2)
- η_g : Eficiencia global teórica del sistema (%)
- F_s : Factor de seguridad o proyección de demanda (1-1.5)

5.2.5. Balance de energía del calentador solar

Para calcular la eficiencia, se empleó la teoría dada por (Guevara Vásquez, 2003b) en donde se explica la necesidad de aplicar un balance de energía en el colector y el termo tanque.

El principio de conservación de la energía se expresa como: el cambio neto (aumento o disminución) de la energía total del sistema durante un proceso es igual a la diferencia entre la energía total que entra y la energía total que sale del sistema durante el proceso. Es decir, la energía total que entra al sistema, menos la energía total que sale del sistema, se considera como el cambio de la energía total del sistema (Cengel, 2012).

El calor útil es una fracción de la radiación global que llega al sistema de captación y es la que realmente sirve para calentar el agua del depósito de almacenamiento. El balance de energía nos permitirá determinar la cantidad de calor útil transmitido al agua y por tanto, la eficiencia del calentador solar.

Para la determinación del calor de calentamiento del agua en el colector solar, es necesario determinar las pérdidas de calor en el colector mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{CS} = U_L * A_e * (T_{pm} - T_a) \quad \text{[Ecuación 4]}$$

Donde:

U_L : Coeficiente global de transferencia de calor ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)

A_e : Área efectiva del colector solar (m^2)

T_{pm} : Temperatura promedio de la manguera (K)

T_a : Temperatura ambiente (K)

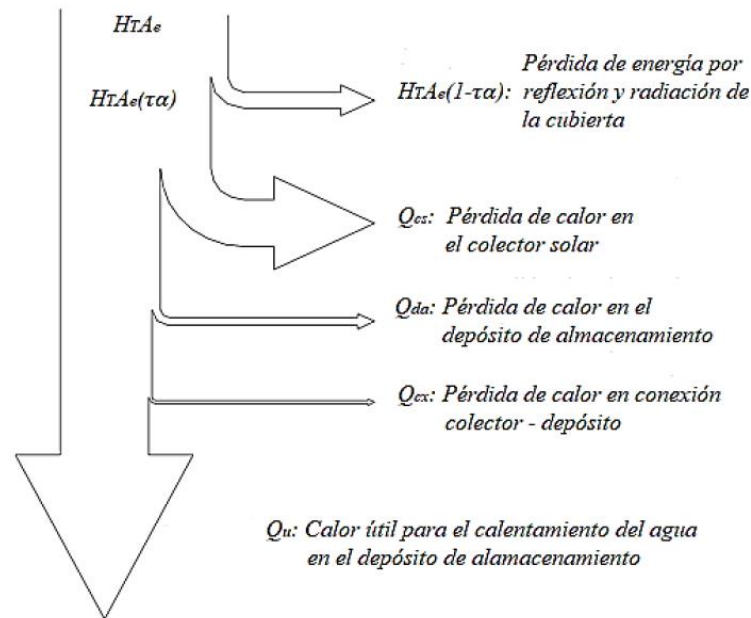


Figura 12. Flujo de calor del colector solar.

(Guevara Vásquez, 2003b).

A medida que la radiación atraviesa los elementos constructivos del calentador se generan pérdidas de calor, el coeficiente total de transferencia de calor UL , se determina a partir de la temperatura promedio de la manguera, que, a su vez, requiere la determinación de la temperatura del agua a lo largo de toda la manguera y del factor de remoción de calor, ver figura 12.

5.2.5.1. Coeficiente total de transferencia de calor (U_L).

Es la suma de todas las conductancias superior, inferior y lateral en el colector solar. El cálculo de este coeficiente se realiza por medio de un proceso iterativo, basado en la teoría de la transferencia de calor por conducción, convección y radiación. El coeficiente total de pérdidas está dado por la sumatoria de tres conductancias:

$$U_L = U_t + U_B + U_e \quad \text{[Ecuación 5]}$$

Donde:

U_t : Conductancia en la parte superior del colector (cubierta) ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)

U_B : Conductancia en la parte inferior (fondo) ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)

U_e : Conductancia en la parte lateral ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)

Para un mejor entendimiento de las resistencias y temperaturas en el proceso de transferencia de calor desde la radiación solar hasta el calentamiento de las mangueras, se utiliza un diagrama térmico como se aprecia en la figura 13.

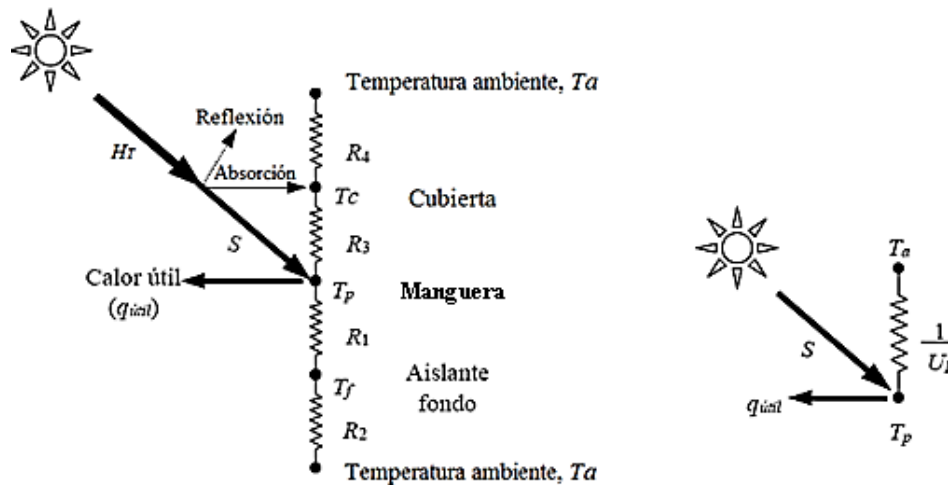


Figura 13. Diagrama térmico de un colector solar plano.
(Guevara Vásquez, 2003).

5.2.5.1.1. Conductancia en la parte superior (U_t).

Para el cálculo de conductancia de la parte superior que comprende R_3 y R_4 (mangueras y la cubierta de vidrio) se requiere de un cálculo iterativo, así como de la temperatura de la cubierta y coeficiente de convección de calor que son difíciles de evaluar, por lo que el cálculo de resistencias térmica se vuelve complicado.

Por ello, se utiliza la ecuación empírica desarrollada por (Klein, 1979), siguiendo el procedimiento básico de Hottel y Woertz (1942), utilizada para el cálculo de la conductancia por

la parte superior del colector simplifica el procedimiento indicado anteriormente. Esta ecuación se utiliza para temperaturas de la placa de absorción entre 25 y 225 °C, con un margen de error aproximado de $\pm 0,3 \text{ W/m}^2$ (J.A Duffie & Beckman, 2013).

$$U_t = \left[\frac{N}{\frac{C}{T_{pm}} \left(\frac{T_{pm} - T_a}{N + f} \right)^e + \frac{1}{h_v}} \right]^{-1} + \frac{(T_{pm} + T_a)(T_{pm}^2 + T_a^2)}{(\varepsilon_p + 0,00591Nh_v)^{-1} + \frac{2N + f - 1 + 0,133\varepsilon_p}{\varepsilon_c} - N} \quad [\text{Ecuación 6}]$$

Donde:

- N Número de cubiertas de vidrio.
- ε_p Emitancia de la placa, para superficies no selectivas $\varepsilon_p=0.95$.
- ε_c Emitancia de la cubierta (vidrio = 0.88).
- v Velocidad del viento, m/s.
- B Ángulo de inclinación del colector.
- σ $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4)$, Coeficiente de Stefan-Boltzmann (Cengel, 2012).
- Hv $5.7+3.8v$ Coeficiente de transferencia de calor del viento ($\text{W/m}^2\text{K}$).
- F $f=(1+0.089h_v-0.1166h_v \times \varepsilon_p)(1+0.07866N)$.
- C $C=520(1-0.000051\beta_2)$, para $0^\circ < \beta < 70$.
- E $e=0.430(1-100/T_{pm})$.

(J.A Duffie & Beckman, 2013) recomiendan utilizar para colectores solares de placa plana una temperatura media de la placa de 90 °C, y cuando el fluido de trabajo es el agua, utilizar un flujo másico de 0.02 kg/s, sin embargo, para el presente trabajo el valor de la temperatura media es de la manguera de polietileno se obtuvo de los datos recopilados durante el mes de estudio que se encuentran en el [Anexo 13] es de 60°C, mientras que el flujo másico 0.005 Kg/s se lo obtenido de mediciones realizadas luego del diseño final y se encuentran en el [Anexo 14].

5.2.5.1.2. Conductancia en la parte inferior (U_b).

La conductancia se evalúa conociendo la resistencia térmica conductiva R_1 y la resistencia térmica convectiva R_2 , de tal manera que:

$$U_b = \frac{1}{(R_1 + R_2)} \quad [\text{Ecuación 7}]$$

Donde:

- U_b : Conductancia en la parte inferior ($\text{W/m}^2\text{*K}$)

R_1 : Resistencia térmica del aislante (plywood) ($m^2 \cdot K/W$)

R_2 : Resistencia térmica entre el aire y la manguera ($m^2 \cdot K/W$)

R_2 se desprecia debido a que en colectores bien aislado se desprecia, si $R_2 \ll R_1$ entonces R_2 se desprecia; por lo que la conductancia en la parte inferior sería:

$$U_b = \frac{k_b}{l_b} \quad \text{[Ecuación 8]}$$

Donde:

k_b : Conductividad térmica del aislante en el fondo (W/mK)

l_b : Espesor del aislante en el fondo, (m)

5.2.5.1.3. Conductancia en la parte lateral (U_e).

Las pérdidas de calor a través de los lados del colector se evalúan de manera similar, aplicando la siguiente ecuación:

$$U_e = \frac{k_e A_l}{l_e A_e} \quad \text{[Ecuación 9]}$$

Donde:

k_e : Conductividad del aislante lateral, ($W/m \cdot K$)

A_l : Área lateral, (m^2)

l_e : Espesor del aislante lateral, (m)

A_e : Área efectiva del colector, (m^2)

5.2.5.2. Factor de eficiencia del colector (F')

Este factor permite evaluar la eficiencia de la transferencia de calor desde toda la superficie hacia el fluido, y depende únicamente de la configuración geométrica y del valor del coeficiente de pérdidas. Debido a que se desprecia el uso de una placa y la separación entre tubos, no tiene mayor relevancia sobre el cálculo, por lo que $F' = 1$.

5.2.5.3. Factor de remoción de calor (F_R).

Este factor relaciona el calor de calentamiento que se obtiene efectivamente en el colector, con el que se obtendría si toda la superficie del colector se encontrara a la temperatura del fluido a la entrada. Se expresa en función del factor de eficiencia del colector F' como se indica a continuación.

$$F_R = \frac{\dot{m} C_p}{U_L} \left[1 - e^{-\left(\frac{U_L}{\dot{m} C_p}\right)} \right] \quad \text{[Ecuación 10]}$$

Donde:

\dot{m} : Flujo másico en el interior de la manguera (kg/s)

F' : Factor de eficiencia del colector

F_R : Factor de remoción de calor

5.2.5.4. Cálculo del calor útil (Q_U).

$$Q_U = F_R [S * A_e - U_L (T_{fi} - T_a)] \quad \text{[Ecuación 11]}$$

Donde:

S : Radiación total absorbida por el colector, (W/m^2)

T_{fi} : Temperatura del fluido a la entrada del colector, ($^{\circ}C$)

La radiación solar que absorbe el colector depende de la radiación solar que llega sobre la superficie del colector y la absorbancia (Emisividad) del material del que está hecho, así como de la transmisividad (Emisividad) del vidrio y depende del grado de translucidez del mismo. El valor de S se puede encontrar mediante la ecuación:

$$S = \frac{H_T(\tau\alpha)}{12} \quad \text{[Ecuación 12]}$$

Donde:

H_T : Radiación total solar incidente en la superficie del colector (W/m^2)

τ : Emisividad de la manguera

α : Emisividad del vidrio

El valor se divide para doce debido a que los datos de la estación meteorológica son cada cinco minutos, convirtiéndose en W/m^2 .

5.2.6. Volumen y aislamiento del depósito de almacenamiento

Para el diseño del depósito de un termotanque se requiere un 15 a 20 % más de masa de agua a almacenar en un día, con la finalidad de compensar las pérdidas por el propio consumo de agua y en la longitud de desarrollo de la conducción según la (NEC - 11, 2011).

$$V_{dep} = \frac{1.15 * M}{\rho_{H2O}} \quad \text{[Ecuación 13]}$$

Tabla 2. 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 de vidrio	25	50	0.038
Paja	50	100	0.09

(Guevara Vásquez, 2003b).

Para la selección del aislamiento del termotanque se necesita saber el tipo de sistema con el que trabaja el calentador, tal como se ve en la *tabla 2*.

5.2.7. Pérdida de calor en el depósito de almacenamiento

El depósito de almacenamiento pierde calor en dos direcciones, radial y la axial como se ve en la figura 14, el calor total será igual a la sumatoria de éstas dos componentes, para determinar estos valores es preciso analizar cada pared del cilindro o tanque por separado, considerando las condiciones del entorno, así como la del fluido almacenado y los materiales del tanque.

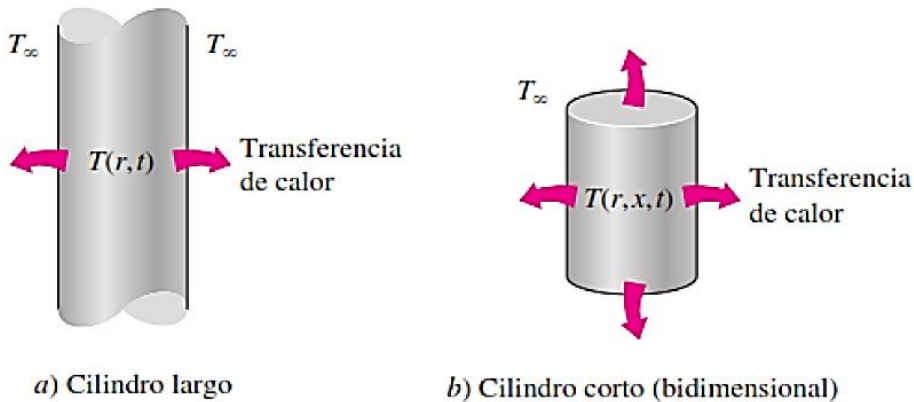


Figura 14. Transferencia de calor para un cilindro corto y largo. (Cengel & Ghajar, 2011).

$$Q_{da} = \frac{(T_{fi} - T_a)}{R_{total}} \quad \text{[Ecuación 14]}$$

Donde:

Q_{da} : Pérdidas de calor en el termotanque (W)

R_{total} : Resistencia térmica total en el termotanque (m^2K/W)

La resistencia térmica en el termotanque es la suma de las resistencias dadas por el tanque y el aislante térmico con la temperatura interna y externa del termotanque como se aprecia en la figura 15.

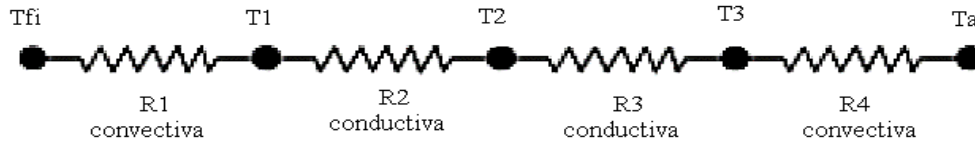


Figura 15. Diagrama térmico de un termotanque sencillo.

$$R_{total} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad \text{[Ecuación 15]}$$

$$R_{total} = \frac{1}{h_1 A_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L k_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi L k_2} + \frac{1}{h_2 A_2} \quad \text{[Ecuación 16]}$$

Donde:

h_1 : Coeficiente de convección interno. (W/m^2K)

h_2 : Coeficiente de convección externo. (W/m^2K)

A_1 : Área interna del cilindro del termotanque. (m^2)

A_2 : Área externa del cilindro del termotanque. (m^2)

r_1 : Radio interno del termotanque. (m)

r_2 : Radio externo del tanque. (m)

r_3 : Radio externo del termotanque. (m)

L : Altura del tanque. (m)

k_1 : Conductividad térmica del tanque. (W/mK)

k_2 : Conductividad térmica del aislante. (W/mK)

5.2.8. Pérdida de calor en las tuberías de agua caliente

Una tubería térmicamente aislada con un fluido que circule por ella tendrá una dirección radial, por tanto, su dirección es unidimensional y se determina de la misma manera que en el termotanque (Cengel & Ghajar, 2011).

5.2.9. Eficiencia del colector solar

Es el porcentaje de calor obtenido de la radiación solar por el colector solar.

$$Q_{da} = \frac{Q_u}{H_T A_e} \quad \text{[Ecuación 17]}$$

Donde:

H_T : Radiación solar incidente sobre la superficie de colector, (W/m²)

5.3. Cálculo de pérdidas por fricción y accesorios

Aparte de las pérdidas de energía, también se evalúan las pérdidas por el recorrido del agua a través de todo el calentador, por ello, se debe realizar el cálculo tanto por la fricción de recorrido en todos los tramos y también las pérdidas de carga debido a los accesorios. Para el cálculo de las pérdidas por fricción se requieren de las siguientes ecuaciones:

$$Re = \frac{v * D_i}{\nu} \quad \text{[Ecuación 18]}$$

Donde:

Re : Número de Reynolds (Adimensional)

v : Velocidad del fluido en el interior de la sección (m/s)

D_i : Diámetro interno de la sección (m)

ν : Viscosidad dinámica del fluido (m²/s)

El factor de fricción se calcula con la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{0.316}{Re^{\frac{1}{4}}} \quad \text{[Ecuación 19]}$$

Donde:

λ : Factor de fricción (Adimensional)

Finalmente, para las pérdidas por tramo se ocupa la siguiente ecuación:

$$H = \lambda * \frac{L_T * v^2}{D_i * 2 * g} \quad \text{[Ecuación 18]}$$

Donde:

L_T : Longitud del tramo (m)

g : Aceleración de la gravedad (m/s²)

En cambio, para las pérdidas por accesorios se requiere de la siguiente ecuación:

$$H_{rs} = K * \frac{v^2}{2 * g} \quad \text{[Ecuación 18]}$$

Donde:

K : Pérdida de carga por accesorio (Adimensional)

El valor de K es la suma de todas las pérdidas dadas por la cantidad de accesorios en el tramo seleccionado y cuyo valor se obtiene de siguiente ecuación:

$$K = f_T * \left(\frac{L_e}{D}\right) \quad \text{[Ecuación 18]}$$

Donde:

f_T : Factor de fricción de la tubería (adimensional)

$\left(\frac{L_e}{D}\right)$: Longitud equivalente de diámetros de tubería (adimensional)

El valor de (L_e/D) depende del tipo de accesorio utilizado en el tramo y se obtiene de la tabla 3 expuesta a continuación:

Tabla 3. Longitud equivalente para cada accesorio.

Tipo	Le/D
Válvula de globo - abierta por completo	340
Válvula de ángulo - abierta por completo	150
Válvula de compuerta - abierta por completo	8
- 3/4 abierta	35
- 1/2 abierta	160
- 1/4 abierta	900
Válvula de verificación - tipo giratorio	100
Válvula de verificación - tipo bola	150
Válvula de mariposa - abierta por completo, 2 a 8 pulg.	45
- 10 a 14 pulg.	35
- 16 a 24 pulg.	25
Válvula de pie - tipo disco de vástago	420
Válvula de pie - tipo disco de bisagra	75
Codo estándar a 90°	30
Codo a 90° de radio largo	20
Codo roscador a 90°	50
Codo estándar a 45°	16
Codo roscado a 45°	26
Vuelta cerrada en retorno	50
Te estándar - con flujo directo	20
- con flujo en el ramal	60

(Mott, Robert I., 2015).

El valor de (f_T) depende del diámetro de tubería utilizado en el tramo y se obtiene de la tabla 4 expuesta a continuación:

Tabla 4. *Factor de fricción según el diámetro de tubería.*

Tamaño nominal de la tubería (pulg.)	Factor de fricción fT
1/2	0.027
3/4	0.025
1	0.023
1 1/4	0.022
1 1/2	0.021
2	0.019
2 1/2, 3	0.018
3 1/2, 4	0.017
5	0.016
6	0.015
8-10	0.014
12-16	0.013
18-24	0.012

(Mott, Robert l., 2015)

5.4. Construcción del prototipo final

Una vez obtenido los parámetros de diseño, se procede con la construcción del prototipo final, el cual pretende cumplir con la función de calentador de agua sanitaria y evitar cometer los errores del prototipo original.

5.5. Implementación del calentador solar

Una vez construido el calentador solar debe ser colocado en el lugar del estudio, previamente deben estar adecuadas las condiciones de altura con respecto a la vivienda sustentable, así como las conexiones desde la acometida de agua, hasta el calentador solar a instalar.

5.6. Evaluar térmicamente el sistema de calefacción en espiral en la vivienda sustentable de la FEIRNNR

Con la finalidad de obtener la eficiencia del calentador se deben adquirir datos de temperatura de entrada y de salida del colector solar y contrastar con los valores de radiación global durante el tiempo de estudio.

Los valores de temperatura se obtienen del sistema de adquisición de datos (DAQ) mediante una tarjeta Arduino Nano y 3 termocuplas tipo K, mientras que los valores de radiación se obtienen de la estación meteorológica de la Facultad de Energía, añadiendo que el piranómetro se encuentra vigente hasta la fecha de este proyecto.

Para obtener el rendimiento primero se debe obtener la energía acumulada en el tiempo de estudio y se calcula en base a la siguiente ecuación:

$$E_S = [V_p * C_p(Temp_{i+1} - Temp_i)] / (\rho_{H2O}) \quad \text{[Ecuación 18]}$$

Donde:

E_S : Energía acumulada en el punto de tiempo de estudio (J)

V_p : Volumen de agua de prueba en el tanque (m³)

C_p : Capacidad calorífica del agua (1.163x10⁻³ kWh/kg °C)

$Temp_i$: Temperatura a la entrada del colector (°C)

$Temp_{i+1}$: Temperatura a la salida del colector (°C)

ρ_{H2O} : Densidad del agua (999.1 kg/m³)

Cabe aclarar que el piranómetro toma datos de radiación cada 5 minutos, por lo que al resultado se le debe dividir para 600 segundos.

Luego, procedemos a calcular la variación de energía proporcionada por la radiación global sobre el colector y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$E_i = \left[\frac{(Rad_{i+1} + Rad_i)}{2} \right] / (A_e) \quad \text{[Ecuación 19]}$$

Donde:

E_i : Energía solar en el intervalo del tiempo de estudio (J)

Rad_i : Radiación solar inicial sobre metro cuadrado de superficie (W/m²)

Rad_{i+1} : Radiación solar final sobre metro cuadrado de superficie (W/m²)

A_e : Área efectiva del colector solar (m²)

Finalmente obtenemos el rendimiento real con la ecuación:

$$n_r = \frac{E_S}{E_i} \quad \text{[Ecuación 20]}$$

Donde:

n_r : Rendimiento real del colector solar (%)

6. Resultados

6.1. Objetivo 1

6.1.1. Descripción general del prototipo original del proyecto

El prototipo propuesto se basa en el trabajo realizado sobre un calentador solar cónico de doble espiral, el cual fue entregado al autor de este trabajo, como se observa en la figura 16, con la finalidad de evaluar su comportamiento y realizar cambios que mejoren la eficiencia del mismo.



Figura 16. Fotografía del prototipo original.

El calentador presenta su respectivo diseño y cálculo de eficiencia en el informe realizado por el grupo de compañeros de Lucas Falco en el Proyecto de Investigación Formativa de Energías Renovables del año 2021, sugerida y dirigida por el Ing. Thuesman Montaña, en el cual se describe que el calentador llegaba a temperaturas de hasta 40 °C y eficiencias de hasta 31% en el termotanque, sin embargo, la forma de adquirir los datos de temperatura no fue realizada correctamente, ya que, en este estudio se utilizó una pistola de infrarrojos que apuntaba a unas

piedras colocadas en el interior del termotanque y que pretendían evaluar la temperatura a la entrada y salida del colector solar de manera manual cada hora.



Figura 17. *Colector solar cónico de doble espiral.*

Como se observa en la figura 17, el colector solar estuvo conformado por un rollo de doble espiral, sostenido por barras de hierro en su interior a través de amarres de alambre, se colocó una cubierta de mica encima del rollo para evitar la influencia excesiva del viento y de esta forma se generaba un efecto invernadero en el interior del cono.

Para aprovechar los pequeños espacios de luz solar entre mangueras, se implementó una plancha de madera de plywood recubierta por una manta térmica refractante.

La línea de agua caliente estaba conformada por una manguera del mismo material que el colector y fue aislada con fibra de vidrio alrededor de esta.

Con la intención de generar el efecto de termosifón para la recirculación natural del fluido entre el colector y termotanque, se propuso colocar al termotanque a una altura arbitraria con respecto al colector.



Figura 18. Termotanque herméticamente aislado.

Como se observa en la figura 18, el termotanque está aislado con lana de vidrio de 5cm y sellado con cinta de ducto, así mismo se dispuso de acoples y codos colocados en la pared del tanque y de esta forma establecer las conexiones a los diferentes puntos necesarios para un calentador solar.

6.1.2. Adquisición de datos del prototipo original

Como se mencionó anteriormente, la forma de adquirir los datos no era correcta, por ello, lo primero que se realizó fue la sustitución de la pistola de infrarrojos por un sistema DAQ que permite la adquisición de datos mediante el uso de termocuplas tanto en la entrada y salida del colector.

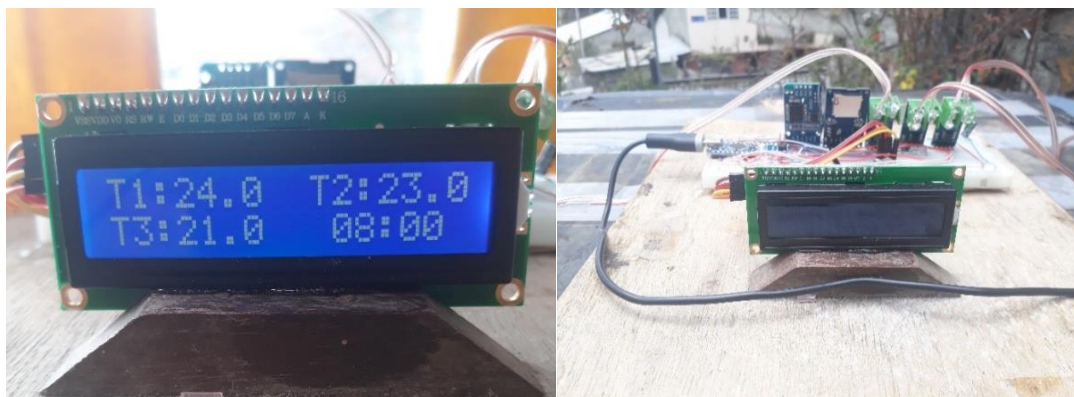


Figura 19. Sistema de adquisición de datos (DAQ).

Como se ve en la figura 19, el sistema DAQ presenta una serie de 3 termocuplas conectadas a una tarjeta Arduino Nano, las cuales están dispuestas de la siguiente manera:

- T1: Representa la temperatura de entrada de agua fría al colector solar.
- T2: Representa la temperatura en el interior del colector.
- T3: Representa la temperatura de salida de agua caliente al termotanque.

Las temperaturas pueden ser observadas por un display digital, el cual, también permite observar la hora y minutos en tiempo real en el que se realiza la medición.

Adicionalmente a esto, se programó la tarjeta Arduino para que pueda almacenar la información en una memoria externa (MicroSD) y de esta forma guardar los datos cada 5 minutos en una tabla de Excel con extensión .CSV.

6.1.3. Análisis de los datos de temperatura del prototipo original.

Una vez colocado el sistema DAQ como se observa en la figura 22, se tomaron datos de aproximadamente 5 meses (enero – mayo 2022) y se extrajo una muestra del mes de enero, como observa en la figura 21 ya que existen mayor cantidad de valores estables de este mes y al analizar los datos del [Anexo 13] para su análisis, se determinó que el calentamiento del agua era evidente en el colector, sin embargo, se desconocía la razón de la falta de calentamiento de agua en el interior del termotanque (T1 Y T3), ver figura 20.

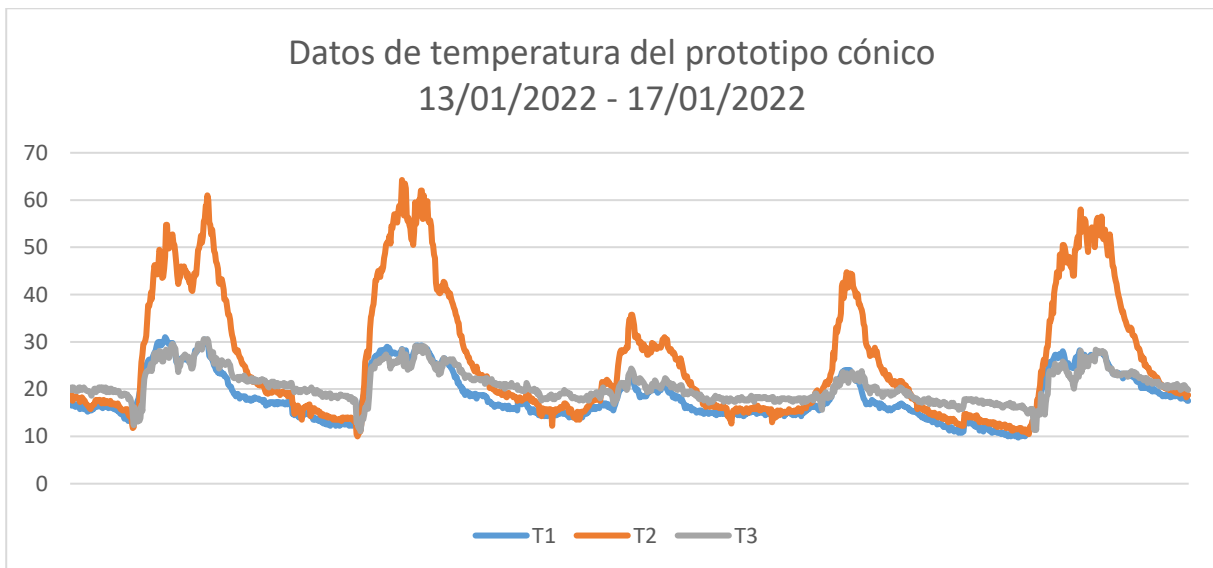


Figura 20. Datos de temperatura del prototipo cónico

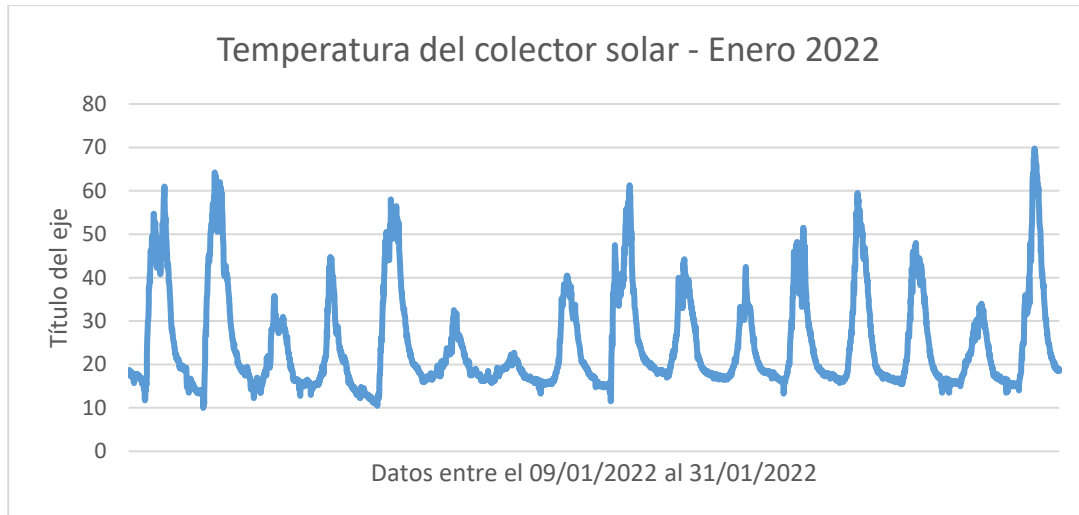


Figura 21. Datos adquiridos del colector solar original en enero de 2022.



Figura 22. Adquisición de datos del prototipo original.

6.1.4. Formulación de hipótesis para correcciones del prototipo original

A partir del análisis de datos se generaron varias hipótesis de la falta de calentamiento de agua en el termotanque como son:

- Diferencia de altura del termotanque no adecuada.
- Falla en el aislamiento térmico en la línea de agua caliente al termotanque.
- Falla en el aislamiento térmico del termotanque.
- Falla en la generación del efecto invernadero.
- Falla en la selección de diámetro de manguera en el colector.
- Falla en el diseño de carga de altura y pérdidas en el colector.

6.1.5. Experimentación del funcionamiento del sistema de calefacción en espiral

5.1.5.1. Estructura de soporte del calentador solar.

Para la evaluación de las hipótesis se procedió a trasladar los componentes del calentador solar al sitio donde está destinado al calentamiento de agua, es decir la vivienda sustentable de la FEIRNNR.



Figura 23. Adecuación de la estructura de soporte del calentador solar.

Previo a la experimentación, para generar las condiciones de nivel de altura sobre la vivienda, ya que esta no contaba con una terraza, se procedió a instalar soportes metálicos de tubo, tanto para el colector solar como para el termotanque, como se aprecia en la figura 23.

Los dos soportes están colocados a una misma altura de 2,5 metros, y se encuentran enterrados con material de cementación con la finalidad de evitar el pandeo y mantener los soportes fijos al suelo. Para la superficie donde se colocarán los componentes del calentador solar se utilizaron parrillas metálicas.

5.1.5.2. Implementación de los componentes del calentador solar.



Figura 24. Instalación de los componentes del calentador solar.

Una vez colocado los componentes necesarios del calentador solar sobre la estructura, se realizó la evaluación de las hipótesis planteadas previamente, como se observa en la figura 24.

5.1.5.3. Diferencia de altura del termotanque no adecuada.

Con base al principio de termosifón se planteó la idea de que la diferencia de altura requerida entre el colector y el termotanque era inadecuada, por lo que se procedió a variar este parámetro mediante el uso de un soporte para el termotanque sobre un tubo metálico de altura variable, como se aprecia en la figura 25.



Figura 25. *Experimentación con la diferencia de altura.*

Al variar la altura del termotanque como se aprecia en el [Anexo 13], no existía recirculación en el interior del depósito de agua, y que dicho comportamiento no estaba dado por esta diferencia de altura.

5.1.5.4. Falla en el aislamiento térmico en las líneas de agua colector-termotanque.

Nuevamente, basándose en el principio de termosifón se planteó la idea de que la línea de agua caliente que va conectada al termotanque no estaba térmicamente bien aislada, y que se debía al hecho de que con el tiempo la fibra de vidrio se volvió obsoleta. Por lo antes mencionado, se reemplazó la fibra de vidrio por una nueva, añadiendo un par de capas más, como se observa en la figura 26.



Figura 26. *Experimentación en el aislamiento térmico de las tuberías.*

Como se observa en el [Anexo 13], al cambiar la fibra de vidrio por una nueva no se notó ningún cambio en la temperatura del agua en el interior del termotanque.

5.1.5.5. Falla en el aislamiento térmico del termotanque.

Tras analizar las condiciones y el deterioro que con el tiempo se iba manifestando en el aislamiento del termotanque, se podía apreciar que el agua de lluvia se había filtrado en el aislante, lo que por consecuencia reduce sus propiedades como aislante térmico.

Se procedió a remplazar la lana de vidrio por una de iguales características y se trató de aislar con cinta de ducto y papel film en la superficie para evitar en lo posible la filtración de agua lluvia, este cambio se puede apreciar en la figura 27.



Figura 27. Experimentación en el aislamiento térmico en el termotanque.

Como se observa en el [Anexo 13], al cambiar el aislamiento de lana de vidrio por una nueva no se notó ningún cambio en la temperatura del agua en el interior del termotanque.

5.1.5.6. Falla en la generación de efecto invernadero.

Tras un exhaustivo análisis se planteó la idea de que la recirculación de agua no funcionaba debido a que el calentamiento del colector no era suficiente para generar el efecto invernadero deseado y por tanto para elevar el fluido al termotanque, así que se remplazó la cubierta de mica por plástico de invernadero, cuyas propiedades permiten el paso de rayos UV en un solo sentido, como se muestra en la figura 28.



Figura 28. *Experimentación en la cubierta del colector.*

Como se observa en el [Anexo 13] al cambiar la cubierta de mica por plástico de invernadero no se notó ningún cambio en la temperatura del agua en el interior del termotanque, sin embargo, el calentamiento en el interior del colector disminuyó, debido a que, para el calentamiento de la superficie absorbadora, también depende el grado de translucidez de la cubierta que esté por encima, y debido a que el plástico de invernadero era bastante opaco no se lograba la temperatura deseada.

5.1.5.7. Falla en la selección del diámetro de manguera en el colector.

Otra de las hipótesis y la más acercada al problema principal fue que el diámetro de la manguera en el colector era demasiado grande para que se efectúe el principio de termosifón, por lo que se aplicó el principio de continuidad, para ello se procedió a variar el diámetro de la manguera de mayor a menor diámetro, desde la base hasta la punta del cono, y reducir de doble espiral a un solo espiral, lo que aumentaba considerablemente la cantidad de espiras en el mismo, como se observa en la figura 29.



Figura 29. Experimentación con el diámetro de manguera del colector.

Como se observa en el [Anexo 13], al cambiar el diámetro de mayor a menor pasando por $\frac{3}{4}$ " a $\frac{1}{2}$ " luego a 16 mm y finalmente a 12mm, no se notó ningún cambio en la temperatura del agua en el interior del termotanque.

5.1.5.8. Falla en el diseño de carga de altura y pérdidas en el colector.

Finalmente, la opción más probable era que el termosifón no funcionaba debido a dos factores importantes y que no se consideraron en el prototipo original, como son:

- La inclinación del cono entre una espira y la contigua a esta.
- La carga de pérdidas por fricción, es decir las pérdidas causadas por la longitud de manguera utilizada en el colector.
- Las pérdidas por convección sobre la manguera son demasiado altas.

A razón de las últimas hipótesis y considerando que algunos sistemas de calentamiento de piscinas funcionan con colectores solares de bobina de manguera, se procedió a realizar un rediseño del calentador manteniendo su forma de espiral, pero evitando hacerlo en forma de cono, obteniendo así un calentador solar en forma de espiral plano.

6.2.Objetivo 2

6.2.1. Diseño del calentador solar en forma de espiral plano

Una vez que se descartaron las hipótesis de la falta de recirculación en el termotanque, se estableció un prototipo final el cual permita cumplir con la hipótesis de la falla en el diseño de carga de altura y pérdidas en el colector.

Por consiguiente, el prototipo de colector debía tener los siguientes cambios:

- Descartar su forma cónica y cambiar por una forma plana.
- Reducir la cantidad de espirales de manguera.
- Añadir una caja aislada térmicamente.
- Retirar el plástico de invernadero y cambiarlo por una cubierta de vidrio.
- Añadir una separación entre espirales.

6.2.2. *Diseño del colector solar.*

6.2.2.1. Área de captación

Para obtener el número de espirales, la cantidad de manguera, así como el diámetro externo que se forma, se debe primero adquirir el área efectiva del colector, por ello se requiere conocer el área de captación mediante las ecuaciones 1, 2 y 3.

La masa de agua requiere del volumen de agua por persona, en este caso la vivienda sustentable pese a llamarse vivienda, se considera como tipo oficina debido a la adecuación física presente, por lo tanto, de acuerdo al [Anexo 2], el consumo de agua por persona es de 2 l al día, y la cantidad de personas proyectada es de 5, la densidad del agua a la temperatura de red es de 999.1 kg/m³ de acuerdo con Cengel, (2012), por tanto:

$$M = n_p * p_{H2O} * V_p$$

$$M = 5 * 999.1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 2 \text{ l} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}} = 9.991 \text{ kg}$$

La temperatura de consumo de agua se encuentra en el normativa (NEC-HS-ER, 2020) donde se establece que se requiere una temperatura final de 60°C, mientras que la temperatura en la red se obtiene del [Anexo 4] donde se determina que la temperatura inicial es de 16.09°C. La radiación solar promedio se obtiene del [Anexo 3].

$$D_{ACS} = M * C_p (T_f - T_i)$$

$$D_{ACS} = 9.991 \text{ kg} * 1.163 * 10^{-3} \frac{\text{kWh}}{\text{kg}^\circ\text{C}} * (60^\circ\text{C} - 16.09^\circ\text{C}) = 0.510 \text{ kWh}$$

De acuerdo con (Guevara Vásquez, 2003a) para el diseño de un colector se debe utilizar una eficiencia del 45% para empezar un diseño prototipo, también se consideró un factor de seguridad de 1.5 para el mismo.

$$A_{cap} = \frac{0.511 \text{ kWh}}{2.872 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} * 0.45} * 1.5 = 0.592 \text{ m}^2$$

6.2.2.2. Área efectiva del colector

El área de captación es el área necesaria para elevar la temperatura del fluido deseada de acuerdo a las condiciones especificadas, por lo tanto, se debe de obtener un área efectiva mayor o igual al área de captación mediante el uso de mangueras, por ello se inicia un proceso de análisis que permita determinar la cantidad y diámetro de manguera utilizada mediante el uso del Software SolidWorks 2018, introduciendo como datos de entrada el número de espiras, el paso de rosca entre mangueras, el diámetro externo de la manguera y el diámetro interior formado por el rollo de mangueras.

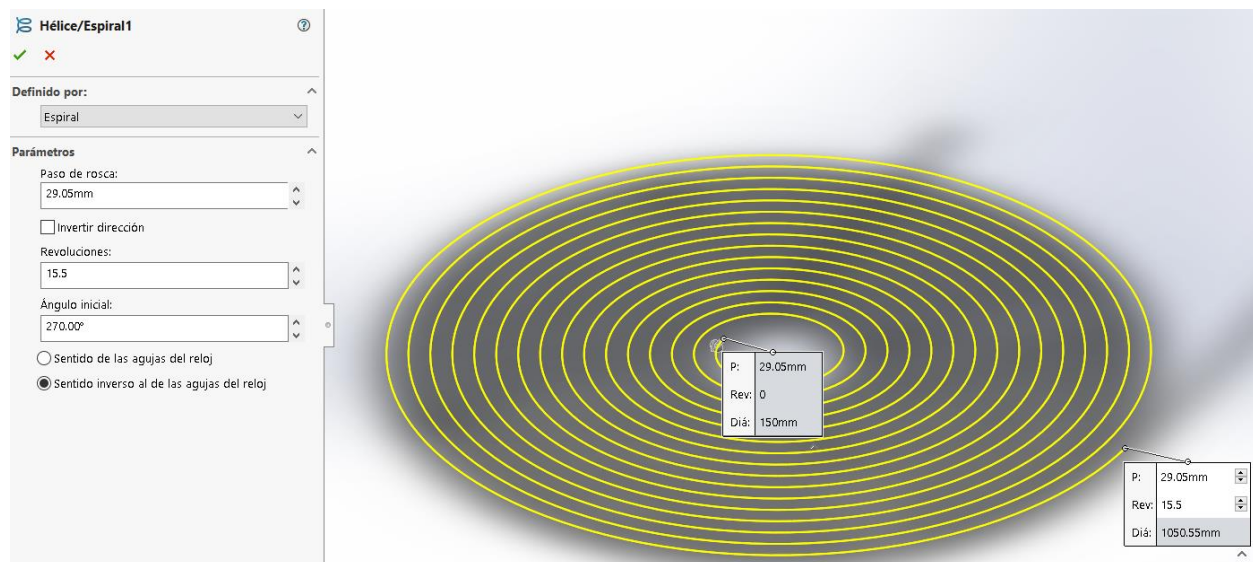


Figura 30. Generación de la espiral en SolidWorks 2018.

Como se observa en la figura 30, el rollo adquiere un diámetro exterior aproximado de 1.05 m, este valor debe ser menor que los lados internos de la caja para que pueda caber dentro de ella, y los valores de entrada son:

- Paso de rosca de 29.05mm.
 $29.05\text{mm} - 19.05\text{mm} = 10\text{mm}$ de separación entre mangueras.
- 15.5 revoluciones (15 espirales y medio)
- Diámetro interno del rollo 150mm.

El área interior de la caja es de $1.1 \times 1.1 \text{ m}^2$. El colector fue dimensionado según el criterio de costo de la plancha de acero, debido a que su dimensión estándar es de 1220 mm x 2440 mm, entonces, un colector de mayor tamaño requiere de más planchas adicionales, lo que aumentaría considerablemente el costo del calentador, además, el material sobrante se utilizó para las paredes de la caja.

La selección del diámetro de manguera está determinada por los siguientes aspectos:

- Al variar el diámetro de la manguera, también varía el área efectiva de calentamiento, y por lo tanto se debe de ajustar la longitud de manguera.
- Al variar la longitud de manguera también varía el número de espirales a utilizar.
- El diámetro interno y longitud de la manguera determina el volumen de agua en el colector.
- El diámetro externo del rollo deberá ser menor al área interna de la caja para que pueda entrar en esta.
- A partir de la longitud de manguera se determinará la cantidad de pérdidas por fricción.

La selección del material de la manguera está determinada por los siguientes aspectos:

- El material deberá de ser lo menos denso posible, con la finalidad de permitir la conducción de calor al fluido, y también permitirá la mayor flexibilidad de la manguera sin que se deforme ni se rompa.
- El material deberá ser lo más oscuro posible, ya que permitirá una mayor absorción de calor de la radiación que exista sobre la manguera.
- El material deberá soportar temperaturas de hasta 100°C sin que presente daños considerables tanto por derretimiento, como por explosión debido a la expansión térmica.

La separación entre mangueras está determinada por los siguientes aspectos:

- La separación debe permitir el mayor aprovechamiento de radiación sobre la superficie a calentar debido al ángulo solar.
- La separación permitirá evitar un flujo cruzado de calor por el contacto de las mangueras.
- La separación permitirá un mayor paso de los rayos solares a la lámina de aluminio, lo que mejora el efecto invernadero dentro a la caja debido a la refracción.

Finalmente, la selección de las mangueras para el diseño es el siguiente:

- Manguera de Polietileno de baja densidad.
- Color negro.
- Diámetro externo de $\frac{3}{4}$ ".
- Espesor de 1.2mm.

Las propiedades físicas, térmicas y mecánicas de la manguera de polietileno se encuentran en el [Anexo 5], y los distintos tipos de mangueras que existen en el mercado en el [Anexo 6].

El modelo en 3D del rollo de mangueras dibujado en SolidWorks 2018 se representa en la figura 31.

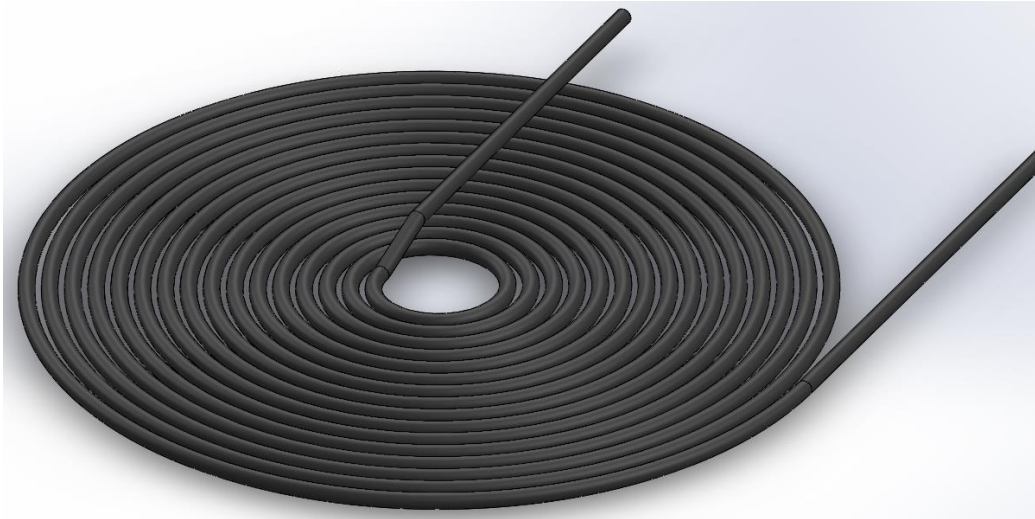


Figura 31. *Diseño del rollo de mangueras en SolidWorks 2018.*

- Longitud de rollo simulado 29233.87mm.
- Longitud de entrada del colector 650mm.
- Longitud de salida del colector 654.61mm.
- Elevación de la salida del colector 30mm.

La longitud de manguera se la obtuvo del software mencionado, a partir de ello se debe determinar el área útil de la manguera mediante la ecuación:

$$A_{et} = \frac{\pi * D * L_m}{2} \quad \text{[Ecuación 21]}$$

Donde:

A_{et} : Área efectiva teórica de calentamiento de la manguera (m²)

D : Diámetro exterior de la manguera (m)

L_m : Longitud de la manguera (m)

$$A_{et} = \frac{\pi * (19.05 * 10^{-3} \text{ m}) * ((29233.87 + 650 + 654.61) * 10^{-3} \text{ m})}{2} = 0.913 \text{ m}^2$$

El área efectiva al momento de realizar la instalación se redujo, debido a que la manguera no se podía doblar al punto deseado y se deformaba de forma considerable, incluso al momento de calentar la misma, por lo que se enrolló de afuera hacia adentro, reduciendo la longitud de

manguera a 26.9 m en el interior del colector, como se observa en la figura 51, dando como resultado un área efectiva de:

$$A_e = \frac{\pi * (19.05 * 10^{-3} \text{ m}) * (26.9 \text{ m})}{2} = 0.8 \text{ m}^2$$

El volumen dentro del colector se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$V_c = \frac{\pi * D_i^2}{4} * (L_m) \quad \text{[Ecuación 22]}$$

Donde:

V_c : Volumen de agua en el colector (m^3)

D_i : Diámetro interior de la manguera (m)

$$V_c = \frac{\pi * \left((19.05 - 1.2) \text{ mm} * \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} \right)^2}{4} * (26.9 \text{ m}) = 0.00763 \text{ m}^3 = 6.73 \text{ Litros}$$

6.2.2.3. Selección de la caja aislante

Para el armado de la caja aislante se necesita de un material de soporte que permita sostener el colector solar, por lo que es necesario escoger bien el material, se seleccionó la plancha de acero inoxidable de 0.7mm de espesor debido a que:

- El costo depende del espesor de la plancha.
- El espesor mínimo para unión por soldadura es de 0.7mm aproximadamente.
- Acero inoxidable debido a las condiciones de intemperie.

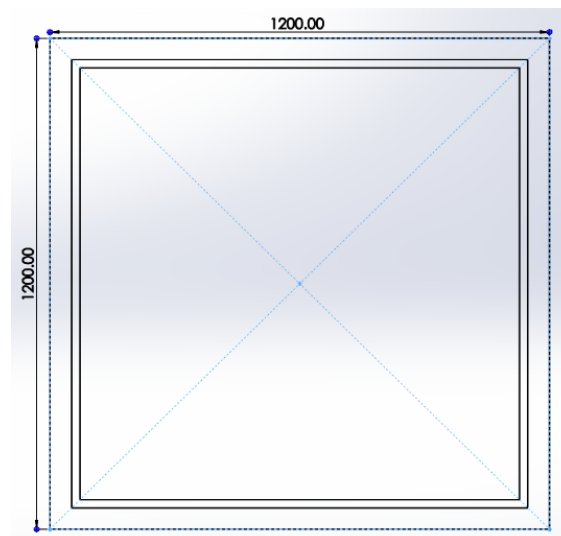


Figura 32. Dimensionamiento de la caja aislante.

La plancha tiene un tamaño estándar de 1220 mm x 2440 mm de acuerdo al [Anexo 7], por lo que para la base de la caja se requiere solo de la mitad y el resto servirá para el armado de paredes de la misma, como se muestra en la figura 32.

Una vez diseñadas los perfiles para cada lado de la caja se procede a armar la caja de acero inoxidable uniendo las partes. Las paredes de la caja están a una altura de 10 cm y se ha dejado un espacio de 5cm para la colocación del espumaflex, y una pequeña hendidura de 6mm para la cubierta de vidrio, como se aprecia en la figura 33.

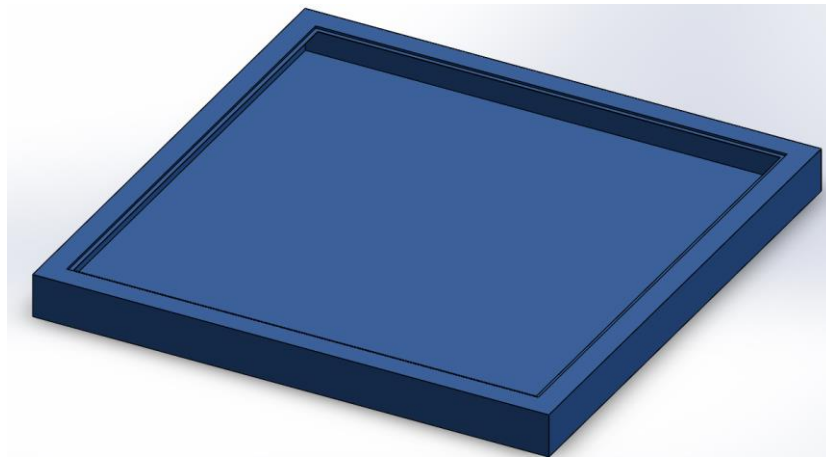


Figura 33. Armado de caja en SolidWorks 2018.

6.2.2.4. Selección del aislante inferior

Para la selección del aislante que estará sobre la base de la caja será madera plywood (madera contrachapada) de 9mm, debido a sus propiedades de aislante térmico como se ve en el [Anexo 8].

6.2.2.6. Selección del aislante lateral

Para la selección del aislante que estará a los lados de la caja será espumaflex (Poliestireno expandido) de 5cm, debido a sus propiedades de aislante térmico como se ve en el [Anexo 9].

6.2.2.7. Selección del material reflectante

Para la selección del reflectante que estará en la superficie interna de la caja, incluyendo los aislantes, será papel aluminio, debido a sus propiedades de refracción de la luz como se ve en (Cengel, 2012).

6.2.2.8. Selección de la cubierta de vidrio

La cubierta de vidrio es de los elementos más importantes para la mayoría de colectores solares, debido a que permite el ingreso de radiación solar al material absorbente, y esto dependerá

del grado de opacidad del vidrio, también protege al colector del agua lluvia, lo que de cierta forma lo convierte en un aislante térmico muy efectivo. Otro de los beneficios de usar cubierta de vidrio es el efecto invernadero que genera en el interior de la caja y que potencia y mantiene el calor por más tiempo. Por lo mismo se seleccionó una cubierta de vidrio translucido de 6mm de espesor y cuyas propiedades se encuentra en el [Anexo 10].

6.2.2.9. Ensamblaje del colector solar en espiral plano

Una vez diseñado las dimensiones de todos los elementos se procede al ensamblaje en 3D del colector solar, como se puede observar en las figuras 34 y 35.

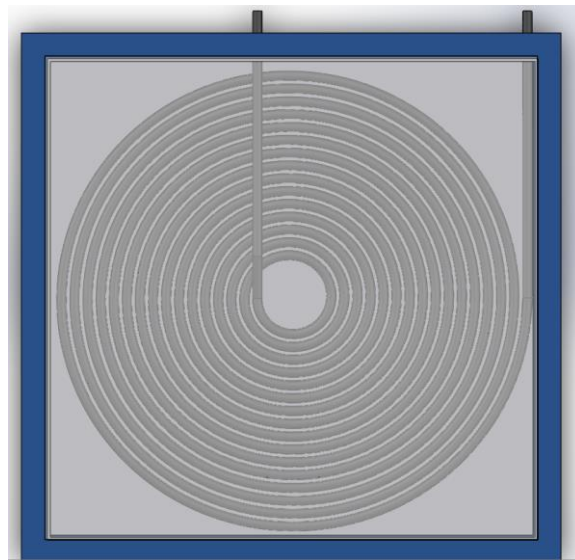


Figura 34. *Vista Superior del colector solar en SolidWorks 2018.*

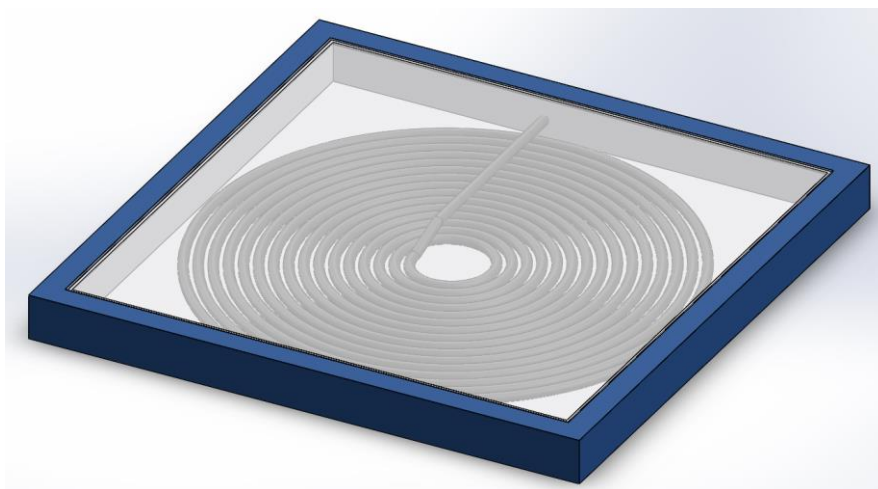


Figura 35. *Vista isométrica del colector solar en SolidWorks 2018.*

6.2.3. Coeficiente total de transferencia de calor

En esta sección se presentan los cálculos de pérdidas térmicas del colector solar, atendiendo a la geometría, elementos y parámetros externos que intervienen en el calentamiento del agua, por ello se realiza un proceso sistemático de cálculo de pérdidas de la parte superior, pérdidas en la parte inferior y pérdidas en las paredes laterales.

6.2.3.1. Coeficiente de pérdidas de la parte superior

Utilizando el procedimiento establecido por Hottel y Woertz, y aplicando una modificación de la [Ecuación 6], para añadir la reflexión del papel aluminio se obtiene:

$$U_t = \left[\frac{N}{\frac{C}{T_{pm}} \left(\frac{T_{pm} - T_a}{N + f} \right)^e + \frac{1}{h_v}} \right]^{-1} + \frac{(T_{pm} + T_a)(T_{pm}^2 + T_a^2)}{(\varepsilon_p + 0,00591Nh_v)^{-1} + \frac{2N + f - 1 + 0,133\varepsilon_p}{\varepsilon_c} - N + E_a}$$

Para los parámetros h_v , f , C y e , de la se tiene:

- Para la convección debida al viento (h_v) se tiene una velocidad del viento de 3 m/s de acuerdo con el [Anexo 1], se obtiene:

$$h_v = 5.7 + 3.8(3) = 17.1 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

- Para el cálculo de la variable f de la ecuación 6. Con un valor de $\varepsilon_p=0.95$ según (John A. Duffie et al., 2020) se obtiene:

$$f = (1 + 0.089(17.1) - 0.1166(17.1) * 0.95)(1 + 0.07866 * 1) = 0.677$$

- Para el cálculo de la variable C , con un ángulo de inclinación de 14° según norma (NEC-HS-ER, 2020), se obtiene:

$$C = 520 [1 - 0.000051(14)^2] = 514.802$$

- Para el cálculo de la variable e , considerando un valor de temperatura media de la manguera de $T_{pm}=333.15 K$ del [Anexo 13] se obtiene:

$$e = 0.430 \left(1 - \frac{100}{363.15} \right) = 0.3$$

De esta manera, el coeficiente de pérdidas en la parte superior U_t del colector queda expresada así:

$$U_t = \left[\frac{1}{\frac{514.802}{363.15} \left(\frac{333.15 - 289.55}{1 + 0.677} \right)^{0.3} + \frac{1}{17.1}} \right]^{-1}$$

$$+ \frac{5.67 \times 10^{-8} (333.15 + 289.55) (333.15^2 + 289.55^2)}{(0.95 + 0,00591(17.1)^{-1} + \frac{2 + 0.677 - 1 + 0,133(0.95)}{0.88} - 1 + 0.02}$$

$$U_t = 6.723 \frac{W}{m^2K}$$

Si es este valor se le multiplica el área efectiva del colector tenemos:

$$U_t = 6.723 \frac{W}{m^2K} * 0.8 m^2 = 5.3784 \frac{W}{K}$$

6.2.3.2. Coeficiente de pérdidas de la parte inferior

Para reducir las pérdidas térmicas de la parte inferior se eligió como aislante térmico a la plancha de plywood debido a su facilidad de adquisición, mecanizado y fácil instalación, el cual de acuerdo al [Anexo 8] posee una conductividad térmica de 0.15 W/m K. Mediante la [Ecuación 8] se puede obtener el coeficiente de pérdidas en la base del colector:

$$U_b = \frac{k_b}{l_b} = \frac{0.015 \frac{W}{mK}}{0.009 m} = 16.67 \frac{W}{m^2K}$$

Si es este valor se le multiplica el área de la plancha de plywood tenemos:

$$U_b = 16.67 \frac{W}{m^2K} * (1.1m * 1.1m) = 20.17 \frac{W}{K}$$

6.2.3.3. Coeficiente de pérdidas en la parte lateral

Mediante la [Ecuación 9] se puede obtener el coeficiente de pérdidas en las paredes laterales del colector solar:

$$U_e = \frac{0.037 \frac{W}{mK} * (1.1m * 0.1m)}{0.05 m * 0.8 m^2} = 0.1 \frac{W}{m^2K}$$

Si es este valor se le multiplica el área efectiva del colector tenemos:

$$U_e = 0.1 \frac{W}{m^2K} * 0.8 m^2 = 0.08 \frac{W}{K}$$

Una vez calculados los coeficientes de pérdidas en la parte superior, en el fondo y laterales, se determina con la ayuda de la [Ecuación 5] el coeficiente total de pérdidas U_L del colector solar.

$$U_L = U_t + U_b + U_e = (5.3784 + 20.17 + 0.08) \frac{W}{K} = 25.62 \frac{W}{K}$$

6.2.4. Cálculo del factor de remoción de calor

A continuación, con la ayuda de la [Ecuación 10], se calcula el factor de remoción de calor y se debe de igualar a las condiciones del piranómetro por lo que se divide para 12 el valor del coeficiente global al igual que el valor de S de la siguiente manera:

$$U_e = 25.62 \frac{W}{K} * \frac{1}{12} = 2.13 \frac{W}{K}$$

$$F_R = \frac{0.005 \frac{kg}{s} * 4178 \frac{W s}{kg K}}{2.13 \frac{W}{K}} \left[1 - e^{-\left(\frac{2.13 \frac{W}{K}}{0.005 \frac{kg}{s} * 4178 \frac{W s}{kg K}} \right)} \right] = 0.95$$

El valor de Cp es obtenido a la temperatura media entre la temperatura de la manguera y la temperatura de entrada de la red igual a 38°C.

6.2.5. Cálculo del calor útil ganado por el colector

Par conocer el calor útil Q_u ganado por el colector, es necesario conocer la radiación total absorbida por el mismo, la cual se la calcula mediante la [Ecuación 11].

$$S = H_T(\tau\alpha)_e \left\{ \begin{array}{l} H_T = \frac{2872 \frac{Wh}{m^2}}{12} = 239.3 \frac{W}{m^2} \\ (\tau\alpha)_e = 0.879 * 0.999 = 0.879 \end{array} \right.$$

$$S = 239.3 \frac{W}{m^2} * 0.879 = 210.386 \frac{W}{m^2}$$

Una vez determinados los parámetros necesarios para calcular el calor útil, se procede a reemplazar todos los parámetros encontrados anteriormente en la [Ecuación 17].

$$Q_u = 0.95 \left[210.389 \frac{W}{m^2} (0.8 m^2) - 2.13 \frac{W}{K} (333.15 - 289.24) K \right] = 71.05 W$$

6.2.6. Cálculo del rendimiento teórico del colector solar

Luego de haber determinado el área efectiva de captación del colector solar y la energía útil absorbida por el mismo, se hace uso de la ecuación [Ecuación 17] para calcular la eficiencia teórica del sistema de calentamiento.

$$\eta_s = \frac{71.05 W}{0.8 m^2 * 239.3 \frac{W}{m^2}} * 100 \% = 37.11 \%$$

6.2.7. Cálculo del depósito de almacenamiento

6.2.7.1. Selección del depósito de almacenamiento

A partir de la metodología de (Guevara Vásquez, 2003a) el volumen de agua se calcula para un 15% más de masa de agua a almacenar en un día, y cuyo volumen se calcula con la [Ecuación 13], dando como resultado:

$$V_{dep} = \frac{1.15 * 9.991 \text{ kg}}{999.1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0.0115 \text{ m}^3 * \frac{1000 \text{ l}}{1 \text{ m}^3} = 11.5 \text{ l}$$

Este es el volumen necesario a la temperatura de confort y cuyo valor es de referencia para el cálculo de eficiencia teórico, puesto que el volumen de prueba se lo determina a partir del llenado por flotador o el volumen que se diseñe en el termotanque, en este caso se utilizó una boya para el cierre automático a una altura de 0.215 m con respecto a la base del tanque, dando como volumen de prueba:

$$V_t = \frac{\pi * D_{it}^2}{4} * A_p \quad \text{[Ecuación 23]}$$

Donde:

V_t : Volumen de agua de prueba en el tanque (m^3)

D_{it} : Diámetro interno del tanque (m)

A_t : Altura de prueba debida a la boya (m)

$$V_t = \frac{\pi * (0.3 \text{ m})^2}{4} * (0.215 \text{ m}) = 0.015197 \text{ m}^3 * \frac{1000 \text{ l}}{1 \text{ m}^3} = 15.2 \text{ l}$$

El termotanque es el componente del calentador solar que almacena el agua que se calienta debido al colector y que servirá para la distribución en la vivienda, el termotanque puede diseñarse de acuerdo a la demanda de servicio, pero también puede ajustarse a las posibilidades económicas y de existencia del mercado, y el volumen de prueba puede adecuarse a la preferencia de temperatura del usuario.

En este caso el termotanque está diseñado con un tanque de reserva de polietileno de color azul, posee una tapa negra que lo sella perfectamente, está sujetado con una prensa de alambre de presión para una mejor hermeticidad, encima de este se adicionó una válvula de alivio con el fin de evitar las sobrepresiones en el interior, y se encuentra aislado como se muestra en la figura 26.

6.2.7.2. Pérdidas térmicas en el depósito de almacenamiento

De acuerdo con la figura 15, se requiere de la [Ecuación 16], sin embargo, se desconoce el valor de la convección en el interior del termotanque y el valor de la temperatura T_3 , por lo que se requiere de un proceso de iteración, cuyo esquema se presenta en la figura 36.

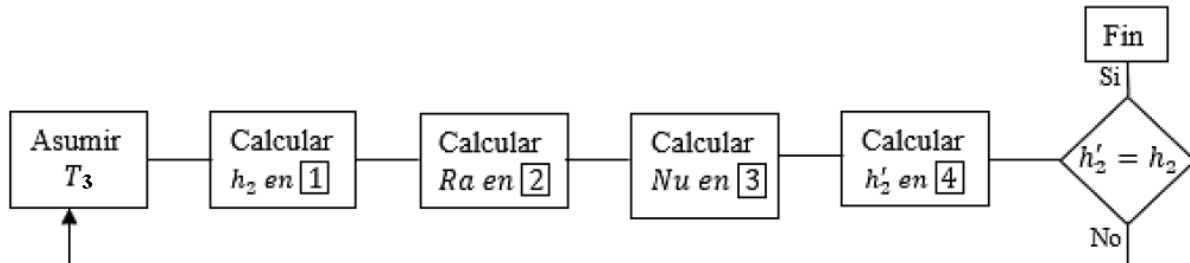


Figura 36. Diagrama de flujo para determinar el coeficiente de convección h_2 .

$$R_{total} = \frac{1}{h_1 A_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L k_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi L k_2} + \frac{1}{h_2 A_2} \quad [\text{Ecuación 16}]$$

Se conocen los siguientes valores:

$$T_{fi} = 60 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_a = 16.4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_m = \frac{(60 \text{ } ^\circ\text{C} + 16.4 \text{ } ^\circ\text{C})}{2} = 38.2 \text{ } ^\circ\text{C} = 311.35 \text{ K}$$

Para la obtención de h_1 se debe evaluar el tipo de flujo en el interior del tanque, por lo que se requiere conocer el número de Reynolds mediante la [Ecuación 18], teniendo las siguientes propiedades del agua a la temperatura media:

Tabla 5. Propiedades termo físicas del agua a temperatura media.

Propiedades del Agua a T_m					
Temperatura (K)	Densidad ρ , (kg/m ³)	Calor específico C_p , (J/kg* K)	Viscosidad dinámica μ , (kg/m*s)	Conductividad térmica k , (W/m*K)	Número de Prandtl, Pr
311.35	983.3	4179.5	4.750E-07	0.654	2.99

Primero se requiere conocer el caudal del agua en el interior del tanque, utilizando para ello el flujo másico que recomiendan (J.A Duffie & Beckman, 2013), al tener una sola espira de manguera entonces se tiene que:

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{0.005 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{983.3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 5.08492 * 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad [\text{Ecuación 24}]$$

Luego se requiere conocer la velocidad del agua en el interior del tanque, teniendo

$$v = \frac{4 * Q}{\pi * D_{it}^2} = \frac{4 * \left(5.08492 * 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)}{\pi * (0.3 \text{ m})^2} = 7.19 * 10^{-5} \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad [\text{Ecuación 25}]$$

Finalmente se aplica la [Ecuación 18], dando como resultado:

$$Re = \frac{v * D_i}{\nu} = \frac{7.19 * 10^{-5} \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0.3 \text{ m}}{4.75 * 10^{-7} \frac{\text{kg}}{\text{m s}}} = 45.43$$

Debido a que el valor del número de Reynolds del fluido dentro del tanque se encuentra en régimen laminar ya que [*Flujo turbulento* $2300 < Re < 2300$ *Flujo Laminar*], según (Cengel & Ghajar, 2011) entonces para calcular el número de Nusselt se utiliza la siguiente correlación:

- Correlación de convección local para flujo laminar en la región completamente desarrollada con temperatura superficial constante: $Nu = \frac{hD}{k} = 3.66$. Propiedades a temperatura media T_m .

Entonces el valor de la convección en el interior del termotanque es:

$$h_1 = \frac{kNu}{D} = \frac{0.654 \frac{\text{W}}{\text{m K}} * 3.66}{0.3 \text{ m}} = 7.9788 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Los valores de A_1 Y A_2 se calculan a continuación:

$$A_1 = 2\pi r_1 L = 2\pi * 0.15 \text{ m} * 0.5 \text{ m} = 0.47124 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 2\pi r_3 L = 2\pi * 0.204 \text{ m} * 0.5 \text{ m} = 0.6408 \text{ m}^2$$

Donde:

A_1 : Área interna del tanque (m^2)

A_2 : Área externa del termotanque (m^2)

r_1 : Radio interno del tanque (m)

r_3 : Radio externo del termotanque (m)

L : Altura del tanque (m)

El radio externo del tanque es igual la suma del radio interno del termotanque más el espesor del tanque que es 4mm, dando como resultado:

$$r_2 = r_1 + e_t$$

Donde:

r_2 : Radio externo del tanque (m)

e_t : Espesor del tanque (m)

$$r_2 = 0.15 \text{ m} + 0.004 \text{ m} = 0.154 \text{ m}$$

- La conductividad térmica del tanque (polietileno) $k_1=0.5 \text{ W/m K}$
- La conductividad térmica de la lana de vidrio $k_2=0.034 \text{ W/m K}$
- Correlación de Churchill y Chu para la convección libre sobre una superficie vertical a temperatura constante aplicable para todo Ra_L :

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 \cdot \text{Propiedades calculadas a } T_f = \frac{(T_s + T_\infty)}{2}$$

A continuación, se remplazan los valores conocidos en la ecuación del balance de energía del termotanque:

$$\begin{aligned} \dot{q} &= \frac{T_3 - T_a}{\frac{1}{h_2 A_2}} + \frac{T_{fi} - T_3}{\frac{1}{h_1 A_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L k_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi L k_2}} \\ \dot{q} &= \frac{T_3 - 16.4}{\frac{1}{h_2(0.6408)}} + \frac{60 - T_3}{\frac{1}{(7.9788)(0.4712)} + \frac{\ln\left(\frac{0.154}{0.15}\right)}{2\pi(0.5)(0.5)} + \frac{\ln\left(\frac{0.204}{0.154}\right)}{2\pi(0.5)(0.034)}} \\ \dot{q} &= \frac{T_3 - 16.4}{\frac{1}{h_2(0.6408)}} + \frac{60 - T_3}{2.915} \end{aligned}$$

Finalmente, aplicamos el proceso de iteración descrito en la *figura 42* utilizando las ecuaciones descritas a continuación:

$$h_2 = \frac{60 - T_3}{2.915 * 0.6408 * (T_3 - 16.4)} \therefore h_2 = \frac{60 - T_3}{1.8681 * (T_3 - 16.4)} \quad [1]$$

$$Ra = \frac{g\beta(T_3 - T_{\infty 2})l_c^3}{\nu^2} Pr \quad [2]$$

$$\text{Nu} = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 \text{ Ra}^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{\text{Pr}} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 \quad [3]$$

$$h'_2 = \frac{k\text{Nu}}{l} \quad [4]$$

Luego del proceso de iteración se llegó al valor de temperatura $T_3=23.03$ °C, cuyas propiedades térmicas se muestran a continuación:

Tabla 6. Propiedades termo físicas del aire a temperatura T_3 .

Propiedades del Aire a T_3					
Temperatura (K)	Densidad ρ , (kg/ m ³)	Calor especifico C_p , (J/kg.K)	Viscosidad dinámica μ , (kg/m.s)	Conductividad térmica k , (W/m.K)	Número de Prandtl, Pr
250.00	1.3947	1006	1.596E-05	0.0223	0.72
296.18	1.1792	1006.9236	1.827E-05	0.0259	0.707
300	1.1614	1007	1.846E-05	0.0263	0.707

$$\beta = \frac{1}{T_m} = \frac{1}{296.18 \text{ K}}$$

$$h_2 = \frac{(60 \text{ °C} - 23.03 \text{ °C})}{1.8681 \frac{\text{m}^2 \text{ K}}{\text{W}} * (23.03 \text{ °C} - 16.4 \text{ °C})} = 2.9847 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

$$\text{Ra} = \frac{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * \left(\frac{1}{296.18 \text{ K}} \right) * (23.03 \text{ °C} - 16.4 \text{ °C}) * (0.5 \text{ m})^3}{\left(\frac{1.827 * 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m s}}}{1.1792 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \right)^2} * 0.707 = 8.097 * 10^7$$

$$\text{Nu} = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 (8.097 * 10^7)^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{0.707} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 = 57.32$$

$$h'_2 = \frac{0.02606 \frac{\text{W}}{\text{m K}} * 57.32}{0.65 \text{ m}} = 2.9803 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Una vez obtenido el valor de la convección en la superficie del termotanque se procede a calcular las resistencias del mismo aplicando la [Ecuación 16]:

$$R_{total} = \frac{1}{7.9788 \frac{W}{m^2K} * 0.4712 m^2} + \frac{\ln\left(\frac{0.154 m}{0.15 m}\right)}{2\pi * 0.5 m * 0.5 \frac{W}{m K}} + \frac{\ln\left(\frac{0.204 m}{0.154}\right)}{2\pi * 0.5 m * 0.034 \frac{W}{m K}}$$

$$+ \frac{1}{2.9803 \frac{W}{m^2K} * 0.6409 m^2}$$

$$R_{total} = (0.2659 + 0.0167 + 2.6323 + 0.5235) \frac{K}{W} = 3.4386 \frac{K}{W}$$

Finalmente se calculan las pérdidas debido a las resistencias en el termotanque, dando:

$$Q_{da} = \frac{T_{fi} - T_a}{R_{total}} = \frac{(60 - 16.4)K}{3.4386 \frac{K}{W}} = 12.68 W$$

Donde:

Q_{da} : Pérdidas de calor en el termotanque ($\frac{K}{W}$)

6.2.8. Pérdidas por fricción en las tuberías de agua

Para el suministro de agua caliente y agua fría entre el colector y el termotanque se seleccionó policloruro de vinilo (PVC), debido a sus propiedades térmicas y mecánicas, pero sobre todo por su costo y su disponibilidad en el mercado.

Para el cálculo del diámetro requerido se considera la velocidad del fluido y el criterio de generar una pérdida de carga máxima de $H_r = 40mm c. a.$ por cada metro de tubería, especificado en la (NEC-HS-ER, 2020), para lo cual la velocidad de circulación del fluido no deberá sobre pasar los 2 m/s, utilizando la [Ecuación 25], tenemos:

$$Q = v \frac{\pi D^2}{4} \therefore D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v}}$$

El caudal se mantiene igual que en el cálculo del depósito, por lo que:

$$D = \sqrt{\frac{4 \left(5.08492 * 10^{-6} \frac{m^3}{s} \right)}{\pi * 2 \frac{m}{s}}}$$

$$D = 1.8 * 10^{-3} m \sim 1.8 mm$$

Este diámetro de tubería de PVC no es comercial por lo que se seleccionó una tubería comercial de PVC de ½”, que es la menor comercial existente, utilizándola tanto para la conexión tanque – colector, como para las conexiones de entrada y salida del termostanque.

Para verificar las pérdidas de carga por metro de tubería como lo indica la (NEC-HS-ER, 2020), se utilizó las expresiones desarrolladas por (Mott, Robert l., 2015), lo que permitió evaluar el diámetro seleccionado anteriormente, dado que utilizar un diámetro tan pequeño conllevaría a pérdidas por fricción mucho mayores se mantuvo la selección de usar tubería PVC ½”.

Para las pérdidas de la tubería de agua fría (A-B) y las pérdidas de la tubería de agua caliente (C-D) se tiene el siguiente cálculo:

$$H_{rA-B} = l_{A-B} * \frac{0.04 \text{ m c. a.}}{\text{m}} = 0.7 \text{ m} * \frac{0.04 \text{ m c. a.}}{\text{m}} = 0.028 \text{ m c. a.}$$

$$H_{rC-D} = l_{C-D} * \frac{0.04 \text{ m c. a.}}{\text{m}} = 0.6 \text{ m} * \frac{0.04 \text{ m c. a.}}{\text{m}} = 0.024 \text{ m c. a.}$$

$$H_{rA-B} + H_{rC-D} = (0.028 + 0.024) \text{ m c. a.} = 0.052 \text{ m c. a.}$$

$$Q = 5.08492 * 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi(0.0127)^2}{4} = 1.27 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{2.034 * 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{1.27 * 10^{-4} \text{ m}^2} = 0.0401 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$Re = \frac{vD}{\nu} = \frac{0.0401 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0.0127 \text{ m}}{4.75 * 10^{-7} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 1073.23 \rightarrow \text{Flujo Laminar}$$

Debido a que el valor del número de Reynolds del fluido dentro de los tramos de tubería se encuentra en régimen laminar ya que [Flujo turbulento $4000 < Re < 2000$ Flujo Laminar], según (Mott, Robert l., 2015) entonces, para calcular el factor de fricción se utiliza la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{0.316}{Re^{\frac{1}{4}}} = \frac{0.316}{1073.23^{\frac{1}{4}}} = 0.0552$$

$$H_{rA-B} = \lambda \frac{l_{A-B} v^2}{D 2g} = 0.0552 * \frac{0.7 \text{ m}}{0.0127 \text{ m}} * \frac{\left(0.0401 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 * 9.81 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 0.00025 \text{ m c. a.}$$

$$H_{rC-D} = \lambda \frac{l_{C-D} v^2}{D 2g} = 0.039 * \frac{0.6 \text{ m}}{0.0127 \text{ m}} = \frac{\left(0.16 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 * 9.81 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 0.00021 \text{ m c. a.}$$

Seguidamente se determinó las pérdidas primarias en el espiral de la manguera de diámetro de 3/4", como se indica a continuación:

$$Q_{Manguera} = \frac{Q}{N_{Mangueras}} = \frac{5.08492 * 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{1} = 5.08492 * 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$v = \frac{4Q_{Tubo}}{\pi D^2} = \frac{4 * 5.08492 * 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\pi * (0.01896 \text{ m})^2} = 0.01784 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$Re = \frac{vD}{\nu} = \frac{0.0713 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0.01896 \text{ m}}{4.75 * 10^{-7} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 712.11 \rightarrow \text{Flujo laminar}$$

Debido a que el valor del número de Reynolds del fluido dentro del rollo de manguera se encuentra en régimen laminar ya que [*Flujo turbulento* $4000 < Re < 2000$ *Flujo Laminar*], según (Mott, Robert I., 2015) entonces, para calcular el factor de fricción se utiliza la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{0.316}{Re^{\frac{1}{4}}} = \frac{0.316}{(712.11)^{\frac{1}{4}}} = 0.0611$$

$$H_{rp} = \lambda \frac{l v^2}{D 2g} = 0.0611 * \frac{26.9 \text{ m}}{0.01896 \text{ m}} = \frac{\left(0.0713 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 * 9.81 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 0.001408 \text{ m c. a.}$$

Finalmente, se determinó las pérdidas secundarias en los tramos A-B y C-D, tomando en cuenta todos los accesorios que se encuentran en cada tramo, los cuales se indican en el siguiente cálculo:

$$K = f_T * \left(\frac{L_e}{D}\right)$$

El factor de fricción depende del diámetro de la tubería, como la tubería es de 1/2" entonces el factor de fricción de acuerdo a la tabla 4 es 0.027, mientras que la longitud equivalente de cada accesorio depende de la tabla 3.

$$H_{rs} = K * \frac{v^2}{2 * g}$$

Los accesorios de las conexiones fueron:

- 2 codos roscados de 45°. K=26

- 1 válvula de verificación - tipo bola. $K=150$

$$H_{rs} = (26 + 26 + 150) * \frac{\left(0.0401 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * \left(9.81 \frac{m^2}{s}\right)} = 0.0166 \text{ m. c. a}$$

Adicional a esto se conectaron uniones universales para el análisis de caudal, sin embargo, estos accesorios no fueron tomados en cuenta debido a que no irían en una conexión habitual.

6.2.9. Cálculo de pérdidas térmicas en la tubería de agua caliente

Para el aislamiento de las tuberías de PVC de ½” se consideró utilizar un aislante térmico de espuma flexible (Rubatex), debido a sus propiedades térmicas y su facilidad de instalación. Este material puede encontrarse en locales que trabajen con aire acondicionado, este aislante fue colocado tanto en la tubería de agua caliente como en la tubería de agua fría, sin embargo, en términos de pérdidas térmicas se requiere únicamente el cálculo de pérdidas en el tramo de agua caliente.

Al igual que en el cálculo de pérdidas térmicas en el depósito, para las tuberías se requiere de la [Ecuación 16], sin embargo, también se desconoce el valor de la convección en el interior de la tubería de PVC y el valor de la temperatura T_3 , por lo que se requiere de un proceso de iteración, cuyo esquema se presenta en la figura 37.

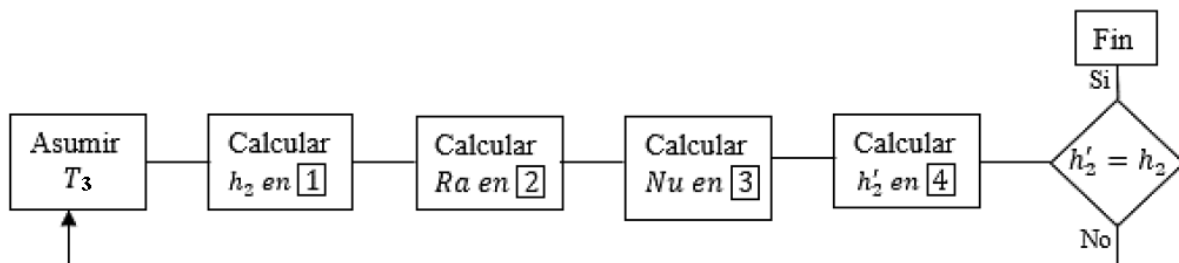


Figura 37. Diagrama de flujo para determinar el coeficiente de convección h_2 .

$$R_{total} = \frac{1}{h_1 A_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L k_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi L k_2} + \frac{1}{h_2 A_2}$$

[Ecuación 16]

Se conocen los siguientes valores:

$$T_{fi} = 60 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_a = 16.4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_m = \frac{(60 \text{ } ^\circ\text{C} + 16.4 \text{ } ^\circ\text{C})}{2} = 38.2 \text{ } ^\circ\text{C} = 311.35 \text{ K}$$

Para la obtención de h_1 se debe evaluar el tipo de flujo en el interior de la tubería, por lo que se requiere conocer el número de Reynolds mediante la [Ecuación 18], teniendo las siguientes propiedades del agua a la temperatura media:

Tabla 7. Propiedades termo físicas del agua a temperatura media.

Propiedades del Agua a T_m					
Temperatura (K)	Densidad ρ , (kg/m ³)	Calor específico C_p , (J/kg*K)	Viscosidad dinámica μ , (kg/m*s)	Conductividad térmica k , (W/m*K)	Número de Prandtl, Pr
311.35	983.3	4179.5	4.750E-07	0.654	2.99

Primero se requiere conocer el caudal del agua en el interior de la tubería, utilizando para ello el flujo másico que recomiendan (J.A Duffie & Beckman, 2013), al tener una sola espira de manguera entonces se tiene que:

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{0.005 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{983.3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 5.08492 * 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad [\text{Ecuación 24}]$$

Luego se requiere conocer la velocidad del agua en el interior de la tubería, teniendo:

$$v = \frac{4 * Q}{\pi * D_{it}^2} = \frac{4 * \left(5.08492 * 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)}{\pi * (0.0127 \text{ m})^2} = 0.0401 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad [\text{Ecuación 25}]$$

Finalmente se aplica la [Ecuación 18], dando como resultado:

$$Re = \frac{v * D_i}{\nu} = \frac{0.0401 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0.0127 \text{ m}}{4.75 * 10^{-7} \frac{\text{kg}}{\text{m s}}} = 1073.23 \rightarrow \text{Flujo laminar}$$

Debido a que el valor del número de Reynolds del fluido dentro del tanque se encuentra en régimen laminar ya que [*Flujo turbulento* $2300 < Re < 2300$ *Flujo Laminar*], según (Cengel & Ghajar, 2011) entonces para calcular el número de Nusselt se utiliza la siguiente correlación:

- Correlación de convección local para flujo laminar en la región completamente desarrollada con temperatura superficial constante: $Nu = \frac{hD}{k} = 3.66$. Propiedades a temperatura media T_m .

Entonces el valor de la convección en el interior del termotanque es:

$$h_1 = \frac{kNu}{D} = \frac{0.654 \frac{\text{W}}{\text{m K}} * 3.66}{0.0091 \text{ m}} = 263.03 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

Los valores de A_1 Y A_2 se calculan a continuación:

$$A_1 = 2\pi r_1 L = 2\pi * 0.00455 \text{ m} * 0.6 \text{ m} = 0.01715 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 2\pi r_3 L = 2\pi * 0.02135 \text{ m} * 0.6 \text{ m} = 0.08049 \text{ m}^2$$

Donde:

A_1 : Área interna de la tubería (m^2)

A_2 : Área externa del Rubatex (m^2)

r_1 : Radio interno de la tubería (m)

r_3 : Radio externo del Rubatex (m)

L : Longitud de la tubería (m)

El radio interno de la tubería es igual al radio interno de la tubería menos el espesor de la misma que es 1.8 mm, dando como resultado:

$$r_1 = r_2 - e_{tubería}$$

Donde:

r_2 : Radio externo de la tubería (m)

$e_{tubería}$: Espesor de la tubería (m)

$$r_2 = 0.00635 \text{ m} - 0.0018 \text{ m} = 0.00455 \text{ m}$$

- La conductividad térmica de la tubería $k_1=0.185 \text{ W/m K}$
- La conductividad térmica del Rubatex $k_2=0.027 \text{ W/m K}$
- Correlación de Churchill y Chu para la convección libre sobre una superficie vertical a temperatura constante aplicable para todo Ra_L :

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{1/4} \right]^{4/3}} \right\}^2 . \text{ Propiedades calculadas a } T_f = \frac{(T_s + T_\infty)}{2}$$

A continuación, se rempazan los valores conocidos en la ecuación del balance de energía de la tubería de agua caliente:

$$\dot{q} = \frac{T_3 - T_a}{\frac{1}{h_2 A_2}} + \frac{T_{fi} - T_3}{\frac{1}{h_1 A_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L k_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi L k_2}}$$

$$\dot{q} = \frac{T_3 - 16.4}{\frac{1}{h_2(0.08049)}} + \frac{60 - T_3}{\frac{1}{(263.03)(0.01715)} + \frac{\ln\left(\frac{0.00635}{0.00455}\right)}{2\pi(0.6)(0.185)} + \frac{\ln\left(\frac{0.02135}{0.00635}\right)}{2\pi(0.6)(0.027)}}$$

$$\dot{q} = \frac{T_3 - 16.4}{\frac{1}{h_2(0.08049)}} + \frac{60 - T_3}{12.6125}$$

Finalmente, aplicamos el proceso de iteración descrito en la *figura 42* utilizando las ecuaciones descritas a continuación:

$$h_2 = \frac{60 - T_3}{12.6125 * 0.08049 * (T_3 - 16.4)} \therefore h_2 = \frac{60 - T_3}{1.0152 * (T_3 - 16.4)} \quad [1]$$

$$Ra = \frac{g\beta(T_3 - T_{\infty 2})l_c^3}{\nu^2} Pr \quad [2]$$

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 \quad [3]$$

$$h'_2 = \frac{kNu}{l} \quad [4]$$

Tabla 8. Propiedades termo físicas del aire a T3.

Propiedades del Aire a T3					
Temperatura (K)	Densidad ρ , (kg/ m ³)	Calor especifico Cp, (J/kg.K)	Viscosidad dinámica μ , (kg/m.s)	Conductividad térmica k, (W/m.K)	Número de Prandtl, Pr
250.00	1.3947	1006	1.596E-05	0.0223	0.72
299.6	1.1632	1006.992	1.844E-05	0.026268	0.707104
300	1.1614	1007	1.846E-05	0.0263	0.707

Luego del proceso de iteración se llegó al valor de temperatura T3=26.45 °C, cuyas propiedades térmicas se muestran a continuación:

$$\beta = \frac{1}{T_m} = \frac{1}{299.6 \text{ K}}$$

$$h_2 = \frac{(60 \text{ °C} - 26.45 \text{ °C})}{1.0152 \frac{\text{m}^2 \text{ K}}{\text{W}} * (26.45 \text{ °C} - 16.4 \text{ °C})} = 3.288 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

$$Ra = \frac{9.81 \frac{m}{s^2} * \left(\frac{1}{299.6 K}\right) * (26.45 \text{ °C} - 16.4 \text{ °C}) * (0.6 m)^3}{\left(\frac{1.844 * 10^{-5} \frac{kg}{m s}}{1.1633 \frac{kg}{m^3}}\right)^2} * 0.707104 = 2 * 10^8$$

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 (2 * 10^8)^{\frac{1}{5}}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{0.707104}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{8}{27}}}\right\}^2 = 75.13$$

$$h'_2 = \frac{0.026268 \frac{W}{m K} * 75.13}{0.6 m} = 3.289 \frac{W}{m^2 K}$$

Una vez obtenido el valor de la convección en la superficie del termotanque se procede a calcular las resistencias del mismo aplicando la [Ecuación 16]:

$$R_{total} = \frac{1}{263.03 \frac{W}{m^2 K} * 0.01715 m^2} + \frac{\ln\left(\frac{0.00635 m}{0.00455 m}\right)}{2\pi * 0.6 m * 0.185 \frac{W}{m K}} + \frac{\ln\left(\frac{0.02135 m}{0.00635 m}\right)}{2\pi * 0.6 m * 0.027 \frac{W}{m K}} + \frac{1}{3.289 \frac{W}{m^2 K} * 0.08049 m^2}$$

$$R_{total} = (0.2216 + 0.4779 + 11.913 + 3.777) \frac{K}{W} = 16.39 \frac{K}{W}$$

Finalmente se calculan las pérdidas debido a las resistencias en el termotanque, dando:

$$Q_{aguac} = \frac{T_{fi} - T_a}{R_{total}} = \frac{(60 - 16.4)K}{16.39 \frac{K}{W}} = 2.66 W$$

Donde:

Q_{aguac} : Pérdidas de calor en la tubería de agua caliente ($\frac{K}{W}$)

6.2.10. Cálculo de la presión manométrica en el rollo de mangueras

Para ello se utiliza la ecuación de Bernoulli de acuerdo con (Mott, Robert I., 2015).

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho_{H2O1} v_1^2 + \rho_{H2O2} g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho_{H2O2} v_2^2 + \rho_{H2O2} g h_2$$

Donde:

P_1 : Presión en la entrada del colector (Pa)

v_1 : Velocidad del agua a la entrada del colector (m/s)

h_1 : Altura en la entrada del colector (m)

ρ_{H2O1} : Densidad del agua en la entrada del colector (kg/m^3)

P_2 : Presión en la salida del colector (Pa)

v_2 : Velocidad del agua a la salida del colector (m/s)

h_2 : Altura en la salida del colector (m)

$\rho_{H_2O_2}$: Densidad del agua en la salida del colector (kg/m³)

$$v_1 = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) (0.65 \text{ m})} = 3.57 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$h_1 = 0 \text{ m}$ (altura de referencia)

$h_2 = 0.25 \text{ m}$

$$v_2 = \frac{Q}{A_2} = \frac{Q}{\pi * r_2^2} = \frac{0.005 \frac{\text{l}}{\text{s}} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{l}}}{\pi * (0.00455 \text{ m})^2} = 0.07688 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\rho_{H_2O_1}(16.4 \text{ }^\circ\text{C}) = 999.1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{H_2O_2}(60 \text{ }^\circ\text{C}) = 983.13 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$P_2 - P_1 = \frac{1}{2} \rho_{H_2O_1} v_1^2 - \frac{1}{2} \rho_{H_2O_2} v_2^2 + \rho_{H_2O_2} g h_1 - \rho_{H_2O_2} g h_2$$

$$P_2 - P_1 = \frac{1}{2} \left(999.1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(3.57 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 - \frac{1}{2} \left(983.13 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(0.07688 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 + 0 - \left(983.13 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) (0.25 \text{ m})$$

$$P_2 - P_1 = 3952.683 \text{ Pa} = 0.0039 \text{ MPa}$$

6.2.11. Construcción del prototipo final

Para la fabricación del colector se requiere primero de la caja aislante, para la cual se utilizó una plancha de acero inoxidable de 1.22m x 2.44m con 0.7mm de espesor y fue cortada a la mitad, utilizando una mitad para la base de la caja y el resto se cortó en pedazos que conformaron los perfiles de las paredes laterales.

- Se realizó el doblado de los perfiles utilizando una plegadora hidráulica.
- Luego, se procede con el armado de los perfiles que conforman las paredes laterales de la caja, uniéndolos a la base con suelda eléctrica de cobre.
- Una vez armada la caja se colocaron los aislantes térmicos laterales (Espumaflex) y de la base (Plancha de plywood) cortados a la medida especificada.
- Para la refracción de la luz solar y generación del efecto invernadero dentro de la caja se colocó papel aluminio para cocina sobre los aislantes, aplicando 2 capas para mayor seguridad.

- Para el rollo de mangueras, se colocó las mangueras de afuera hacia adentro sobre el papel aluminio, utilizando el máximo espacio posible dentro de la caja y separando cada espira a 1 cm de la otra mediante el uso de clavos sin punta empotrados sobre el papel de aluminio y la madera.
- Al llegar al final del rollo la manguera empezó a intentar deformarse, por lo que a efectos prácticos no se optó por doblarla más, dejando así un máximo de espiras de 11.5, que redujo la longitud de manguera de 30.5m a 26.9m.
- Para mantener el nivel de las mangueras y que no se levante el rollo se procedió a colocar alambre entre los clavos hasta que no se levante ninguna manguera.
- Para realizar las conexiones con el termostato se realizaron perforaciones para las mangueras tanto de entrada como de salida, sellando con Permatex los espacios entre manguera y la plancha de aluminio, para evitar posibles fugas de calor. Luego, se instalaron acoples para la conexión con las tuberías de PVC.
- Finalmente, se asienta la cubierta de vidrio sobre el conjunto, dando por finalizado el ensamble del colector solar, como se observa en la figura 38.

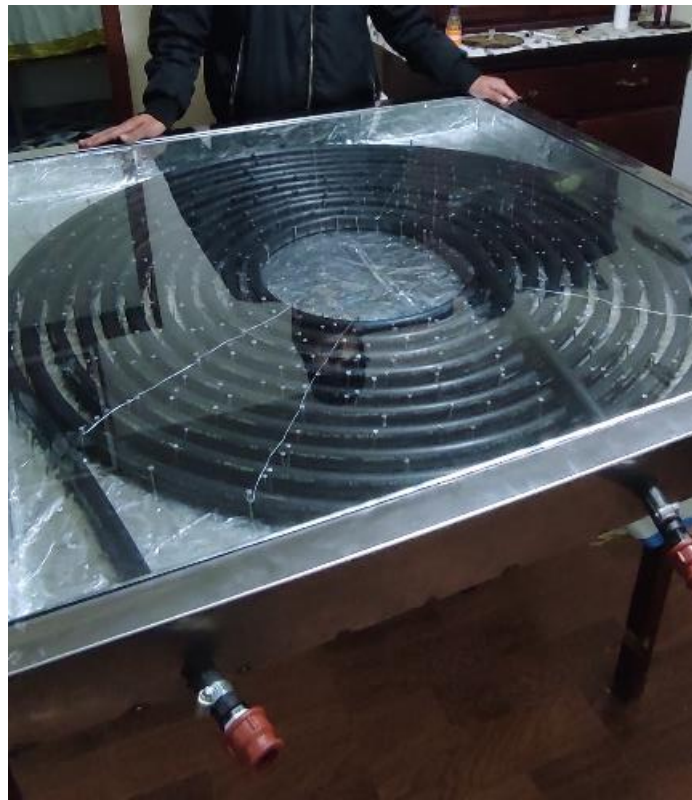


Figura 38. *Ensamble del colector solar.*

6.2.12. Implementación del calentador solar

Una vez construido el colector solar se procede a instalarlo junto a la vivienda sustentable, para ello se colocó sobre la estructura construida previamente, como se muestra en la figura 39.



Figura 39. *Instalación del colector solar.*

Para la instalación del colector y de acuerdo a la metodología de diseño de calentadores solares utilizada, el colector fue instalado a una inclinación de 14° y sujetado mediante mordazas metálicas y alambre galvanizado, como se ve en la figura 40.

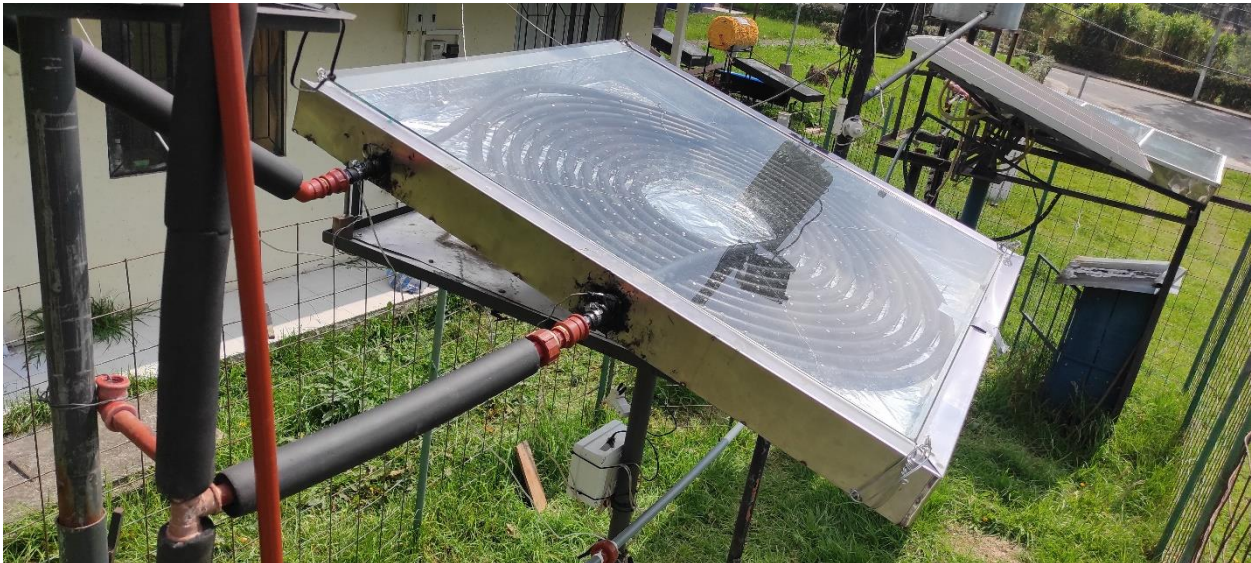


Figura 40. *Inclinación del colector solar*

Las conexiones de las tuberías de PVC del calentador solar se aprecian en la figura 41.



Figura 41. *Conexión de tuberías PVC de agua caliente y agua fría.*

Finalmente, el calentador solar completamente instalado se muestra en la figura 42.



Figura 42. *Calentador instalado en la vivienda sustentable.*

6.3. Objetivo 3

Para la evaluación térmica del Calentador se instalaron 3 termocuplas dispuestas de la siguiente manera:

- T1: Representa la temperatura en el interior del termotanque.
- T2. Representa la temperatura de salida de agua caliente al colector.
- T3. Representa la temperatura de entrada de agua fría al colector.

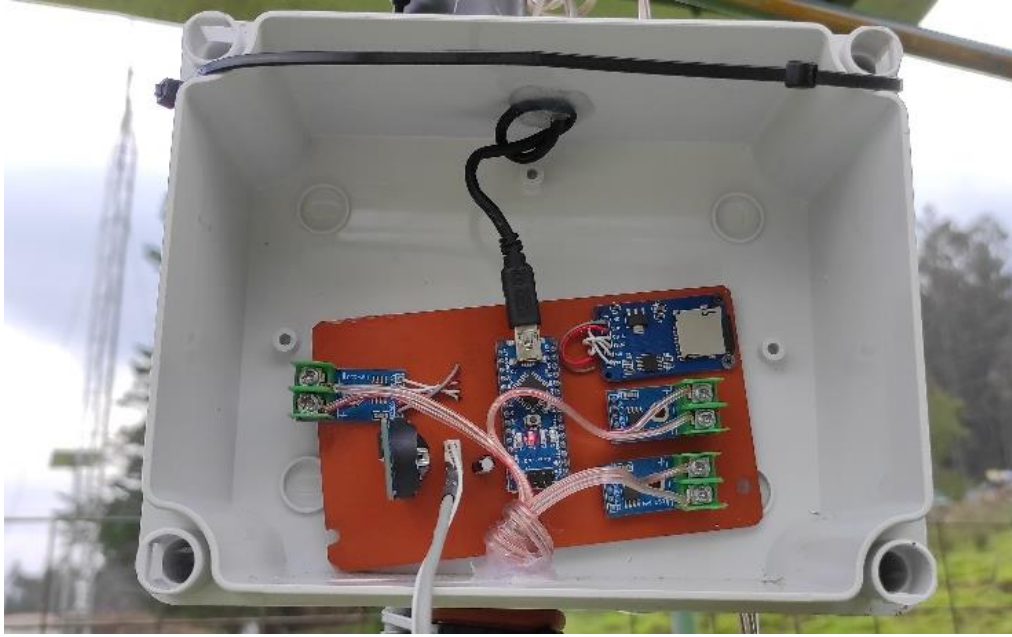


Figura 43. Sistema DAQ con 3 termocuplas.



Figura 44. Sistema instalado en el lugar de estudio.

Para proteger el dispositivo DAQ se protegió los circuitos eléctricos mediante una caja de plástico, la cual posee protección contra el agua, ya que, está colocada junto al calentador a la intemperie, de esta forma se puede observar las temperaturas mediante el display digital, como se ve en las figuras 43 y 44.

Para el análisis de datos se requiere del volumen de prueba, para ello se requiere asegurar que la cantidad de agua sea la misma en el tiempo de estudio, por ello, se implementó un flotador de nivel o boya en el tanque, lo que permite un nivel constante de fluido en el interior y automatizar el vaciado y llenado de agua que será utilizado en la vivienda sustentable, como se observa en la figura 45.



Figura 45. *Tanque auto llenado por flotador.*

6.3.1. Monitoreo y validación funcional de la instalación solar

Luego de ser construido e implementado el sistema solar térmico para el calentamiento de agua de uso sanitario, se procedió al monitoreo continuo del funcionamiento del colector durante un lapso de 5 días (10 al 14 de octubre de 2022).

La supervisión funcional del equipo se la llevó a cabo con la finalidad de establecer el rendimiento real que proporciona la instalación. En el [Anexo 11] se encuentran los valores de eficiencia del colector, utilizando para ello la [Ecuación 18], [Ecuación 19] y [Ecuación 20], mediante los mismos se determinó el rendimiento del calentador en los días de monitoreo como se observa en la tabla 9.

Tabla 9. *Eficiencia del colector en los días de prueba.*

Día	Irradiancia (W/m²)	E_i (W)	Eficiencia n (%)
1	369.818182	294.58	35
2	297.054545	238.79	29
3	758.2	609.05	40
4	746.58	599.22	41
5	342.381818	278.26	33

Los datos obtenidos se encuentran en el [Anexo 11], y están representados gráficamente en las figuras 46, 47, 48, 49 y 50.

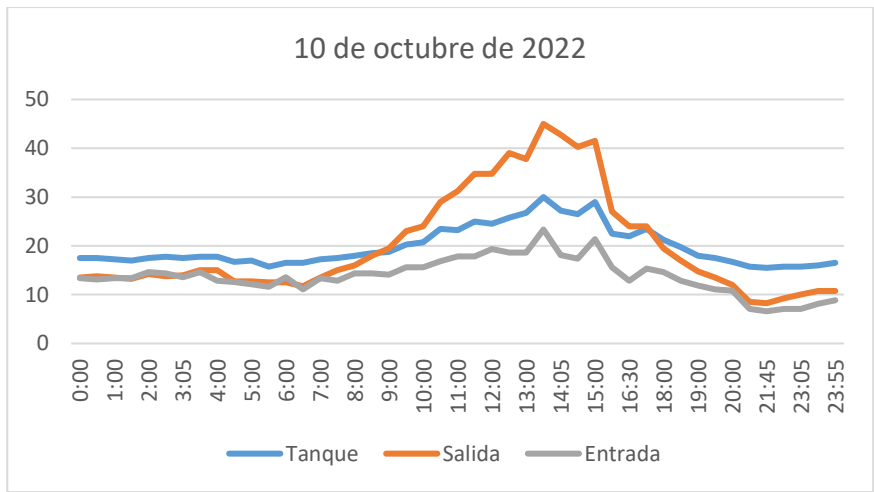


Figura 46. Gráfico de temperaturas de las termocuplas 10/10/2022.

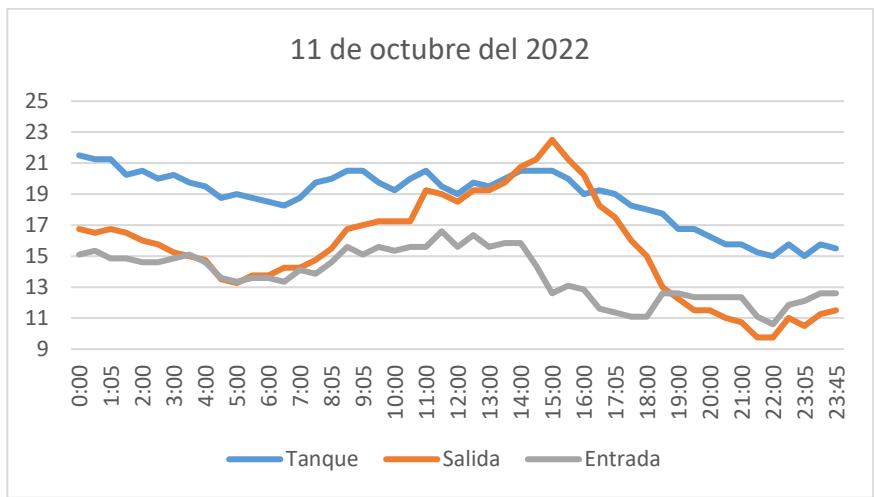


Figura 47. Gráfico de temperaturas de las termocuplas 11/10/2022.

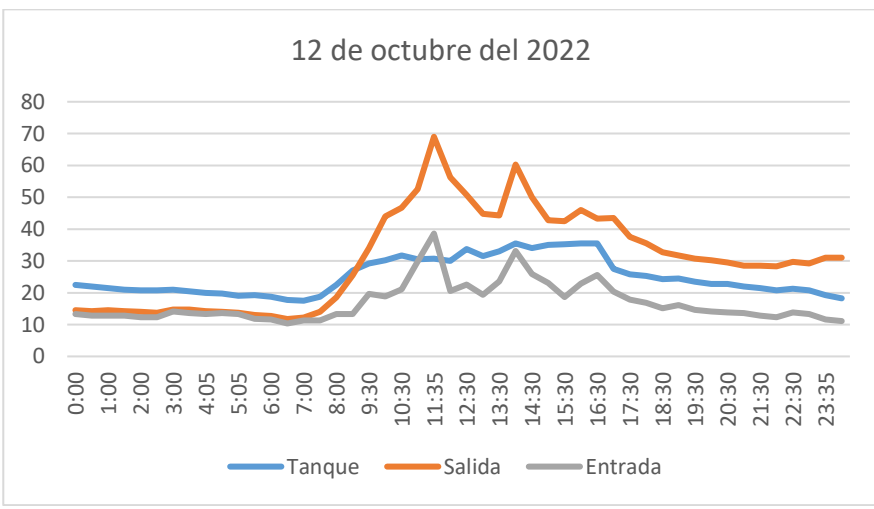


Figura 48. Gráfico de temperaturas de las termocuplas 12/10/2022.

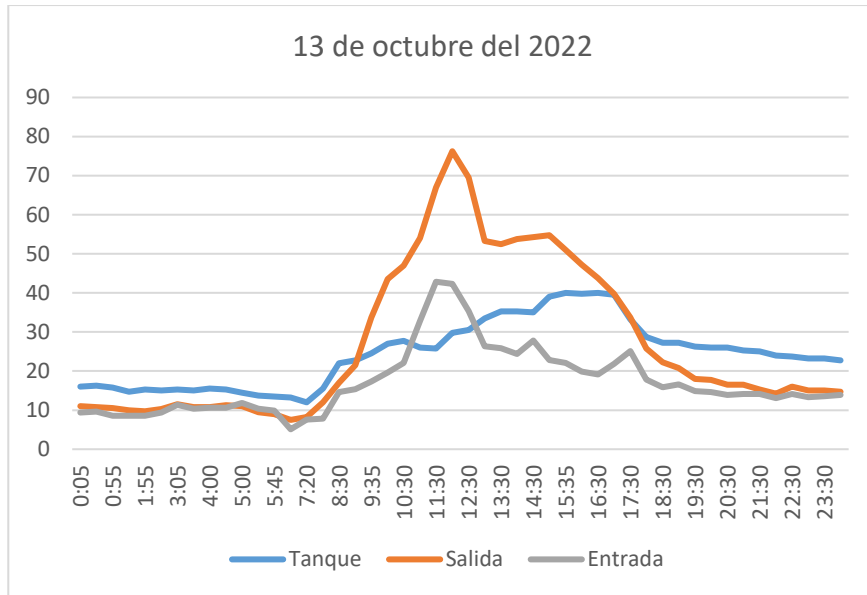


Figura 49. Gráfico de temperaturas de las termocuplas 13/10/2022.

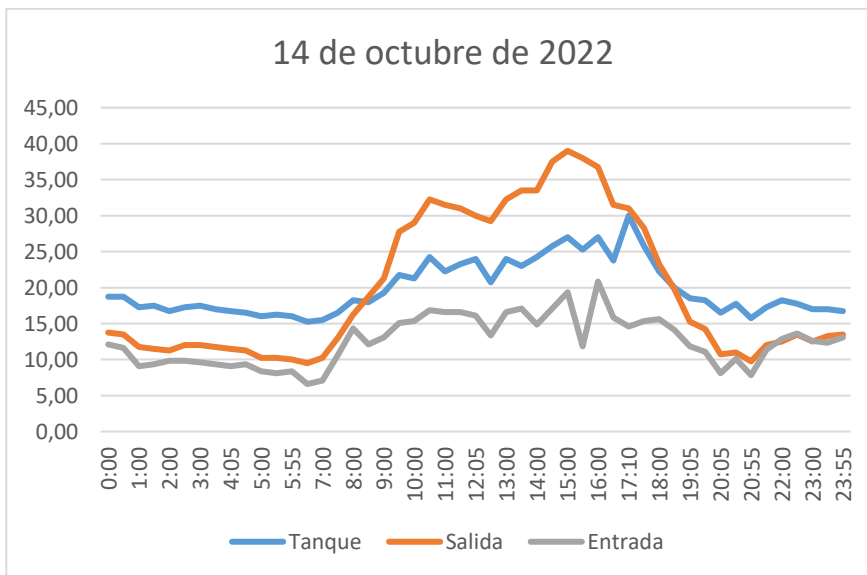


Figura 50. Gráfico de temperaturas de las termocuplas 14/10/2022.

Los valores de eficiencia diaria logrados en el periodo de monitoreo son del orden del 29 % y del 41 %, obteniendo como promedio de los días de monitoreo un 37 %, lo que se considera aceptable de acuerdo al diseño planteado.

Para contrastar que la eficiencia obtenida anteriormente, se encuentra en el intervalo adecuado para este tipo de instalaciones, se indagó a través de varias fuentes electrónicas y se encontró eficiencias similares para equipos construidos e implementados con características similares.

La tabla 10 detalla las eficiencias de los equipos con los cuales se comparó el rendimiento del prototipo instalado.

Tabla 10. Comparación de la eficiencia de calentadores solares.

Autor	Material Absorbedor	Área (m ²)	Eficiencia (%)
(Mariana González et al., 2014)	Placa absorbadora de chapa galvanizada acanalada	2	38
(Ana Criado González, 2009)	Tubo y aletas de cobre	1.9	48.1
(Burbano et al., 2006)	Tubo y aletas de aluminio	1.5	51.09
(Heredia et al., 2005)	Tubo y aletas de cobre	2	50
(Larreta, 2015)	Tubo de cobre y aletas de aluminio	3	45.23
Autor	Espiral de manguera de polietileno	0.8	37

6.4. Evaluación económica del sistema de calentamiento de agua diseñado

6.4.1. Presupuesto para la construcción del calentador solar

Tabla 11. Presupuesto para la construcción del calentador solar.

Elemento	Material	Tipo	Dimensión	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio total (\$)
Colector	Manguera	Polietileno	26.9 m Φ 3/4"	m	28	0.26	7.28
	Plancha	Acero inoxidable	1.22 m x 2.44 m x 0.7 mm	u	1	75	75
	Plancha	Madera plywood	1.1 m x 1.1 m x 9 mm	u	1	12	12
	Alambre	Galvanizado	Φ 1 mm	lb	1	1.25	1.25
	Plancha	Espumaflex	2 m x 1 m x 5 cm	u	1	6	6
	Papel aluminio	Aluminio	Rollo	u	2	1.75	3.5
	Clavos	Sin punta	Φ 1 1/2"	lb	2	1.15	2.3
	Vidrio	Translucido	1.1 m x 1.1 m x 6mm	u	1	26	26
Subtotal							133.33

Elemento	Material	Tipo	Dimensión	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio total (\$)
Termotanque	Tanque	Polietileno	30 litros	u	1	12	12
	Aislante térmico	Lana de vidrio	de 3 m x 0.6 m Φ 50 mm	m ²	1.8	5.5	9.9
	Papel embalaje	de Film	N/A	u	1	3	3
	Flotador	Tanque	N/A	u	1	12	12
	Salida tanque	para PVC	Φ 1/2"	u	3	2.31	6.93
	Cinta	Ducto Gris	N/A	u	1	3.4	3.4
	Válvula alivio	de Plástico	Φ 6 mm	u	1	0.3	0.3
Subtotal							47.53
Conexiones	Tubería	PVC	0.6 m Φ 1/2"	m	0.6	0.75	0.45
	Tubería	PVC	1.12 m Φ 1/2"	m	1.12	0.75	0.84
	Codo roscable	45° PVC	Φ 1/2"	u	1	0.86	0.86
	Aislante térmico	Rubatex	1.72 m x 1/2"	m	1.8	5.5	9.9
	Unión universal roscable	PVC	Φ 1/2"	u	2	2.5	5
	Tee roscable	PVC	Φ 1/2"	u	1	0.55	0.55
	Teflón	-	Rollo	u	2	0.43	0.86
	Llave chorro	de Plástico	Φ 1/2"	u	1	7	7
Codo roscable	90° PVC	Φ 1/2"	u	3	1	3	
Subtotal							28.46
Total							209.32

El presupuesto considerado para el prototipo de calentador son los costos totales que intervienen en la construcción del sistema de calentamiento, el cual fue de USD 209.32, como se observa en la tabla 11.

6.4.2. Estudio económico de la instalación solar

La presente evaluación económica parte de dos aspectos importante:

- El aporte energético del sistema al calentamiento de agua.
- Periodo de retorno de la inversión del sistema.

Considerando que el aporte será siempre una fracción porcentual de la necesidad energética del colector bajo condiciones solares del sitio de instalación.

Como una consideración adicional se requiere conocer el aporte del calentador en una vivienda unifamiliar promedio de la ciudad de Loja y para ello se requiere la demanda de agua por persona del [Anexo 2], el número promedio de personas que habitan la vivienda de acuerdo con el (Instituto Nacional de Estadísticos y Censo (INEC), 2018) es de 4, por tanto la demanda diaria de agua caliente sanitaria es:

$$D_{vivienda} = V_p * n_{pv} \quad \text{[Ecuación 27]}$$

$$D_{diaria} = 28 \frac{l}{día} * 4 = 112 \frac{l}{día}$$

El volumen de agua en el termotanque es el volumen total de servicio para la vivienda:

$$V_{servicio} = V_t \quad \text{[Ecuación 28]}$$

$$V_{servicio} = 15.2 l$$

Sin embargo, el volumen real de agua caliente a 60°C que aporta el calentador solar se calculó de acuerdo a la demanda para una oficina con proyección de 5 personas, utilizando el área efectiva del colector tenemos:

$$V_{acs} = \frac{A_e}{A_{cap}} * V_p * n_p \quad \text{[Ecuación 29]}$$

$$V_{acs} = \frac{0.8 m^2}{0.592 m^2} * 2l * 5 = 13.51 \frac{l}{día}$$

Por lo que el tiempo de calentamiento a la temperatura deseada para todo el sistema sería:

$$t = \frac{V_{servicio}}{V_{acs}} \quad \text{[Ecuación 30]}$$

$$t = \frac{15.2 l}{13.51 \frac{l}{día}} = 1.12 \approx 1 \text{ días}$$

Este es el tiempo que le toma al calentador llegar a la temperatura deseada, este parámetro puede ser ajustarse a los requerimientos del usuario, para ello, se recomienda cambiar el nivel de agua en el tanque al volumen de demanda para obtener 60 °C diariamente.

Finalmente aplicando este concepto con una vivienda unifamiliar en la ciudad de Loja se obtiene el número de colectores necesarios.

$$n_c = \frac{D_{acs}}{V_{acs}}$$

$$n_c = \frac{112 \frac{\text{l}}{\text{día}}}{13.51 \frac{\text{l}}{\text{día}}} = 8.29 \text{ colectores}$$

Mientras que la masa de agua caliente sanitaria mensual que aportará el sistema será:

$$V_{acs} = 13.51 \frac{\text{l}}{\text{día}} * 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 405.3 \frac{\text{l}}{\text{mes}}$$

$$M_{acs} = 405.3 \frac{\text{l}}{\text{mes}} * 1 \frac{\text{m}^3}{1000 \text{ l}} * 999.1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 404.935 \frac{\text{kg}}{\text{mes}}$$

(Ojeda et al., 2017) mencionan que la temperatura de agua de red en la ciudad de Loja corresponde a 13.3 °C, dato que ha sido proporcionado por la planta de tratamiento “Pucará” de la Empresa Pública Municipal de alcantarillado y agua potable de Loja (EMAALEP). A partir de este valor se calcula la cantidad de energía que aportará el sistema al calentamiento de agua a una vivienda en un mes:

$$E_{mes} = M_{acs} * C_p * \Delta t$$

$$E_{mes} = \left(404.935 \frac{\text{kg}}{\text{mes}}\right) * \left(1.163 * 10^{-3} \frac{\text{kWh}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}\right) * (60 \text{ } ^\circ\text{C} - 13.3 \text{ } ^\circ\text{C})$$

$$E_{mes} = 21.99 \frac{\text{kWh}}{\text{mes}} \approx 22 \frac{\text{kWh}}{\text{mes}}$$

Como consideración adicional para obtener el beneficio en una vivienda, el calentador proporcionará el 80% de la demanda, mientras que el resto será suministrado por un calefón o una ducha eléctrica.

$$E_{año} = 22 \frac{\text{kWh}}{\text{mes}} * 0.8 = 17.6 \frac{\text{kWh}}{\text{mes}} = 211.2 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}$$

Por lo tanto, del cálculo del número de colectores se deduce que el calentador por sí solo no es suficiente para abastecer a una vivienda unifamiliar en la ciudad de Loja, debido a que fue diseñado exclusivamente para la vivienda sustentable que se considera de tipo oficina de acuerdo a sus características.

Sin embargo, por motivos de cálculo del retorno de la inversión del prototipo, se calculará comparando con el gasto que producen otras energías para calentar agua sanitaria, como el uso del GLP en un calefón y el uso de energía eléctrica en una ducha.

La ducha tiene un rendimiento del 1, mientras que el calefón de 0.87, y como se mencionó anteriormente el calentador tendrá un aporte del 80%, calculando así el consumo de estos 3 tipos de calentamiento.

$$Consumo_{ducha} = \frac{E_{año}}{n_{ducha}} = \left(211.2 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \right) = 211.2 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}$$

$$Consumo_{calefón} = \frac{E_{año}}{n_{calefón}} = 187.744 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}$$

$$Consumo_{colector} = E_{año} * 0.2 = 42.24 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}$$

El precio de la electricidad de acuerdo a la (Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables [ARC], 2022) es de \$ 0.0923 por kWh, mientras que el precio de la energía del GLP se calcula de la siguiente manera:

- Un cilindro está lleno de 15 kg GLP.
- El precio por kilogramo de GLP doméstico en el Ecuador es de \$ 0.106667 de acuerdo con (EP PetroEcuador, 2022).
- De los 15 kg de GLP son útiles 13.64 kg y el poder calorífico del GLP es 46168.88 kJ/kg de acuerdo con (Aguilar, 2012)

Por tanto, el precio por kWh del GLP es:

$$E_{GLP} = 13.64 \text{ kg} * 46168.88 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 629743.523 \text{ kJ} = 174.928756 \text{ kWh}$$

$$Precio_{GLP} = \frac{15 \text{ kg}}{1 \text{ cilindro}} * \frac{1 \text{ cilindro}}{174.92756 \text{ kWh}} * \frac{\$ 0.106667}{1 \text{ kg}} = \frac{\$ 0.00914661}{\text{kWh}}$$

A continuación, se realiza el costo anual de las diferentes fuentes de energía para suministrar agua caliente sanitaria a una vivienda de acuerdo a la demanda:

$$\text{Costo anual}_{Ducha} = \text{Consumo}_{Ducha} * 0.0923 = \frac{\$ 19.4937}{\text{año}}$$

$$\text{Costo anual}_{GLP} = \text{Consumo}_{GLP} * 0.00914 = \frac{\$ 1.7172}{\text{año}}$$

$$\text{Costo anual}_{Ducha-Colector} = \text{Consumo}_{colector} * 0.0923 = \frac{\$ 3.8987}{\text{año}}$$

$$\text{Costo anual}_{GLP-Colector} = \text{Consumo}_{colector} * 0.00914 = \frac{\$ 0.38}{\text{año}}$$

$$\text{Ahorro anual}_{Ducha-Colector} = \frac{\$ 19.4937}{\text{año}} - \frac{\$ 3.8987}{\text{año}} = \frac{\$ 15.595}{\text{año}}$$

$$\text{Ahorro anual}_{GLP-Colector} = \frac{\$ 1.7172}{\text{año}} - \frac{\$ 0.38}{\text{año}} = \frac{\$ 1.3311}{\text{año}}$$

Luego de haber determinado el ahorro que se obtiene al sustituir un sistema de calentamiento convencional por un sistema de calentamiento solar, se determinó el tiempo en que se recuperaría la inversión inicial al instalar un sistema de calentamiento solar, de la siguiente manera:

$$\text{Payback} = \frac{\text{Costo del sistema}}{\text{Ahorro de costo anual}}$$

$$\text{Payback} = \frac{\$ 209.32}{\text{Ahorro anual}_{Ducha-Colector}} = 13.42 \text{ años}$$

Conocidos todos estos parámetros se determinó que, al sustituir un equipo eléctrico para el calentamiento de agua (ducha eléctrica) por un sistema de calentamiento solar, se consigue ahorrar USD 15.595 al año, recuperando la inversión de todo el sistema en un lapso de 13.42 años. De igual manera se establece que si se reemplaza un equipo que utiliza GLP por un sistema de calentamiento solar, se ahorra USD 1.33 al año por lo que, a diferencia de lo anterior, la recuperación de la inversión del sistema solar será en un lapso mucho más largo, alrededor de 157.25 años para el precio del GLP subsidiado. En la [Tabla 12] se detalla el resultado de todo lo antes indicado.

Tabla 12. *Análisis económico del calentador solar.*

Sistemas de calentamiento de agua	Rendimiento (%)	Demanda anual (kW-h)	Consumo anual (kW-h)	Precio energía (USD/kWh)	Costo anual energía (USD)	Ahorro (USD/año)	Porcentaje de ahorro empleando colectores solares	Payback empleando colectores solares (años)
Calentador solar	80% de aportación	211.2	42.24	0.0923 0.00914	3.89 0.38	-	-	-
Ducha eléctrica	100		211.2	0.0923	19.49	15.59	80 %	13.42

6.4.3. Aporte a la reducción de CO₂ con respecto al GLP.

Para calcular esto hay que saber que un litro de GLP pesa unos 550 gramos. El GLP contiene un 82,5% de carbono, lo que vienen siendo 454 gramos de carbono por litro. Para consumir este se necesitan 1211 gramos de oxígeno. En total tendremos unos 1665 gramos de CO₂ por cada litro de GLP (Ecoscore, 2022).

Como se dijo anteriormente, un tanque de gas para consumo del hogar posee 15kg en su interior, por lo tanto, se debe calcular la cantidad de CO₂ para un cilindro.

$$V_{GLP} = \frac{m_{GLP}}{\rho_{GLP}} = \frac{15\text{kg} * \frac{1000\text{g}}{1\text{kg}}}{550 \frac{\text{g}}{\text{l}}} = 27.27 \text{ l}$$

$$CO_{2\text{tanque}} = V_{GLP} * \rho_{CO_2} = 27.27 \text{ l} * 454 \frac{\text{g}}{\text{l}} = 12381.81 \text{ g} = 12.38 \text{ kg}$$

Luego, se calcula la cantidad de kilogramos de CO₂ al año que evitamos al utilizar un calentador solar en la vivienda sustentable.

$$CO_{2\text{evitado}} = \frac{CO_{2\text{tanque}} * \text{Ahorro anual}_{GLP-\text{Colector}}}{\text{Precio}_{\text{tanque GLP}}}$$

$$CO_{2\text{evitado}} = \frac{12.38 \text{ kg} * \frac{\$ 1.3311}{\text{año}}}{\$ 1.60} = 10.3 \frac{\text{kg}}{\text{año}}$$

7. Discusión

De acuerdo al diseño planteado el calentador solar permite el calentamiento de ACS a la temperatura de confort de 60 °C y a la demanda necesaria en aproximadamente un día, sin embargo, las condiciones atmosféricas tienen gran impacto en la determinación del tiempo de calentamiento, así como del tiempo que el termotanque pueda mantener caliente el agua en su interior.

El calentador con el colector de espiral cónico llegaba a una eficiencia del 31%, luego de realizar los respectivos cambios para mejora se llegó a obtener una eficiencia del 37%, la temperatura máxima de salida del original era de 25 °C, al realizar los cambios se adquirió una temperatura de salida de 45 °C, esto durante los días de prueba.

El calentador está diseñado para solventar la necesidad de abastecer de ACS a la vivienda sustentable, por ello, para el planteamiento hipotético de instalarlo en una vivienda unifamiliar tiene como consecuencia la implementación de varios colectores y el aumento de la capacidad del volumen del termotanque.

Uno de los mayores beneficios de utilizar energías renovables, como es la energía solar, es el abandono de energías a base de combustibles fósiles, lo que favorece y aporta una disminución de las emisiones de CO₂ a la atmósfera, lo que si bien es pequeño si se compara a la contaminación actual, es un gran avance para solventar la crisis energética en el mundo, siendo así un enorme paso a la evolución de tecnologías futuras.

La toma de datos de temperatura y análisis de rendimiento son muy importantes a la hora de comprobar el correcto funcionamiento del calentador, datos que son variables en el tiempo por las condiciones del lugar, sin embargo, el estudio teórico se aproximó al real. De acuerdo a la comparativa de eficiencia realizada, el colector diseñado pese a su pequeña área es capaz de competir en eficiencia con el resto de colectores solares mencionados.

La metodología si bien está planteada para calentadores solares de placa plana es posible utilizarla en las condiciones de diseño del presente calentador prototipo, notándose la falta de una placa absorbidora y remplazo de tubos de cobre por una espiral de rollo de manguera, recopilando para el diseño la temperatura media de las mangueras y el flujo másico mediante estudios realizados por el autor de este trabajo.

8. Conclusiones

- La experimentación del funcionamiento del sistema de calefacción en espiral a diferentes condiciones permitió entender y desarrollar información que posteriormente impulsó, reformó y mejoró el prototipo, siendo de utilidad el método de prueba y error en el transcurso del tiempo.
- La excesiva inclinación entre espiras en el prototipo cónico sumado a la influencia del viento evitaba la recirculación de agua en el interior del termotanque, error que fue corregido mediante el diseño de una espiral plana y la implementación de una caja aislada térmicamente.
- La inclinación del colector a 14° con respecto a la horizontal y dispuesta en relación a la posición del sol permitió a su vez el efecto de termosifón en el interior de las mangueras, lo que hace innecesario el uso de una fuente de energía externa para impulsar el movimiento del agua.
- Al implementar el calentador en espiral del prototipo final se evidenció el correcto funcionamiento del mismo, dando como resultado la obtención de agua caliente sanitaria a la temperatura de confort de 60°C para la vivienda sustentable, contando así con un nuevo diseño.
- Al evaluar térmicamente el sistema de calefacción en espiral en la vivienda sustentable de la FEIRNNR se logró obtener un rendimiento teórico del 37.11% y un rendimiento real del 37%, mientras que en el prototipo original fue de 31% durante los días de prueba para estudio.

9. Recomendaciones

- Para un adecuado funcionamiento el calentador requiere mantenimiento y limpieza sobre la cubierta de vidrio, debido a que con el tiempo se llenará de polvo y se opacará.
- Reemplazar el termotanque por uno que posea menos deterioro en el paso del tiempo, con la finalidad de reducir gastos extras por mantenimiento correctivo periódico sobre el termotanque construido.
- Comparar el comportamiento térmico del calentador mediante el uso de software.
- Evaluar el comportamiento del colector para el caso en que se cuente con la capacidad de doblar las mangueras a diámetros pequeños y así situarse más al diseño planteado en el proceso de dibujo en 3D de SolidWorks.
- Realizar inspecciones rutinarias sobre el colector en horas de sol con calor muy intenso, con el fin de analizar el estado de las mangueras y proceder a realizar las debidas correcciones.

10. Bibliografía

- Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables [ARCERNNR]. (2022). *Análisis y Determinación del Costo del Servicio Público de Energía Eléctrica Periodo (Enero-Diciembre)*.
- Aguilar, C. W. R. (2012). *Auditoría Energética en el Hospital Julius Doepfner de la Ciudad de Zamora* [Universidad Nacional de Loja]. [https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/12244/1/Aguilar Romero%2C Cristhian Wilfrido.pdf](https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/12244/1/Aguilar_Romero%2C_Cristhian_Wilfrido.pdf)
- Ana Criado González. (2009). *Diseño de una instalación solar térmica multipropósito para un edificio de viviendas en Granada* [Universidad Carlos III de Madrid]. https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/7310/PFC_Ana_Criado_Gonzalez.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Bellos, E., Bousi, E., Tzivanidis, C., & Pavlovic, S. (2019). Optical and thermal analysis of different cavity receiver designs for solar dish concentrators. *Energy Conversion and Management: **, 2(May), 100013. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2019.100013>
- Bulnes, C. A., Best, R., & Bown. (2005). La Energía del Sol. *ConCiencia*, 14. <https://doi.org/10.14409/cc.v1i14.2184>
- Burbano, C., Carlos, J., Restrepo, ;, Hernán, Á., Sabogal, ;, & Julian, O. (2006). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CALENTADOR SOLAR DE AGUA OPERANDO POR TERMOSIFÓN. *Scientia Et Technica*, XII(31), 85–90. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84911639016>
- Cengel, Y. A. (2012). *Termodinámica* (Séptima Ed).
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones* (Cuarta Edición). <https://itscv.edu.ec/wp-content/uploads/2019/06/Transferencia-de-calor-y-masa.-Fundamentos-y-aplicaciones-Cuarta-Edición.pdf>
- Dean, W. R. (1927). XVI. Note on the motion of fluid in a curved pipe . *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 4(20), 208–223. <https://doi.org/10.1080/14786440708564324>

- Dean, W. R. (1928). LXXII. The stream-line motion of fluid in a curved pipe (Second paper) . *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 5(30), 673–695. <https://doi.org/10.1080/14786440408564513>
- DIPAC. (2022). *Plancha de acero inoxidable*. <https://dipacmanta.com/producto/inoxidable/planchas-2/planchas-inoxidable/>
- Duffie, J.A., & Beckman, W. . (2013). Estimation of Clear-Sky radiation. *Solar Engineering of Thermal Processes*, 68–71. <https://www.wiley.com/en-us/Solar+Engineering+of+Thermal+Processes%2C+4th+Edition-p-9780470873663>
- Duffie, John A., Beckman, W. A., & Blair, N. (2020). *Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind*. En *Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind* (Fifth Edit). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119540328>
- Ecoscore. (2022, noviembre 18). *¿Cómo calcular la emisión de CO2 del consumo de combustible?* <https://ecoscore.be/en/info/ecoscore/co2>
- Eficiencia Energética. (2019). *Circulación por Termosifón - Eficiencia Energética*. <https://certificacionenergetica.info/circulacion-por-termosifon/>
- Enciclopedia de Ejemplos. (2019). *Conducción, Convección y Radiación*. <https://www.ejemplos.co/10-ejemplos-de-conduccion-conveccion-y-radiacion/>
- EP PetroEcuador. (2022). *Precios de Venta en Terminal para las Comercializadoras Calificadas y Autorizadas a Nivel Nacional*. <https://www.eppetroecuador.ec/wp-content/uploads/downloads/2022/08/ESTRUCTURA-DE-PRECIOS-AGOSTO-2022.pdf>
- Gomafiltros. (2017). *Manguera de Polietileno*. Conducción de fluidos y transmisión de potencia. https://www.gomafiltros.com/productos/mangueras/gomafiltros/manguera_polietileno_riego
- Guevara Vásquez, S. (2003a). Diseño del sistema de calentamiento solar de agua. *Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente*.
- Guevara Vásquez, S. (2003b). *Teoría para el diseño de calentadores solares de agua*. Memoria Técnica, UNATSABAR – OPS/CEPIS, Lima.

- Guo, J., & Huai, *. (2016). Numerical investigation of helically coiled tube from the viewpoint of field synergy principle. *Applied Thermal Engineering*, 98, 137–143. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.12.012>
- Heredia, V., Tapia, J., Flores, C., Godoy, J. M., & Vergara Díaz, J. (2005). COLECTOR SOLAR CONSTRUIDO MEDIANTE TALADRADO POR FLUENCIA TÉRMICA. *Rev. Fac. Ing.-Univ. Tarapacá*, 13, 65–70.
- Hernández, ρ. J. (2014). *Radiación directa, difusa y reflejada*. <https://pedrojhernandez.com/2014/03/08/radiacion-directa-difusa-y-reflejada/>
- HG Ingeniería y Construcciones S.A.S. (2018). *Radiación Solar en Colombia*. <https://www.hgingeneria.com.co/radiacion-solar-en-colombia/>
- Hu, W., Song, M., Jiang, Y., Yao, Y., & Gao, Y. (2019). A modeling study on the heat storage and release characteristics of a phase change material based double-spiral coiled heat exchanger in an air source heat pump for defrosting. *Applied Energy*, 236, 877–892. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.057>
- INAMHI. (2015). *Anuario Meteorológico*. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. <https://docplayer.es/46147759-Anuario-meteorologico.html>
- Instituto Nacional de Estadísticos y Censo (INEC). (2018). *Fascículo provincial de Loja*. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/wp-content/descargas/Manu-lateral/Resultados-provinciales/loja.pdf>
- Kong, R., Deethayat, T., Asanakham, A., & Kiatsiriroat, T. (2018). Heat transfer phenomena on waste heat recovery of combustion stack gas with deionized water in helical coiled heat exchanger. *Case Studies in Thermal Engineering*, 12(April), 213–222. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.04.010>
- Larreta, C. A. (2015). “*Diseño y construcción de un calentador de agua solar, económico y asequible a la clase media-baja del Ecuador.*”
- Lorente, J. (2010). *Curso de fotoprotección*. <https://www.heliosfera.com/la-radiacion-solar/>
- MAGAP. (2013). *MEMORIA TÉCNICA CANTÓN LOJA PROYECTO: “GENERACIÓN DE*

*GEOINFORMACIÓN PARA LA GESTIÓN DEL TERRITORIO A NIVEL NACIONAL
ESCALA 1:25.000” CLIMA E HIDROLOGÍA.*

- Mariana González, S., Hernández, A., & Quiñonez, J. (2014). *Ensayo de un colector solar calentador de aire de doble paso con matriz porosa para el calentamiento de edificios*. 209(2), 8–203.
- Mariano, p. (2011, junio 1). *Polietileno de baja densidad*. Tecnología de los Plásticos. <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/polietileno-de-baja-densidad.html>
- Martínez, J. C., Franco, p., & Alonso, R. (2013). Manual Técnico de Energía Solar Térmica Volumen II: Aspectos Técnicos y Normativos. *Facultad de ingeniería, Universidad de la República*, 282.
- Mott, Robert I. (2015). *Mecánica de Fluidos* (Séptima).
- Nandwani, S. S. (2005). *Calentador solar de agua: Tipo circulación - construcción, funcionamiento y uso*. 506.
- NEC-HS-ER. (2020). Sistemas solares térmicos para agua caliente sanitaria (ACS) – Aplicaciones menores a 100 °C. En *Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda*.
- NEC - 11. (2011). Norma Ecuatoriana de Construcción: Capítulo 14 - Energías Renovables. En *Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda*.
- Nergetia. (2015). *¿Cómo funciona una instalación solar térmica?* – BLOGetia. <https://nergetia.com/Blogetia/?p=122>
- Ojeda, C. S., Hernández, O. H. Á., & Correa, J. M. (2017). Emisiones provocadas por combustión de GLP a partir de calefones en la ciudad de Loja y su posible relación con enfermedades respiratorias agudas (ERA's). *CEDAMAZ*, 6(1). <https://revistas.unl.edu.ec/index.php/cedamaz/article/view/62>
- Pacheco, p. B., & Juliá, E. J. (2006). Secado La Madera Calentamiento A Conducción Transitoria,. *Universidad de Oriente - Redalyc*. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445543749004>
- Palomo, M. C. (2017). *Aislantes Térmicos, Criterios de Selección por Requisitos Energéticos* [Universidad Politécnica de Madrid]. https://oa.upm.es/47071/1/TFG_Palomo_Cano_Mar

ta.pdf

- Peña, E. (2017). *Diseño y construcción de un colector solar de placa plana destinado a la obtención de agua caliente sanitaria para el laboratorio de energías renovables del AEIRNNR de la UNL.*
- Peña, H. (2018). *Diseño y construcción de un colector solar de placa plana destinado a la obtención de agua caliente sanitaria para el laboratorio de energías renovables del AEIRNNR de la UNL* [Universidad Nacional de Loja]. <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/handle/123456789/20391>
- PILESOL. (2019). *Calentador Solar Espiral para Piscinas.* https://pilesol.wixsite.com/iniciolesol_JM
- Planas, O. (2011). *¿Qué es la energía solar térmica? Tipos de instalaciones.* <https://solar-energia.net/energia-solar-termica>
- Prabhanjan, D. G., Raghavan, G. S. V., & Rennie, T. J. (2002). Comparison of heat transfer rates between a straight tube heat exchanger and a helically coiled heat exchanger. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 29(2), 185–191. [https://doi.org/10.1016/S0735-1933\(02\)00309-3](https://doi.org/10.1016/S0735-1933(02)00309-3)
- Riba, C. (2011). *Energía y Crisis.*
- SHIMADZU. (2016). Application News Glass Plate Analysis in Accordance with JIS R3106 Spectrophotometric Analysis. *Application News*, A404.
- Termasolar. (2011). *Tipos de calentadores solares, colectores de vacío.* <http://www.termasolar.com/2011/06/7-colectores-de-vacio.html>
- Vaca, D., Ordóñez, F., & Villada, J. (2019). Atlas Solar Ecuador. *Scinergy.* https://www.ingenieriaverde.org/wp-content/uploads/2020/01/Mapa_Solar_del_Ecuador_2019.pdf
- Valencia, M. (2018). *Proyectos de Energías Renovables No Convencionales.* http://historico.energia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/07/Invest_Energias-renovables-vf-PDF-28.03.2018.pdf

- Vargas, J. ρ. B., Yampasi, ρ. E., Tirado, *. V., & Patzi, A. (2016). Implementación de un sistema de calefacción solar térmico: Análisis energético y económico. *Centro de Investigaciones Ópticas y Energías(CIOE) Universidad Privada Boliviana*. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2518-44312016000100005
- Zheng, *., Xie, N., Chen, C., Gao, *., Huang, Z., & Zhang, Z. (2018). Numerical investigation on paraffin/expanded graphite composite phase change material based latent thermal energy storage system with double spiral coil tube. *Applied Thermal Engineering*, 137, 164–172. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.03.048>

11. Índice de anexos

Anexo 1. Temperatura promedio mensual de la ciudad de Loja – Provincia de Loja.

LA ARGELIA-LOJA		
Mes	Temperatura ambiente (°C)	Velocidad media del viento (m/s)
Enero	16.4	1.4
Febrero	16.1	1.4
Marzo	16.4	2.8
Abril	16.7	1.6
Mayo	16.2	2.7
Junio	15.8	3.7
Julio	15.6	5.5
Agosto	16.0	4.8
Septiembre	16.4	5.2
Octubre	16.8	1.9
Noviembre	17.2	1.5
Diciembre	16.6	2.4
Valor anual	16.4	3.0

(INAMHI, 2015).

Anexo 2. Demanda de agua unitaria diaria referencia (60°C).

Criterio de demanda	Litros/día persona
Vivienda unifamiliar	28
Hospitales y clínicas	55
Ambulatorio y centro de salud	41
Hotel *****	69
Hotel ****	55
Hotel ***	41
Hotel/hostal **	34
Camping	21
Hostal/pensión	28
Residencia multifamiliar	41
Centro penitenciario	28
Albergue	24
Vestuarios/Duchas colectivas	21
Escuela sin ducha	4
Escuela con ducha	21
Cuarteles	28
Fábricas y talleres	21
Oficinas	2
Gimnasios	21
Restaurantes	8
Cafeterías	1

(NEC-HS-ER, 2020).

Anexo 3. Valores de radiación global promedio en la FEIRNNR.

Radiación Solar Promedio (Wh/m ² UNL 2013 - 2015)												
Día / Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	2100	1580	2180	2560	2054	3960	3570	3720	2710	2370	3190	2180
2	2165	1930	2440	2620	2400	2970	3550	3450	3430	2930	3370	2210
3	2168	2240	2290	2646	2450	3100	3400	4020	3620	3010	2490	2570
4	2104	2190	2360	2660	2740	3360	4050	4120	3850	3100	3130	3082
5	2740	2220	2430	2420	3078	3350	3150	3940	2780	2450	3100	2690
6	1590	2370	2470	2700	2550	2880	3360	2030	3050	2900	2900	2750
7	1520	2393	2450	2538	3270	3480	3770	4220	4150	3370	2930	2621
8	2700	2350	1890	2460	2120	3745	3110	3430	3550	2770	2940	3220
9	2830	2230	1880	2380	2538	2640	2520	4510	2940	2570	2720	2550
10	2680	2260	2070	2147	3170	3250	2990	3940	3680	3740	2880	2441
11	2900	1980	2400	2310	2820	2660	3150	4420	2420	2808	3320	3040
12	2920	2100	2740	2528	2890	2830	4270	3110	3430	2490	3330	2930
13	2330	2160	2750	2436	3170	3560	3640	3250	4200	2730	2900	3320
14	2500	2010	2380	2614	3050	4851	3400	2790	2920	3020	2920	2660
15	2780	2300	2320	2610	2750	2802	3310	3790	3870	2690	3160	2910
16	2550	2110	2430	2630	2830	3210	3420	3660	4060	2340	2750	2660
17	2770	2260	2260	2350	2730	2881	2870	3730	3790	2530	3350	2950
18	1580	2290	2320	2566	2660	3320	2360	3720	3430	2900	2970	2870
19	2470	2310	2490	2640	2870	2620	3010	3540	3182	2760	2950	2740
20	2230	2080	2510	2528	2120	3281	3930	4150	3780	2380	2960	2410
21	2730	2180	2517	2090	2300	3485	3050	3620	3370	2350	2840	2650
22	2430	2140	2210	2210	2320	2962	4090	4940	3224	2670	2900	3064
23	2746	2130	2280	2330	2219	3361	2300	4720	3430	3088	2520	2640
24	2040	2060	2320	2434	2290	2900	3280	3250	3290	2790	2710	2630
25	2530	2150	2340	2110	2730	2840	3648	3580	3600	2710	2830	3078
26	2833	2070	2370	2175	2478	3396	3310	3420	3000	2980	2950	3090
27	2280	1360	2128	2570	2540	3440	3460	3067	3720	3120	2750	2300
28	2570	1495	2210	2230	2490	2640	2690	3520	3120	2968	2890	2320
29	2068		2380	2178	3220	2620	3100	4210	3950	2740	2800	2910
30	2130		2220	2240	2270	3310	3430	3350	3210	3000	2351	2200
31	2758		2140		3000		3330	3090		2560		2470
Suma	74742	58948	72175	72910	82117	95704	102518	114307	102756	86834	87801	84156
Máxima	2920	2393	2750	2700	3270	4851	4270	4940	4200	3740	3370	3320
Mínima	1520	1360	1880	2090	2054	2620	2300	2030	2420	2340	2351	2180
Promedio	2411	2105	2328	2430	2649	3190	3307	3687	3425	2801	2927	2715
Prom. Anual	2872											

(H. Peña, 2018)

Anexo 4. Temperatura promedio del agua del mes de enero, ciudad de Loja

País: Ecuador	Estación: La Argelia
Ciudad: Loja	Altitud: 2160 m.s.n.m.
Fecha	Temperatura del H₂O de red (°C)
9/1/2017	16.06
10/1/2017	16.05
11/1/2017	16.10
12/1/2017	15.97
13/1/2017	16.13
14/1/2017	16
15/1/2017	16.16
16/1/2017	16.10
17/1/2017	16.15
18/1/2017	16.16
19/1/2017	16.12
20/1/2017	16.6
21/1/2017	16.11
22/1/2017	16.09
23/1/2017	15.93
24/1/2017	16.03
25/1/2017	16
26/1/2017	16.04
27/1/2017	15.98
28/1/2017	16.07
29/1/2017	16.02
30/1/2017	16.07
31/1/2017	16.04
1/2/2017	16.04
2/2/2017	16.10
3/2/2017	16.06
4/2/2017	16.22
Promedio	16.09

(H. Peña, 2018).

Anexo 5. Propiedades físicas, térmicas y mecánicas de la manguera de polietileno.

<i>Propiedades Físicas</i>	
Absorción de Agua - en 24 horas (%k)	<0,015
Densidad (g cm-3)	0.92
Indice Refractivo	1.51
Indice de Oxígeno Límite (%k)	17
Inflamabilidad	Si
Resistencia a los Ultra-violetas	Aceptable
<i>Propiedades Térmicas</i>	
Calor Específico (J K ⁻¹ kg-1)	1900
Coefficiente de Expansión Térmica (x10 ⁻⁶ K ⁻¹)	100 - 200
Conductividad Térmica a 23 °C (W m ⁻¹ K ⁻¹)	0.33
Temperatura Máxima de Utilización (°C)	50-90
Temperatura Mínima de Utilización (°C)	-60
Temperatura de Deflección en Caliente - 0.45MPa (°C)	50
Temperatura de Deflección en Caliente - 1.8MPa (°C)	35
<i>Propiedades Mecánicas</i>	
Alargamiento a la Rotura (%k)	400
Dureza - Rockwell	041 - 46 - Shore
Módulo de Tracción (GPa)	0,1 - 0,3
Resistencia a la Tracción (MPa)	5 - 25
Resistencia al Impacto Izod (J m-1)	>1000

(Mariano, 2011).

Anexo 6. Tipos de manguera de polietileno del mercado

Medida	Código	Presión	Diámetro	Espesor	Presentación
1/2"	POL13K25	K25	13	1.2	ROLLOS X100 MTS
	POL13K4	K4		1.5	
	POL13K6	K6		2	
	POL13K10	K10		3.3	
3/4"	POL19K25	K25	19	1.2	ROLLOS X100 MTS
	POL19K4	K4		2.1	
	POL19K6	K6		2.6	
	POL19K10	K10		3.3	
1"	POL25K25	K25	25	2.2	ROLLOS X100 MTS
	POL25K4	K4		2.6	
	POL25K6	K6		3.4	
1" 1/4	POL32K25	K25	32	2	ROLLOS X100 MTS
	POL32K4	K4		2.8	
1" 1/2	POL38K25	K25	38	2	ROLLOS X100 MTS
	POL38K4	K4		3.2	
2"	POL50K25	K25	50	2.6	ROLLOS X100 MTS
	POL50K4	K4		4.4	
2" 1/2	POL63K25	K25	63	3.3	ROLLOS X50 MTS
	POL63K4	K4		5.5	
3"	POL75K25	K25	75	4	ROLLOS X50 MTS

(Gomafiltros, 2017).

Anexo 7. Dimensiones y especificaciones de la plancha de acero inoxidable.

Especificaciones Generales de la Plancha de acero inoxidable:

Norma: AISI 304

Espesores: desde 0.40-15mm

Dimensiones:

1220 x 2440mm (estándar)

1200 x otros largos (especial)

Descripción de acuerdo a la norma:

JIS: SUS 304

ASTM: 304

DIN: 4301

Descripción: Acero inoxidable aleado al cromo y níquel, muy resistente a la corrosión intergranular y a los ataques químicos del medio ambiente. Posee una buena resistencia a la corrosión del agua, ácidos y soluciones alcalina si se emplea con superficie pulida a espejo.

Se la puede encontrar con acabado ASTM 2B Y 1.

 **DESCARGAR** CATÁLOGO 



(DIPAC, 2022)

Anexo 8. Propiedades de la madera de contrachapado (Plywood)

Propiedades termo físicas de la madera					
Tipo	p	t	A.	Cp	a* 106
Contrachapada encolada (1)	600	o	0.15	2.51	0,1
Delta	-	35-70	0.21	-	-
Roble					
A través de la fibra	825	0-15	0,20-0,21	2.39	0.1
A lo largo de la fibra	819	15-50	0,35-0,43	2.39	0.2
Pino					
A través de la fibra	546	0-50	0,14-0,16	2.72	0.1
A lo largo de la fibra	-	20-25	0,35-0,72	2.72	0,2-0,4
Pino /2/					
Amarillo	-	-	0,12-0,15	2.8	-
De Virginia	550	30	0.138	2.8	0.1
Blanco	500	30	0.113	2.8	0,1
Pino /3/					
A través de la fibra	641	15	0, 175	-	0.1
A lo largo de la fibra	551	21	0.349	-	0.27
Varias especies	-	-	0,1-1,4	-	0.161
Pino 151					
Blanco Oriental (USA)	381"	30	0,10/0,18*	1,68**	0.157

(Pacheco & Juliá, 2006)

Anexo 9. Propiedades del poliestireno expandido (Espumaflex).

Origen sintético orgánico	
Material	Conductividad λ(W/m*K)
Poliestireno expandido	0.037
Poliestireno extruido	0.032
Poliuretano	0.028
Espuma fenólica	0.021
Espuma elastómera	0.035
Espuma de polietileno	0.035
Espuma de polipropileno	0.032
Espuma de melamina	0.035
Espuma de polisocianurato	0.022
Policarbonato celular	0.021

(Palomo, 2017)

Anexo 10. Propiedades de la cubierta de vidrio.

Table 3 Results for Opaque Glass Specimens

Sample	Visible		Solar			Normal
	Transmittance	Reflectance	Transmittance	Reflectance	Absorbance	Emittance
	τ_v [%]	ρ_v [%]	τ_e [%]	ρ_e [%]	α_e [%]	ϵ_n [%]
Transparent glass	91.25	4.41	89.52	5.08	5.40	87.39
Opaque glass 1	63.13	17.09	63.01	11.90	25.10	87.35
Opaque glass 2	53.79	13.88	37.86	8.57	53.57	87.44
Opaque glass 3	34.82	8.07	40.28	6.96	52.77	87.45

(SHIMADZU, 2016)

Anexo 11. Tablas de monitoreo para análisis del calentador solar en espiral

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA															
FACULTAD DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES															
INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA															
DATOS DE MONITOREO PARA ANÁLISIS DE EFICIENCIA DEL COLECTOR SOLAR EN ESPIRAL															
Nombre del proyecto: IMPLMETACIÓN, EXPERIMENTACIÓN Y EVALUACIÓN TÉRMICA DE UN CALENTADOR SOLAR DE AGUA EN ESPIRAL. PARA LA VIVIENDA SUSTENTABLE DE LA FACULTAD DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES															
Responsable: Daniel Alejandro Sáenz Sócola						Director: Ing. Thuesman Estuardo Montaña Peralta. Mg. Sc						Periodo de Monitoreo (hh/min)			
Sector: Loja Ecuador						Fecha: 10 de octubre de 2022						Inicio		Fin	
Observaciones: Colector Solar en Espiral (Área 0.8 metros cuadrados)												8:00:00		17:00:00	
Datos generales del sector						Datos base del monitoreo						Frecuencia de muestra (min)		10.00	
Altitud		Presión barométrica		Temperatura Promedio		Temp. Inicio		Temp. final		Masa o volumen de prueba (Litros)		15.2			
msnm		kPa Bar		°C		°C K		°C K							
2160.00		93.56 0.94		22.00		20.00 293.15		45.00 318.15							
Observaciones:															
N.	Fracción (min)	Hh/min	Temp_i °C	Temp (i+1) °C	ΔT °C o K	Rad_i watts/m²	Rad_(i+1) watts/m²	Δ(Rad) watts/m²	Ec_i J	Ec_(i+1) J	Δ(Ec) J	Ei watts	Es watts	Rend	Promedio Rend.
1	10.00	8:00	20	21	1.00	348.00	216.00	-132.00	231696.70	-231696.70	-463393.40	248.40	12.87	0.05	0.35
2	20.00	8:10	24	23	-1.00	216.00	405.00	189.00	-231696.70	-231696.70	0.00	440.40	-12.87	-0.03	
3	30.00	8:20	24	23	-1.00	405.00	696.00	291.00	-231696.70	695090.10	926786.80	550.80	-12.87	-0.02	
4	40.00	8:30	22	25	3.00	696.00	681.00	-15.00	695090.10	-231696.70	-926786.80	378.40	38.62	0.10	
5	50.00	8:40	29	28	-1.00	681.00	265.00	-416.00	-231696.70	-231696.70	0.00	292.80	-12.87	-0.04	
6	60.00	8:50	32	31	-1.00	265.00	467.00	202.00	-231696.70	0.00	231696.70	500.80	-12.87	-0.03	
7	70.00	9:00	29	29	0.00	467.00	785.00	318.00	0.00	463393.40	463393.40	609.60	0.00	0.00	
8	80.00	9:10	28	30	2.00	785.00	739.00	-46.00	463393.40	463393.40	0.00	605.60	25.74	0.04	
9	90.00	9:20	31	33	2.00	739.00	775.00	36.00	463393.40	0.00	-463393.40	564.00	25.74	0.05	
10	100.00	9:30	34	34	0.00	775.00	635.00	-140.00	0.00	-231696.70	-231696.70	409.60	0.00	0.00	
11	110.00	9:40	34	33	-1.00	635.00	389.00	-246.00	-231696.70	695090.10	926786.80	274.40	-12.87	-0.05	
12	120.00	9:50	35	38	3.00	389.00	297.00	-92.00	695090.10	695090.10	0.00	244.80	38.62	0.16	
13	130.00	10:00	35	38	3.00	297.00	315.00	18.00	695090.10	-1390180.19	-2085270.29	289.20	38.62	0.13	
14	140.00	10:10	35	29	-6.00	315.00	408.00	93.00	-1390180.19	463393.40	1853573.59	386.80	-77.23	-0.20	
15	150.00	10:20	29	31	2.00	408.00	559.00	151.00	463393.40	463393.40	0.00	465.20	25.74	0.06	

16	160.00	10:30	30	32	2.00	559.00	604.00	45.00	463393.40	1390180.19	926786.80	465.60	25.74	0.06
17	170.00	10:40	30	36	6.00	604.00	560.00	-44.00	1390180.19	2085270.29	695090.10	435.20	77.23	0.18
18	180.00	10:50	29	38	9.00	560.00	528.00	-32.00	2085270.29	2548663.69	463393.40	346.80	115.85	0.33
19	190.00	11:00	29	40	11.00	528.00	339.00	-189.00	2548663.69	2548663.69	0.00	291.20	141.59	0.49
20	200.00	11:10	32	43	11.00	339.00	389.00	50.00	2548663.69	1390180.19	-1158483.50	300.40	141.59	0.47
21	210.00	11:20	30	36	6.00	389.00	362.00	-27.00	1390180.19	1158483.50	-231696.70	467.60	77.23	0.17
22	220.00	11:30	28	33	5.00	362.00	807.00	445.00	1158483.50	1158483.50	0.00	438.80	64.36	0.15
23	230.00	11:40	27	32	5.00	807.00	290.00	-517.00	1158483.50	2780360.39	1621876.89	363.20	64.36	0.18
24	240.00	11:50	31	43	12.00	290.00	618.00	328.00	2780360.39	1390180.19	-1390180.19	402.80	154.46	0.38
25	250.00	12:00	29	35	6.00	618.00	389.00	-229.00	1390180.19	1853573.59	463393.40	454.40	77.23	0.17
26	260.00	12:10	27	35	8.00	389.00	747.00	358.00	1853573.59	2316966.99	463393.40	470.00	102.98	0.22
27	270.00	12:20	28	38	10.00	747.00	428.00	-319.00	2316966.99	3243753.79	926786.80	294.80	128.72	0.44
28	280.00	12:30	31	45	14.00	428.00	309.00	-119.00	3243753.79	2316966.99	-926786.80	240.80	180.21	0.75
29	290.00	12:40	29	39	10.00	309.00	293.00	-16.00	2316966.99	1390180.19	-926786.80	231.60	128.72	0.56
30	300.00	12:50	29	35	6.00	293.00	286.00	-7.00	1390180.19	1390180.19	0.00	188.00	77.23	0.41
31	310.00	13:00	27	33	6.00	286.00	184.00	-102.00	1390180.19	1621876.89	231696.70	136.00	77.23	0.57
32	320.00	13:10	27	34	7.00	184.00	156.00	-28.00	1621876.89	926786.80	-695090.10	141.20	90.10	0.64
33	330.00	13:20	27	31	4.00	156.00	197.00	41.00	926786.80	695090.10	-231696.70	163.20	51.49	0.32
34	340.00	13:30	27	30	3.00	197.00	211.00	14.00	695090.10	926786.80	231696.70	156.40	38.62	0.25
35	350.00	13:40	27	31	4.00	211.00	180.00	-31.00	926786.80	1390180.19	463393.40	205.20	51.49	0.25
36	360.00	13:50	27	33	6.00	180.00	333.00	153.00	1390180.19	926786.80	-463393.40	306.40	77.23	0.25
37	370.00	14:00	27	31	4.00	333.00	433.00	100.00	926786.80	1390180.19	463393.40	284.80	51.49	0.18
38	380.00	14:10	29	35	6.00	433.00	279.00	-154.00	1390180.19	1621876.89	231696.70	320.00	77.23	0.24
39	390.00	14:20	30	37	7.00	279.00	521.00	242.00	1621876.89	1390180.19	-231696.70	357.60	90.10	0.25
40	400.00	14:30	30	36	6.00	521.00	373.00	-148.00	1390180.19	2085270.29	695090.10	249.20	77.23	0.31
41	410.00	14:40	30	39	9.00	373.00	250.00	-123.00	2085270.29	2085270.29	0.00	156.80	115.85	0.74
42	420.00	14:50	30	39	9.00	250.00	142.00	-108.00	2085270.29	1390180.19	-695090.10	286.40	115.85	0.40
43	430.00	15:00	29	35	6.00	142.00	574.00	432.00	1390180.19	1158483.50	-231696.70	247.20	77.23	0.31
44	440.00	15:10	27	32	5.00	574.00	44.00	-530.00	1158483.50	3012057.09	1853573.59	31.60	64.36	2.04
45	450.00	15:20	27	40	13.00	44.00	35.00	-9.00	3012057.09	1158483.50	-1853573.59	52.40	167.34	3.19
46	460.00	15:30	28	33	5.00	35.00	96.00	61.00	1158483.50	1390180.19	231696.70	72.40	64.36	0.89
47	470.00	15:40	24	30	6.00	96.00	85.00	-11.00	1390180.19	1621876.89	231696.70	108.80	77.23	0.71

48	480.00	15:50	23	30	7.00	85.00	187.00	102.00	1621876.89	2085270.29	463393.40	147.20	90.10	0.61
49	490.00	16:00	21	30	9.00	187.00	181.00	-6.00	2085270.29	1853573.59	-231696.70	136.80	115.85	0.85
50	500.00	16:10	22	30	8.00	181.00	161.00	-20.00	1853573.59	1621876.89	-231696.70	143.60	102.98	0.72
51	510.00	16:20	23	30	7.00	161.00	198.00	37.00	1621876.89	1390180.19	-231696.70	201.20	90.10	0.45
52	520.00	16:30	23	29	6.00	198.00	305.00	107.00	1390180.19	1390180.19	0.00	188.00	77.23	0.41
53	530.00	16:40	24	30	6.00	305.00	165.00	-140.00	1390180.19	1853573.59	463393.40	114.40	77.23	0.68
54	540.00	16:50	25	33	8.00	165.00	121.00	-44.00	1853573.59	1853573.59	0.00	48.40	102.98	2.13
55	550.00	17:00	25	33	8.00	121.00		-121.00	1853573.59	0.00	-1853573.59	0.00	102.98	

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA															
FACULTAD DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES															
INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA															
DATOS DE MONITOREO PARA ANÁLISIS DE EFICIENCIA DEL COLECTOR SOLAR EN ESPIRAL															
Nombre del proyecto: IMPLMETACIÓN, EXPERIMENTACIÓN Y EVALUACIÓN TÉRMICA DE UN CALENTADOR SOLAR DE AGUA EN ESPIRAL. PARA LA VIVIENDA SUSTENTABLE DE LA FACULTAD DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES															
Responsable: Daniel Alejandro Sáenz Sócola					Director: Ing. Thuesman Estuardo Montaña Peralta. Mg. Sc					Periodo de monitoreo (hh/min)					
Sector: Loja Ecuador					Fecha: 11 de octubre de 2022					Inicio		Fin			
Observaciones: Colector Solar en Espiral (Área 0.8 metros cuadrados)										8:00:00		17:00:00			
Datos generales del sector					Datos base del monitoreo					Frecuencia de muestra (min)		10.00			
Altitud		Presión barométrica		Temperatura Promedio		Temp. Inicio		Temp. final		Masa o volumen de prueba (Litros)		15.2			
msnm		kPa Bar		°C		°C K		°C K							
2160.00		93.56 0.94		22.00		20.00 293.15		38.00 311.15							
Observaciones:															
N.	Fracción (min)	Hh/min	Temp_i	Temp (i+1)	ΔT	Rad_i	Rad_(i+1)	Δ(Rad)	Ec_i	Ec_(i+1)	Δ(Ec)	Ei	Es	Rend	Promedio
			°C	°C	°C o K	watts/m ²	watts/m ²	watts/m ²	J	J	J	watts	watts		Rend.
1	10.00	8:00	20	21	1.00	133.00	174.00	41.00	231696.70	-231696.70	-463393.40	152.00	14.48	0.10	0.29
2	20.00	8:10	24	23	-1.00	174.00	206.00	32.00	-231696.70	-231696.70	0.00	155.20	-14.48	-0.09	
3	30.00	8:20	24	23	-1.00	206.00	182.00	-24.00	-231696.70	695090.10	926786.80	184.00	-14.48	-0.08	
4	40.00	8:30	22	25	3.00	182.00	278.00	96.00	695090.10	-231696.70	-926786.80	204.40	43.44	0.21	
5	50.00	8:40	29	28	-1.00	278.00	233.00	-45.00	-231696.70	-231696.70	0.00	190.00	-14.48	-0.08	
6	60.00	8:50	32	31	-1.00	233.00	242.00	9.00	-231696.70	0.00	231696.70	200.40	-14.48	-0.07	
7	70.00	9:00	29	29	0.00	242.00	259.00	17.00	0.00	463393.40	463393.40	209.60	0.00	0.00	

8	80.00	9:10	28	30	2.00	259.00	265.00	6.00	463393.40	463393.40	0.00	213.20	28.96	0.14
9	90.00	9:20	31	33	2.00	265.00	268.00	3.00	463393.40	0.00	-463393.40	217.60	28.96	0.13
10	100.00	9:30	34	34	0.00	268.00	276.00	8.00	0.00	-231696.70	-231696.70	233.60	0.00	0.00
11	110.00	9:40	34	33	-1.00	276.00	308.00	32.00	-231696.70	695090.10	926786.80	346.40	-14.48	-0.04
12	120.00	9:50	35	38	3.00	308.00	558.00	250.00	695090.10	695090.10	0.00	559.20	43.44	0.08
13	130.00	10:00	35	38	3.00	558.00	840.00	282.00	695090.10	-1390180.19	-2085270.29	572.40	43.44	0.08
14	140.00	10:10	35	29	-6.00	840.00	591.00	-249.00	-1390180.19	463393.40	1853573.59	472.00	-86.89	-0.18
15	150.00	10:20	29	31	2.00	591.00	589.00	-2.00	463393.40	463393.40	0.00	540.40	28.96	0.05
16	160.00	10:30	30	32	2.00	589.00	762.00	173.00	463393.40	1390180.19	926786.80	448.00	28.96	0.06
17	170.00	10:40	30	36	6.00	762.00	358.00	-404.00	1390180.19	1853573.59	463393.40	302.80	86.89	0.29
18	180.00	10:50	30	38	8.00	358.00	399.00	41.00	1853573.59	926786.80	-926786.80	279.60	115.85	0.41
19	190.00	11:00	28	32	4.00	399.00	300.00	-99.00	926786.80	926786.80	0.00	214.80	57.92	0.27
20	200.00	11:10	28	32	4.00	300.00	237.00	-63.00	926786.80	1158483.50	231696.70	236.40	57.92	0.25
21	210.00	11:20	26	31	5.00	237.00	354.00	117.00	1158483.50	926786.80	-231696.70	293.20	72.41	0.25
22	220.00	11:30	26	30	4.00	354.00	379.00	25.00	926786.80	1390180.19	463393.40	318.40	57.92	0.18
23	230.00	11:40	26	32	6.00	379.00	417.00	38.00	1390180.19	1158483.50	-231696.70	386.40	86.89	0.22
24	240.00	11:50	28	33	5.00	417.00	549.00	132.00	1158483.50	1390180.19	231696.70	405.60	72.41	0.18
25	250.00	12:00	29	35	6.00	549.00	465.00	-84.00	1390180.19	1390180.19	0.00	355.20	86.89	0.24
26	260.00	12:10	29	35	6.00	465.00	423.00	-42.00	1390180.19	1390180.19	0.00	320.40	86.89	0.27
27	270.00	12:20	28	34	6.00	423.00	378.00	-45.00	1390180.19	1390180.19	0.00	324.40	86.89	0.27
28	280.00	12:30	28	34	6.00	378.00	433.00	55.00	1390180.19	695090.10	-695090.10	330.80	86.89	0.26
29	290.00	12:40	29	32	3.00	433.00	394.00	-39.00	695090.10	695090.10	0.00	262.00	43.44	0.17
30	300.00	12:50	29	32	3.00	394.00	261.00	-133.00	695090.10	231696.70	-463393.40	246.40	43.44	0.18
31	310.00	13:00	29	30	1.00	261.00	355.00	94.00	231696.70	695090.10	463393.40	265.20	14.48	0.05
32	320.00	13:10	27	30	3.00	355.00	308.00	-47.00	695090.10	695090.10	0.00	306.40	43.44	0.14
33	330.00	13:20	27	30	3.00	308.00	458.00	150.00	695090.10	695090.10	0.00	320.40	43.44	0.14
34	340.00	13:30	28	31	3.00	458.00	343.00	-115.00	695090.10	1158483.50	463393.40	276.80	43.44	0.16
35	350.00	13:40	27	32	5.00	343.00	349.00	6.00	1158483.50	463393.40	-695090.10	234.80	72.41	0.31
36	360.00	13:50	30	32	2.00	349.00	238.00	-111.00	463393.40	695090.10	231696.70	177.20	28.96	0.16
37	370.00	14:00	29	32	3.00	238.00	205.00	-33.00	695090.10	695090.10	0.00	265.20	43.44	0.16
38	380.00	14:10	28	31	3.00	205.00	458.00	253.00	695090.10	926786.80	231696.70	251.20	43.44	0.17
39	390.00	14:20	27	31	4.00	458.00	170.00	-288.00	926786.80	1158483.50	231696.70	114.80	57.92	0.50

40	400.00	14:30	28	33	5.00	170.00	117.00	-53.00	1158483.50	695090.10	-463393.40	94.00	72.41	0.77
41	410.00	14:40	28	31	3.00	117.00	118.00	1.00	695090.10	1158483.50	463393.40	82.80	43.44	0.52
42	420.00	14:50	26	31	5.00	118.00	89.00	-29.00	1158483.50	926786.80	-231696.70	77.60	72.41	0.93
43	430.00	15:00	26	30	4.00	89.00	105.00	16.00	926786.80	695090.10	-231696.70	87.20	57.92	0.66
44	440.00	15:10	26	29	3.00	105.00	113.00	8.00	695090.10	463393.40	-231696.70	92.80	43.44	0.47
45	450.00	15:20	26	28	2.00	113.00	119.00	6.00	463393.40	695090.10	231696.70	164.80	28.96	0.18
46	460.00	15:30	26	29	3.00	119.00	293.00	174.00	695090.10	695090.10	0.00	167.20	43.44	0.26
47	470.00	15:40	26	29	3.00	293.00	125.00	-168.00	695090.10	1158483.50	463393.40	105.20	43.44	0.41
48	480.00	15:50	26	31	5.00	125.00	138.00	13.00	1158483.50	926786.80	-231696.70	110.80	72.41	0.65
49	490.00	16:00	26	30	4.00	138.00	139.00	1.00	926786.80	926786.80	0.00	179.20	57.92	0.32
50	500.00	16:10	26	30	4.00	139.00	309.00	170.00	926786.80	926786.80	0.00	168.80	57.92	0.34
51	510.00	16:20	26	30	4.00	309.00	113.00	-196.00	926786.80	1158483.50	231696.70	72.40	57.92	0.80
52	520.00	16:30	27	32	5.00	113.00	68.00	-45.00	1158483.50	926786.80	-231696.70	46.00	72.41	1.57
53	530.00	16:40	27	31	4.00	68.00	47.00	-21.00	926786.80	695090.10	-231696.70	38.80	57.92	1.49
54	540.00	16:50	26	29	3.00	47.00	50.00	3.00	695090.10	695090.10	0.00	20.00	43.44	2.17
55	550.00	17:00	25	28	3.00	50.00		-50.00	695090.10	0.00	-695090.10			

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA															
FACULTAD DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES															
INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA															
DATOS DE MONITOREO PARA ANÁLISIS DE EFICIENCIA DEL COLECTOR SOLAR EN ESPIRAL															
Nombre del proyecto: IMPLMETACIÓN, EXPERIMENTACIÓN Y EVALUACIÓN TÉRMICA DE UN CALENTADOR SOLAR DE AGUA EN ESPIRAL. PARA LA VIVIENDA SUSTENTABLE DE LA FACULTAD DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES															
Responsable: Daniel Alejandro Sáenz Sócola						Director: Ing. Thuesman Estuardo Montaña Peralta. Mg. Sc						Periodo de Monitoreo (hh/min)			
Sector: Loja Ecuador						Fecha: 12 de octubre de 2022						Inicio		Fin	
Observaciones: Colector Solar en Espiral (Área 0.8 metros cuadrados)												8:00:00		17:00:00	
Datos generales del sector						Datos base del monitoreo						Frecuencia de muestra (min)		10.00	
Altitud		Presión barométrica		Temperatura Promedio		Temp. Inicio		Temp. final							
msnm		kPa	Bar	°C		°C	K	°C	K	Masa o volumen de prueba (Litros)		15.2			
2160.00		93.56	0.94	22.00		6.00	279.15	67.00	340.15						
Observaciones:															
N.	Fracción (min)	Hh/min	Temp_i	Temp (i+1)	ΔT	Rad_i	Rad_(i+1)	Δ(Rad)	Ec_i	Ec_(i+1)	Δ(Ec)	Ei	Es	Rend	Promedio

			°C	°C	°C o K	watts/m ²	watts/m ²	watts/m ²	J	J	J	watts	watts		Rend.
1	10.00	8:00	6	10	4.00	380	420	40.00	926786.80	1158483.50	231696.70	342.00	154.46	0.45	0.40
2	20.00	8:10	7	12	5.00	420	435	15.00	1158483.50	695090.10	-463393.40	378.40	193.08	0.51	
3	30.00	8:20	11	14	3.00	435	511	76.00	695090.10	695090.10	0.00	425.20	115.85	0.27	
4	40.00	8:30	13	16	3.00	511	552	41.00	695090.10	231696.70	-463393.40	457.20	115.85	0.25	
5	50.00	8:40	16	17	1.00	552	591	39.00	231696.70	-231696.70	-463393.40	490.40	38.62	0.08	
6	60.00	8:50	19	18	-1.00	591	635	44.00	-231696.70	-1390180.19	-1158483.50	523.20	-38.62	-0.07	
7	70.00	9:00	28	22	-6.00	635	673	38.00	-1390180.19	-1853573.59	-463393.40	553.20	-231.70	-0.42	
8	80.00	9:10	30	22	-8.00	673	710	37.00	-1853573.59	-2085270.29	-231696.70	584.00	-308.93	-0.53	
9	90.00	9:20	32	23	-9.00	710	750	40.00	-2085270.29	-2316966.99	-231696.70	614.40	-347.55	-0.57	
10	100.00	9:30	34	24	-10.00	750	786	36.00	-2316966.99	-2548663.69	-231696.70	640.80	-386.16	-0.60	
11	110.00	9:40	35	24	-11.00	786	816	30.00	-2548663.69	-2780360.39	-231696.70	667.60	-424.78	-0.64	
12	120.00	9:50	37	25	-12.00	816	853	37.00	-2780360.39	-1390180.19	1390180.19	691.60	-463.39	-0.67	
13	130.00	10:00	38	32	-6.00	853	876	23.00	-1390180.19	0.00	1390180.19	708.00	-231.70	-0.33	
14	140.00	10:10	37	37	0.00	876	894	18.00	0.00	1390180.19	1390180.19	724.40	0.00	0.00	
15	150.00	10:20	34	40	6.00	894	917	23.00	1390180.19	2316966.99	926786.80	742.80	231.70	0.31	
16	160.00	10:30	28	38	10.00	917	940	23.00	2316966.99	3243753.79	926786.80	760.00	386.16	0.51	
17	170.00	10:40	26	40	14.00	940	960	20.00	3243753.79	2780360.39	-463393.40	774.40	540.63	0.70	
18	180.00	10:50	30	42	12.00	960	976	16.00	2780360.39	695090.10	-2085270.29	788.00	463.39	0.59	
19	190.00	11:00	40	43	3.00	976	994	18.00	695090.10	231696.70	-463393.40	801.20	115.85	0.14	
20	200.00	11:10	46	47	1.00	994	1009	15.00	231696.70	-926786.80	-1158483.50	812.00	38.62	0.05	
21	210.00	11:20	46	42	-4.00	1009	1021	12.00	-926786.80	1621876.89	2548663.69	820.00	-154.46	-0.19	
22	220.00	11:30	45	52	7.00	1021	1029	8.00	1621876.89	-231696.70	-1853573.59	826.00	270.31	0.33	
23	230.00	11:40	44	43	-1.00	1029	1036	7.00	-231696.70	2780360.39	3012057.09	828.00	-38.62	-0.05	
24	240.00	11:50	41	53	12.00	1036	1034	-2.00	2780360.39	3707147.18	926786.80	828.40	463.39	0.56	
25	250.00	12:00	41	57	16.00	1034	1037	3.00	3707147.18	2085270.29	-1621876.89	830.40	617.86	0.74	
26	260.00	12:10	47	56	9.00	1037	1039	2.00	2085270.29	4170540.58	2085270.29	829.20	347.55	0.42	
27	270.00	12:20	42	60	18.00	1039	1034	-5.00	4170540.58	4865630.68	695090.10	827.20	695.09	0.84	
28	280.00	12:30	41	62	21.00	1034	1034	0.00	4865630.68	1621876.89	-3243753.79	824.00	810.94	0.98	
29	290.00	12:40	56	63	7.00	1034	1026	-8.00	1621876.89	1390180.19	-231696.70	816.00	270.31	0.33	
30	300.00	12:50	48	54	6.00	1026	1014	-12.00	1390180.19	3707147.18	2316966.99	809.20	231.70	0.29	

31	310.00	13:00	51	67	16.00	1014	1009	-5.00	3707147.18	695090.10	-3012057.09	793.60	617.86	0.78
32	320.00	13:10	49	52	3.00	1009	975	-34.00	695090.10	-231696.70	-926786.80	782.00	115.85	0.15
33	330.00	13:20	43	42	-1.00	975	980	5.00	-231696.70	695090.10	926786.80	771.60	-38.62	-0.05
34	340.00	13:30	39	42	3.00	980	949	-31.00	695090.10	1621876.89	926786.80	757.20	115.85	0.15
35	350.00	13:40	39	46	7.00	949	944	-5.00	1621876.89	1390180.19	-231696.70	747.20	270.31	0.36
36	360.00	13:50	36	42	6.00	944	924	-20.00	1390180.19	0.00	-1390180.19	730.40	231.70	0.32
37	370.00	14:00	38	38	0.00	924	902	-22.00	0.00	-695090.10	-695090.10	705.60	0.00	0.00
38	380.00	14:10	33	30	-3.00	902	862	-40.00	-695090.10	-463393.40	231696.70	668.40	-115.85	-0.17
39	390.00	14:20	28	26	-2.00	862	809	-53.00	-463393.40	-231696.70	231696.70	642.80	-77.23	-0.12
40	400.00	14:30	29	28	-1.00	809	798	-11.00	-231696.70	-2548663.69	-2316966.99	623.20	-38.62	-0.06
41	410.00	14:40	42	31	-11.00	798	760	-38.00	-2548663.69	-2316966.99	231696.70	596.80	-424.78	-0.71
42	420.00	14:50	43	33	-10.00	760	732	-28.00	-2316966.99	-2780360.39	-463393.40	570.40	-386.16	-0.68
43	430.00	15:00	55	43	-12.00	732	694	-38.00	-2780360.39	-1158483.50	1621876.89	512.40	-463.39	-0.90
44	440.00	15:10	45	40	-5.00	694	587	-107.00	-1158483.50	-2316966.99	-1158483.50	470.40	-193.08	-0.41
45	450.00	15:20	41	31	-10.00	587	589	2.00	-2316966.99	-3012057.09	-695090.10	462.80	-386.16	-0.83
46	460.00	15:30	40	27	-13.00	589	568	-21.00	-3012057.09	-3012057.09	0.00	437.20	-502.01	-1.15
47	470.00	15:40	41	28	-13.00	568	525	-43.00	-3012057.09	-1158483.50	1853573.59	405.60	-502.01	-1.24
48	480.00	15:50	37	32	-5.00	525	489	-36.00	-1158483.50	-1621876.89	-463393.40	373.20	-193.08	-0.52
49	490.00	16:00	38	31	-7.00	489	444	-45.00	-1621876.89	-1621876.89	0.00	336.40	-270.31	-0.80
50	500.00	16:10	38	31	-7.00	444	397	-47.00	-1621876.89	-1158483.50	463393.40	298.80	-270.31	-0.90
51	510.00	16:20	36	31	-5.00	397	350	-47.00	-1158483.50	-1158483.50	0.00	261.60	-193.08	-0.74
52	520.00	16:30	36	31	-5.00	350	304	-46.00	-1158483.50	-463393.40	695090.10	149.20	-193.08	-1.29
53	530.00	16:40	35	33	-2.00	304	69	-235.00	-463393.40	-695090.10	-231696.70	51.20	-77.23	-1.51
54	540.00	16:50	34	31	-3.00	69	59	-10.00	-695090.10	-231696.70	463393.40	23.60	-115.85	-4.91
55	550.00	17:00	32	31	-1.00	59		-59.00	-231696.70	0.00	231696.70			

FACULTAD DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES

INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

DATOS DE MONITOREO PARA ANÁLISIS DE EFICIENCIA DEL COLECTOR SOLAR EN ESPIRAL

Nombre del proyecto: IMPLMETACIÓN, EXPERIMENTACIÓN Y EVALUACIÓN TÉRMICA DE UN CALENTADOR SOLAR DE AGUA EN ESPIRAL. PARA LA VIVIENDA SUSTENTABLE DE LA FACULTAD DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES

Responsable: Daniel Alejandro Sáenz Sócola

Director: Ing. Thuesman Estuardo Montaña Peralta.
Mg. Sc

Periodo de Monitoreo (hh/min)

Sector: Loja Ecuador

Fecha: 13 de octubre de 2022

Inicio

Fin

Observaciones: Colector Solar en Espiral (Área 0.8 metros cuadrados)

8:00:00

17:00:00

Datos generales del sector

Datos base del monitoreo

Altitud	Presión barométrica		Temperatura Promedio	Temp. Inicio		Temp. final		Frecuencia de muestra (min)	Masa o volumen de prueba (Litros)
	msnm	kPa	Bar	°C	°C	K	K		
2160.00	93.56	0.94	22.00	7.00	293.15	69.00	342.15	10.00	15.2

Observaciones:

N.	Fracción (min)	Hh/min	Temp_i	Temp (i+1)	ΔT	Rad_i	Rad_(i+1)	Δ(Rad)	Ec_i	Ec_(i+1)	Δ(Ec)	Ei	Es	Rend	Promedio Rend.
			°C	°C	°C o K	watts/m ²	watts/m ²	watts/m ²	J	J	J	watts	watts		
1	10.00	8:00	7	11	4.00	396	437	41.00	926786.80	1621876.89	695090.10	367.20	154.46	0.42	0.41
2	20.00	8:10	6	13	7.00	437	481	44.00	1621876.89	1853573.59	231696.70	401.60	270.31	0.67	
3	30.00	8:20	7	15	8.00	481	523	42.00	1853573.59	1621876.89	-231696.70	435.20	308.93	0.71	
4	40.00	8:30	10	17	7.00	523	565	42.00	1621876.89	695090.10	-926786.80	468.40	270.31	0.58	
5	50.00	8:40	17	20	3.00	565	606	41.00	695090.10	0.00	-695090.10	502.80	115.85	0.23	
6	60.00	8:50	20	20	0.00	606	651	45.00	0.00	-463393.40	-463393.40	542.40	0.00	0.00	
7	70.00	9:00	24	22	-2.00	651	705	54.00	-463393.40	-1853573.59	-1390180.19	576.40	-77.23	-0.13	
8	80.00	9:10	31	23	-8.00	705	736	31.00	-1853573.59	-1853573.59	0.00	600.40	-308.93	-0.51	
9	90.00	9:20	31	23	-8.00	736	765	29.00	-1853573.59	-1621876.89	231696.70	624.00	-308.93	-0.50	
10	100.00	9:30	34	27	-7.00	765	795	30.00	-1621876.89	-695090.10	926786.80	653.60	-270.31	-0.41	
11	110.00	9:40	36	33	-3.00	795	839	44.00	-695090.10	-926786.80	-231696.70	679.60	-115.85	-0.17	
12	120.00	9:50	38	34	-4.00	839	860	21.00	-926786.80	695090.10	1621876.89	698.40	-154.46	-0.22	
13	130.00	10:00	39	42	3.00	860	886	26.00	695090.10	1621876.89	926786.80	720.80	115.85	0.16	
14	140.00	10:10	39	46	7.00	886	916	30.00	1621876.89	2548663.69	926786.80	739.60	270.31	0.37	
15	150.00	10:20	38	49	11.00	916	933	17.00	2548663.69	2780360.39	231696.70	757.20	424.78	0.56	
16	160.00	10:30	34	46	12.00	933	960	27.00	2780360.39	1853573.59	-926786.80	750.40	463.39	0.62	
17	170.00	10:40	36	44	8.00	960	916	-44.00	1853573.59	926786.80	-926786.80	756.80	308.93	0.41	
18	180.00	10:50	41	45	4.00	916	976	60.00	926786.80	1390180.19	463393.40	663.20	154.46	0.23	

19	190.00	11:00	45	51	6.00	976	682	-294.00	1390180.19	1158483.50	-231696.70	658.80	231.70	0.35
20	200.00	11:10	51	56	5.00	682	965	283.00	1158483.50	695090.10	-463393.40	735.60	193.08	0.26
21	210.00	11:20	52	55	3.00	965	874	-91.00	695090.10	1853573.59	1158483.50	719.60	115.85	0.16
22	220.00	11:30	55	63	8.00	874	925	51.00	1853573.59	1390180.19	-463393.40	790.00	308.93	0.39
23	230.00	11:40	52	58	6.00	925	1050	125.00	1390180.19	926786.80	-463393.40	740.40	231.70	0.31
24	240.00	11:50	54	58	4.00	1050	801	-249.00	926786.80	3012057.09	2085270.29	667.20	154.46	0.23
25	250.00	12:00	56	69	13.00	801	867	66.00	3012057.09	-463393.40	-3475450.49	772.00	502.01	0.65
26	260.00	12:10	52	50	-2.00	867	1063	196.00	-463393.40	-926786.80	-463393.40	851.60	-77.23	-0.09
27	270.00	12:20	49	45	-4.00	1063	1066	3.00	-926786.80	3938843.88	4865630.68	851.20	-154.46	-0.18
28	280.00	12:30	52	69	17.00	1066	1062	-4.00	3938843.88	3243753.79	-695090.10	810.80	656.47	0.81
29	290.00	12:40	54	68	14.00	1062	965	-97.00	3243753.79	2780360.39	-463393.40	837.20	540.63	0.65
30	300.00	12:50	56	68	12.00	965	1128	163.00	2780360.39	2780360.39	0.00	888.40	463.39	0.52
31	310.00	13:00	48	60	12.00	1128	1093	-35.00	2780360.39	1853573.59	-926786.80	721.20	463.39	0.64
32	320.00	13:10	59	67	8.00	1093	710	-383.00	1853573.59	1853573.59	0.00	462.80	308.93	0.67
33	330.00	13:20	55	63	8.00	710	447	-263.00	1853573.59	-2085270.29	-3938843.88	584.80	308.93	0.53
34	340.00	13:30	36	27	-9.00	447	1015	568.00	-2085270.29	-2085270.29	0.00	809.20	-347.55	-0.43
35	350.00	13:40	38	29	-9.00	1015	1008	-7.00	-2085270.29	-3012057.09	-926786.80	733.20	-347.55	-0.47
36	360.00	13:50	49	36	-13.00	1008	825	-183.00	-3012057.09	-463393.40	2548663.69	725.60	-502.01	-0.69
37	370.00	14:00	56	54	-2.00	825	989	164.00	-463393.40	695090.10	1158483.50	704.80	-77.23	-0.11
38	380.00	14:10	54	57	3.00	989	773	-216.00	695090.10	-231696.70	-926786.80	652.40	115.85	0.18
39	390.00	14:20	52	51	-1.00	773	858	85.00	-231696.70	695090.10	926786.80	669.60	-38.62	-0.06
40	400.00	14:30	34	37	3.00	858	816	-42.00	695090.10	0.00	-695090.10	652.40	115.85	0.18
41	410.00	14:40	41	41	0.00	816	815	-1.00	0.00	-1621876.89	-1621876.89	631.20	0.00	0.00
42	420.00	14:50	58	51	-7.00	815	763	-52.00	-1621876.89	-231696.70	1390180.19	586.80	-270.31	-0.46
43	430.00	15:00	60	59	-1.00	763	704	-59.00	-231696.70	695090.10	926786.80	550.80	-38.62	-0.07
44	440.00	15:10	53	56	3.00	704	673	-31.00	695090.10	-695090.10	-1390180.19	513.20	115.85	0.23
45	450.00	15:20	46	43	-3.00	673	610	-63.00	-695090.10	-926786.80	-231696.70	482.80	-115.85	-0.24
46	460.00	15:30	43	39	-4.00	610	597	-13.00	-926786.80	-695090.10	231696.70	458.40	-154.46	-0.34
47	470.00	15:40	38	35	-3.00	597	549	-48.00	-695090.10	-926786.80	-231696.70	420.80	-115.85	-0.28
48	480.00	15:50	36	32	-4.00	549	503	-46.00	-926786.80	-695090.10	231696.70	387.60	-154.46	-0.40
49	490.00	16:00	34	31	-3.00	503	466	-37.00	-695090.10	231696.70	926786.80	356.40	-115.85	-0.33

50	500.00	16:10	32	33	1.00	466	425	-41.00	231696.70	-463393.40	-695090.10	352.00	38.62	0.11
51	510.00	16:20	33	31	-2.00	425	455	30.00	-463393.40	-926786.80	-463393.40	343.20	-77.23	-0.23
52	520.00	16:30	35	31	-4.00	455	403	-52.00	-926786.80	-231696.70	695090.10	201.60	-154.46	-0.77
53	530.00	16:40	35	34	-1.00	403	101	-302.00	-231696.70	-231696.70	0.00	68.40	-38.62	-0.56
54	540.00	16:50	34	33	-1.00	101	70	-31.00	-231696.70	-695090.10	-463393.40	28.00	-38.62	-1.38
55	550.00	17:00	33	30	-3.00	70		-70.00	-695090.10	0.00	695090.10			

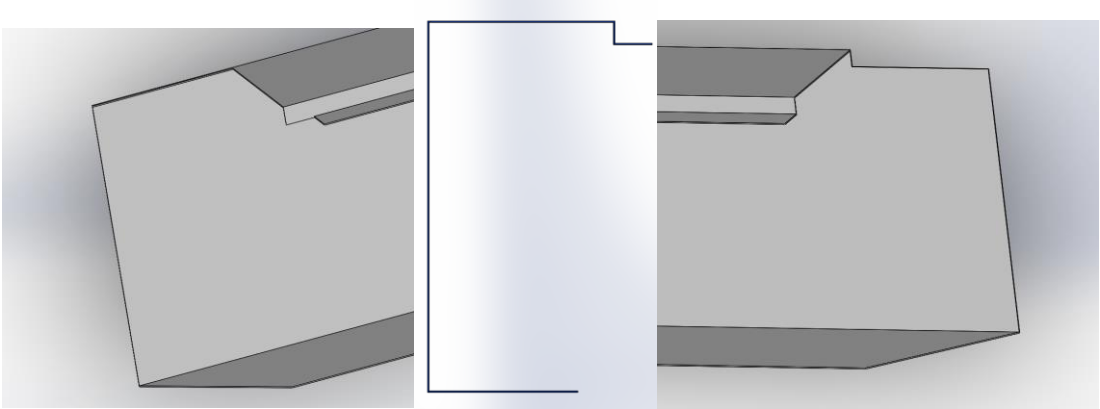
FACULTAD DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES															
INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA															
DATOS DE MONITOREO PARA ANÁLISIS DE EFICIENCIA DEL COLECTOR SOLAR EN ESPIRAL															
Nombre del proyecto: IMPLMETACIÓN, EXPERIMENTACIÓN Y EVALUACIÓN TÉRMICA DE UN CALENTADOR SOLAR DE AGUA EN ESPIRAL. PARA LA VIVIENDA SUSTENTABLE DE LA FACULTAD DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES															
Responsable: Daniel Alejandro Sáenz Sócola					Director: Ing. Thuesman Estuardo Montaña Peralta. Mg. Sc					Periodo de Monitoreo (hh/min)					
Sector: Loja Ecuador					Fecha: 14 de octubre de 2022					Inicio		Fin			
Observaciones: Colector Solar en Espiral (Área 0.8 metros cuadrados)										8:00:00		17:00:00			
Datos generales del sector					Datos base del monitoreo					Frecuencia de muestra (min)		10.00			
Altitud		Presión barométrica		Temperatura Promedio		Temp. Inicio		Temp. final		Masa o volumen de prueba (Litros)		15.2			
msnm		kPa	Bar	°C		°C	K	°C	K						
2160.00		93.56	0.94	22.00		20.00	293.15	45.00	318.15						
Observaciones:															
N.	Fracción (min)	Hh/min	Temp_i	Temp (i+1)	ΔT	Rad_i	Rad_(i+1)	Δ(Rad)	Ec_i	Ec_(i+1)	Δ(Ec)	Ei	Es	Rend	Promedio
			°C	°C	°C o K	watts/m ²	watts/m ²	watts/m ²	J	J	J	watts	watts		Rend.
1	10.00	8:00	19	20	1.00	32	33	1.00	231696.70	231696.70	0.00	59.20	25.74	0.43	0.26
2	20.00	8:10	19	20	1.00	33	115	82.00	231696.70	463393.40	231696.70	146.40	25.74	0.18	
3	30.00	8:20	18	20	2.00	115	251	136.00	463393.40	695090.10	231696.70	217.20	51.49	0.24	
4	40.00	8:30	17	20	3.00	251	292	41.00	695090.10	463393.40	-231696.70	226.00	77.23	0.34	
5	50.00	8:40	19	21	2.00	292	273	-19.00	463393.40	695090.10	231696.70	142.40	51.49	0.36	
6	60.00	8:50	19	22	3.00	273	83	-190.00	695090.10	231696.70	-463393.40	141.60	77.23	0.55	
7	70.00	9:00	22	23	1.00	83	271	188.00	231696.70	463393.40	231696.70	264.80	25.74	0.10	
8	80.00	9:10	21	23	2.00	271	391	120.00	463393.40	695090.10	231696.70	326.00	51.49	0.16	
9	90.00	9:20	21	24	3.00	391	424	33.00	695090.10	231696.70	-463393.40	448.40	77.23	0.17	
10	100.00	9:30	23	24	1.00	424	697	273.00	231696.70	0.00	-231696.70	509.20	25.74	0.05	

11	110.00	9:40	27	27	0.00	697	576	-121.00	0.00	463393.40	463393.40	332.40	0.00	0.00
12	120.00	9:50	27	29	2.00	576	255	-321.00	463393.40	463393.40	0.00	210.00	51.49	0.25
13	130.00	10:00	29	31	2.00	255	270	15.00	463393.40	0.00	-463393.40	228.00	51.49	0.23
14	140.00	10:10	29	29	0.00	270	300	30.00	0.00	231696.70	231696.70	271.20	0.00	0.00
15	150.00	10:20	28	29	1.00	300	378	78.00	231696.70	695090.10	463393.40	270.40	25.74	0.10
16	160.00	10:30	27	30	3.00	378	298	-80.00	695090.10	463393.40	-231696.70	211.60	77.23	0.36
17	170.00	10:40	29	31	2.00	298	231	-67.00	463393.40	463393.40	0.00	164.00	51.49	0.31
18	180.00	10:50	29	31	2.00	231	179	-52.00	463393.40	463393.40	0.00	122.80	51.49	0.42
19	190.00	11:00	28	30	2.00	179	128	-51.00	463393.40	463393.40	0.00	102.80	51.49	0.50
20	200.00	11:10	28	30	2.00	128	129	1.00	463393.40	463393.40	0.00	157.20	51.49	0.33
21	210.00	11:20	27	29	2.00	129	264	135.00	463393.40	463393.40	0.00	244.40	51.49	0.21
22	220.00	11:30	27	29	2.00	264	347	83.00	463393.40	463393.40	0.00	218.40	51.49	0.24
23	230.00	11:40	28	30	2.00	347	199	-148.00	463393.40	695090.10	231696.70	330.80	51.49	0.16
24	240.00	11:50	28	31	3.00	199	628	429.00	695090.10	463393.40	-231696.70	427.20	77.23	0.18
25	250.00	12:00	29	31	2.00	628	440	-188.00	463393.40	463393.40	0.00	393.60	51.49	0.13
26	260.00	12:10	32	34	2.00	440	544	104.00	463393.40	463393.40	0.00	572.80	51.49	0.09
27	270.00	12:20	34	36	2.00	544	888	344.00	463393.40	231696.70	-231696.70	580.00	51.49	0.09
28	280.00	12:30	36	37	1.00	888	562	-326.00	231696.70	231696.70	0.00	419.20	25.74	0.06
29	290.00	12:40	41	42	1.00	562	486	-76.00	231696.70	0.00	-231696.70	368.00	25.74	0.07
30	300.00	12:50	43	43	0.00	486	434	-52.00	0.00	-231696.70	-231696.70	489.20	0.00	0.00
31	310.00	13:00	41	40	-1.00	434	789	355.00	-231696.70	231696.70	463393.40	620.00	-25.74	-0.04
32	320.00	13:10	40	41	1.00	789	761	-28.00	231696.70	1158483.50	926786.80	658.80	25.74	0.04
33	330.00	13:20	43	48	5.00	761	886	125.00	1158483.50	926786.80	-231696.70	508.00	128.72	0.25
34	340.00	13:30	44	48	4.00	886	384	-502.00	926786.80	1853573.59	926786.80	287.20	102.98	0.36
35	350.00	13:40	48	56	8.00	384	334	-50.00	1853573.59	0.00	-1853573.59	415.60	205.95	0.50
36	360.00	13:50	37	37	0.00	334	705	371.00	0.00	231696.70	231696.70	486.00	0.00	0.00
37	370.00	14:00	36	37	1.00	705	510	-195.00	231696.70	1390180.19	1158483.50	312.40	25.74	0.08
38	380.00	14:10	42	48	6.00	510	271	-239.00	1390180.19	926786.80	-463393.40	270.80	154.46	0.57
39	390.00	14:20	44	48	4.00	271	406	135.00	926786.80	231696.70	-695090.10	365.20	102.98	0.28
40	400.00	14:30	39	40	1.00	406	507	101.00	231696.70	695090.10	463393.40	328.40	25.74	0.08
41	410.00	14:40	37	40	3.00	507	314	-193.00	695090.10	695090.10	0.00	263.60	77.23	0.29

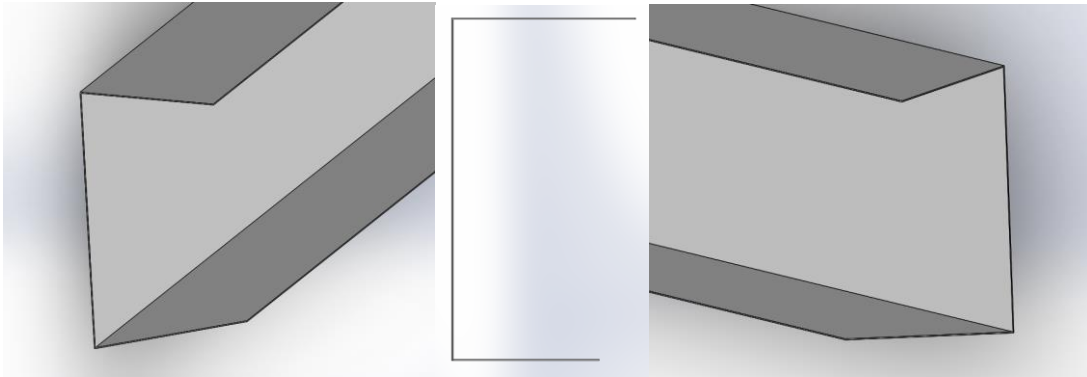
42	420.00	14:50	39	42	3.00	314	345	31.00	695090.10	695090.10	0.00	271.20	77.23	0.28
43	430.00	15:00	38	41	3.00	345	333	-12.00	695090.10	695090.10	0.00	334.40	77.23	0.23
44	440.00	15:10	38	41	3.00	333	503	170.00	695090.10	695090.10	0.00	406.40	77.23	0.19
45	450.00	15:20	37	40	3.00	503	513	10.00	695090.10	695090.10	0.00	284.80	77.23	0.27
46	460.00	15:30	39	42	3.00	513	199	-314.00	695090.10	695090.10	0.00	135.20	77.23	0.57
47	470.00	15:40	41	44	3.00	199	139	-60.00	695090.10	695090.10	0.00	119.60	77.23	0.65
48	480.00	15:50	37	40	3.00	139	160	21.00	695090.10	926786.80	231696.70	115.60	77.23	0.67
49	490.00	16:00	34	38	4.00	160	129	-31.00	926786.80	926786.80	0.00	108.80	102.98	0.95
50	500.00	16:10	32	36	4.00	129	143	14.00	926786.80	1390180.19	463393.40	76.00	102.98	1.35
51	510.00	16:20	31	37	6.00	143	47	-96.00	1390180.19	1158483.50	-231696.70	26.40	154.46	5.85
52	520.00	16:30	31	36	5.00	47	19	-28.00	1158483.50	463393.40	-695090.10	17.60	128.72	7.31
53	530.00	16:40	31	33	2.00	19	25	6.00	463393.40	926786.80	463393.40	14.40	51.49	3.58
54	540.00	16:50	28	32	4.00	25	11	-14.00	926786.80	695090.10	-231696.70	4.40	102.98	23.40
55	550.00	17:00	26	29	3.00	11		-11.00	695090.10	0.00	-695090.10			

Anexo 12. Perfiles de la caja metálica

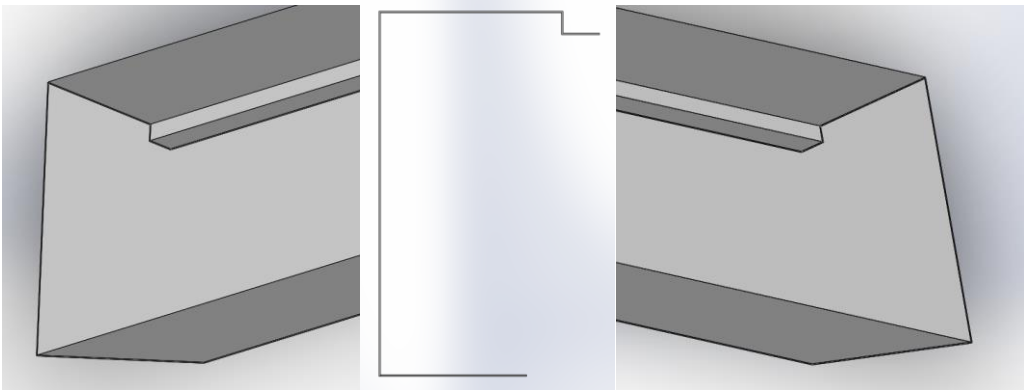
Perfil Lado A y B



Perfil Lado C



Perfil Lado D



Anexo 13. Datos adquiridos del calentador

	A	B	C	D	E	F	G
1	Fecha	Hora	T1	T2	T3		Variación
2	9/1/2022	0:00:00	17	18.25	19.85		0.5
3	9/1/2022	0:10:00	16.5	18.75	20.35		-1.25
4	9/1/2022	0:15:00	16.5	17.5	19.85		0.75
5	9/1/2022	0:20:00	16.75	18.25	20.35		0
6	9/1/2022	0:25:00	16.75	18.25	20.1		0.25
7	9/1/2022	0:35:00	16.25	18.5	19.6		-0.25
8	9/1/2022	0:40:00	16.75	18.25	19.85		0
9	9/1/2022	0:45:00	16.5	18.25	20.1		-0.25
10	9/1/2022	0:50:00	16.75	18	19.6		0
11	9/1/2022	1:00:00	16.5	18	20.35		-0.75
12	9/1/2022	1:05:00	15.75	17.25	20.35		0.25
13	9/1/2022	1:10:00	16.5	17.5	20.1		0.75
14	9/1/2022	1:15:00	16.5	18.25	19.85		-0.25
15	9/1/2022	1:25:00	16.25	18	20.1		-0.25
16	9/1/2022	1:30:00	15.75	17.75	20.35		-0.25
17	9/1/2022	1:35:00	16	17.5	20.1		-0.5
18	9/1/2022	1:40:00	16	17	19.85		-0.25
19	9/1/2022	1:50:00	15.5	16.75	19.6		-0.25
20	9/1/2022	1:55:00	15.25	16.5	19.6		0

Link del documento completo:

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1NwvVIYEV0zbyPaMjpNLq9nszvp3K-gdU/edit?usp=sharing&ouid=114251270411008493131&rtpof=true&sd=true>

Anexo 14. Datos del flujo másico del calentador solar

Datos de flujo másico					
Hora	Volumen (l)	Tiempo (min)	Tiempo (s)	Temperatura (°C)	Flujo másico (kg/s)
10:15	0.5	1:40	100	48.7	0.005
10:30	0.5	1:43	103	44.5	0.00485437
10:45	0.5	1:46	166	46.5	0.00301205
12:00	0.5	1:50	110	45.4	0.00454545
12:15	0.5	1:43	103	47.2	0.00485437
12:30	0.5	1:38	98	48.5	0.00510204
17:00	0.5	1:57	117	37.9	0.0042735
17:15	0.5	1:46	106	40	0.00471698
17:30	0.5	1:47	107	34	0.0046729
9:45	0.5	1:38	98	50	0.00510204
10:00	0.5	1:32	92	51.2	0.00543478
10:15	0.5	1:31	91	56	0.00549451
10:45	0.5	1:24	84	60	0.00595238
9:10	0.5	1:55	115	40	0.00434783
9:30	0.5	1:53	113	42	0.00442478
10:45	0.5	1:33	93	56	0.00537634
12:50	0.5	1:03	63	78	0.00793651
Promedio		1:39	99	48.58	0.00500593

Anexo 15. Certificación de traducción del resumen

Loja, 01 de noviembre de 2022

CERTIFICADO

Lic. Deici Janeth Sócola Sócola

DOCENTE DE IDIOMA EXTRANJERO MINISTERIO DE EDUCACIÓN

A petición verbal de la parte interesada:

CERTIFICA. -

Que, la traducción del resumen de tesis solicitado por el Sr. DANIEL ALEJANDRO SÁENZ SÓCOLA portador de la cedula de ciudadanía No. 1400881650, cuyo tema de investigación se titula: "IMPLEMENTACIÓN, EXPERIMENTACIÓN Y EVALUACIÓN TÉRMICA DE UN CALENTADOR SOLAR DE AGUA EN ESPIRAL, PARA LA VIVIENDA SUSTENTABLE DE LA FACULTAD DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES", ha sido realizada por la Lic. Deici Janeth Sócola Sócola, Docente de Idioma extranjero del Ministerio de Educación. La misma que es una traducción textual del documento adjunto, Lo certifico en honor a la verdad, facultando al portador del presente documento, hacer el uso legal pertinente.

Atentamente,



Lic. Deici Janeth Sócola Sócola
EFT. N° Ced. 1103026280
Telf. 0990103377