



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE COLECTOR SOLAR PLANO CON MATERIAL RECICLABLE PARA CALENTAMIENTO DE AGUA DE USO DOMÉSTICO

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO MECÁNICO

SANTILLÁN CEVALLOS MARCOS ALEXANDER
marcos.santillan@epn.edu.ec

DIRECTOR: FÍSICO YANEZ SALCEDO MARCO VINICIO, Msc.
marco.yanez@epn.edu.ec

Quito, marzo 2022

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **SANTILLÁN CEVALLOS MARCOS ALEXANDER**, bajo mi supervisión.



Físico Marco Vinicio Yáñez Salcedo, Msc.

DIRECTOR DEL PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo, **Marcos Alexander Santillán Cevallos**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.



Marcos Alexander Santillán Cevallos

DEDICATORIA

A mi mamá quien ha sido mi apoyo incondicional para poder alcanzar un peldaño más de éxito en mi vida, la mujer maravillosa que sin importar su cansancio siempre me esperaba con una sonrisa, una comida y un abrazo cuando las jornadas de estudio se alargaban y llegaba por las noches a casa.

A mi papá por todos sus sacrificios para que en este trayecto no me falte nada, el súper hombre que con sus largas jornadas de trabajo ha respaldado mis estudios para que yo siga adelante y no desmaye en este camino.

A mi hermano por sacar una carcajada y hacer que me olvide de los problemas, el gran hombre que esperaba ansioso que regrese de cada jornada de estudios y poder compartir un buen momento de hermanos.

A mis abuelitas Carmita y Efitá por siempre confiar en que lo lograría, sin duda alguna fueron las dos personas que más confianza tenían en que este momento llegaría.

A toda mi familia por ser el respaldo y mi fuerza de empuje para no desmayar. Uno no elige la familia, pero Dios me bendijo con las mejores personas, de quienes he aprendido todo lo que sé y he llegado a formarme como persona.

A quien en este trayecto fuera mi pareja y toda su familia por enseñarme que no todo en la vida son estudios, que hay tiempo para todo, por regalarme gratos momentos imborrables y por haberme abierto las puertas de su hogar.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, a Dios por permitirme dar un paso más en este largo camino que es la vida, por bendecir mi mente y brindarme la capacidad de resolver cada problema que en el trayecto se ha presentado.

Agradecido siempre con la vida por mi mamá, mi papá y mi hermano, las personas que jamás me han fallado y que a pesar de lo malo que pudiera haber hecho nunca me han señalado, a lo contrario, con su amor y paciencia han sabido corregirme cuando he errado.

Gracias a mi maravillosa familia, mención especial a ustedes, Tefis y July, por todo el apoyo que han sabido brindarme, el ejemplo más claro y esencial en este trayecto, mis lentes. Créanme sin ellos, si que hubiera sido más difícil de lo que fue este paso por la universidad.

A la Escuela Politécnica Nacional y sus docentes, por todos los conocimientos entregados y que sin duda alguna permitirán que sea un gran profesional.

Al Físico Marco Yáñez por haber aceptado estar al frente de este proyecto y confiar en el trabajo que he realizado.

A los grandes amigos que he hecho en esta etapa les agradezco infinitamente por su apoyo incondicional, gracias por haberme permitido ser parte de su grupo y enseñarme la importancia del trabajo en equipo, que no estamos solos y que un buen equipo logra grandes trabajos.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN	I
DECLARACIÓN	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
RESUMEN	IX
1. MARCO TEÓRICO	1
1.1. Descripción del colector solar plano.....	1
1.1.1. Radiación solar.....	1
1.1.2. Colectores solares térmicos.....	3
1.1.3. Descripción del funcionamiento y partes del prototipo.....	4
1.2. Modelo matemático.....	7
1.2.1. Esquema de transferencia de calor del sistema	7
1.2.2. Ecuaciones que gobiernan el fenómeno	9
1.2.3. Definición de parámetros	15
1.3. Cálculos	20
1.3.1. Cálculo del coeficiente de transferencia de calor.....	20
1.3.2. Cálculo de la longitud de la manguera	21
1.3.3. Cálculo de la potencia requerida para la bomba.....	22
1.3.4. Consumo eléctrico de la bomba	24
2. METODOLOGÍA	24
2.1. Dimensionamiento	24
2.2. Construcción	25
2.3. Pruebas.....	30
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	31
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	34
4.1. Conclusiones.....	34
4.2. Recomendaciones	35
REFERENCIAS	37

ANEXOS39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Irradiación solar global horizontal (GHI) anual.	2
Figura 1.2 – Partes de un colector plano.	5
Figura 1.3 – Partes de un colector plano.	5
Figura 1.4 – Esquema de transferencia de calor.	8
Figura 1.5 – Esquema de resistencias térmicas.	8
Figura 1.6 – Cálculo de resistencia equivalente 1.	9
Figura 1.7 – Cálculo de resistencia de conducción.....	11
Figura 1.8 – Cálculo de resistencia equivalente 2.	12
Figura 1.9 – Esquema de resistencias térmicas.	13
Figura 1.10 – Longitud de la manguera.	15
Figura 2.1 – Dimensiones generales del prototipo.	25
Figura 2.2 – Marcación sobre la manguera.	25
Figura 2.3 – Manguera embobinada.	26
Figura 2.4 – Unión de ambos tramos de la manguera.....	26
Figura 2.5 – Corte de piezas de cartón para ensamblar la caja.	27
Figura 2.6 – Base de la caja emplastada.	27
Figura 2.7 – Ensamblaje de la caja y la bobina.	28
Figura 2.8 – Prototipo final.....	28
Figura 2.9 – Mangueras para la conexión de bomba y la salida del prototipo.	29
Figura 2.10 – Prototipo para pruebas.....	29

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Datos de irradiación solar promedio en Quito	3
Tabla 1.2. Comparación de alternativas para la cubierta	6
Tabla 1.3. Consideraciones para hallar el coeficiente de convección cubierta-ambiente	15
Tabla 1.4. Consideraciones para hallar el coeficiente de radiación cubierta – ambiente	16
Tabla 1.5. Consideraciones para hallar el coeficiente de convección cubierta – manguera	16
Tabla 1.6. Consideraciones para hallar el coeficiente de radiación cubierta – manguera.....	17
Tabla 1.7. Consideraciones para hallar la resistencia de conducción en la parte inferior de la caja.....	17
Tabla 1.8. Consideraciones para hallar la resistencia de convección base - ambiente	18
Tabla 1.9. Consideraciones para hallar el coeficiente de radiación cubierta – ambiente	18
Tabla 1.10. Consideraciones para hallar la potencia térmica requerida	18
Tabla 1.11. Consideraciones para hallar la potencia térmica instantánea.....	19
Tabla 1.12. Consideraciones para calcular la longitud de manguera	19
Tabla 1.13. Valores representativos del coeficiente global de transferencia de calor	21
Tabla 3.1. Datos registrados el primer día de pruebas.....	31
Tabla 3.2. Datos registrados el segundo día de pruebas.....	32
Tabla 3.3. Datos registrados el tercer día de pruebas.....	33
Tabla 3.4. Datos registrados el cuarto día de pruebas.....	34

RESUMEN

Se presenta el diseño y construcción de un colector solar de placa plana para el calentamiento de agua de uso doméstico hecho con materiales reciclados y de fácil acceso. El sistema emplea una bomba para la circulación del agua y es probado con las condiciones de la ciudad de Quito.

Pasados los días de prueba se obtiene como resultado un funcionamiento óptimo del sistema, alcanzando una temperatura de estancamiento en el rango de 70 – 80 °C y una temperatura promedio dentro del tanque de almacenamiento de 50 °C con un volumen de agua de 50 L. La temperatura de confort de 42 °C se alcanza satisfactoriamente y a pesar de condiciones de alta presencia de nubosidades se logra tener agua a temperatura agradable al tacto.

Palabras clave: colector solar de placa plana, radiación solar, calentamiento de agua, materiales reciclables.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Descripción del colector solar plano

1.1.1. Radiación solar

No toda la radiación alcanza la superficie de la Tierra, porque las ondas ultravioletas más cortas son absorbidas por los gases de la atmósfera. Existen diferentes procesos que sufren la radiación solar cuando interactúa con la atmósfera por la presencia de partículas de polvo, vapores de agua y el ozono [1].

En condiciones óptimas para Quito en un día soleado la mayor parte de la energía solar que llega desde el exterior alcanza la superficie terrestre de la siguiente forma [2]:

- Radiaciones ultravioletas (9%)
- Radiaciones visibles (42%)
- Radiaciones infrarrojas (49%)

Como resultado la radiación solar recibida sobre la superficie horizontal terrestre se compone de radiación solar directa y radiación solar difusa, las cuales se mencionan a continuación.

- Tipo de radiación solar.

Radiación Directa.

Es la radiación solar captada por la superficie de forma perpendicular a la posición del sol, la cual no sufre algún cambio en su dirección y dispersión al atravesar la atmósfera [3].

Radiación Difusa.

Es la radiación solar que presenta reflexión y dispersión causada por la atmósfera, lo que ocasiona sus múltiples direcciones [3].

Radiación Solar Global.

Se le considera como la radiación total captada por una superficie, es decir la suma de la radiación solar directa y difusa. Este tipo de radiación es de onda corta [3].

- Propiedades básicas de la radiación

Emisividad (ϵ): Representa la radiación emitida por una superficie respecto a la que emitiría un cuerpo negro [3].

Absortividad (α): Representa la fracción de radiación incidente sobre una superficie que es absorbida por ésta. Su valor está comprendido en el rango $0 < \alpha < 1$. Un cuerpo negro absorbe toda la radiación incidente sobre él, es un absorbente perfecto ($\alpha=1$) [3].

Reflectividad (ρ): Es la fracción de irradiación reflejada por una superficie [3].

Transmitancia (τ): Es la fracción de la radiación incidente que se transmite a través de un medio [3].

- Aplicaciones de la energía solar.

La energía obtenida del sol tiene un amplio campo de aplicación, entre las principales se encuentran [4]:

- Calentamiento de agua para consumo doméstico o industrial.
- Generación de energía eléctrica.
- Generación de calefacción para hogares, hoteles, colegios, fábricas, etc.
- Climatización de piscinas.
- Refrigeración durante las épocas cálidas.
- Acondicionamiento de aire
- Invernaderos solares.
- Plantas de purificación y de desalinización de agua.

- Ecuador y la radiación solar.

La ubicación geográfica del país permite recibir una gran cantidad de la radiación emitida por el sol, por ende, el estudio de esta energía va ganando campo. Dependiendo de la duración de las horas sol al día, del camino recorrido por los rayos y del ángulo que forma la tierra respecto a los rayos se logra captar más o menos radiación [5]. La siguiente gráfica representa la irradiación solar global horizontal anual registrada en Ecuador en el año 2019.

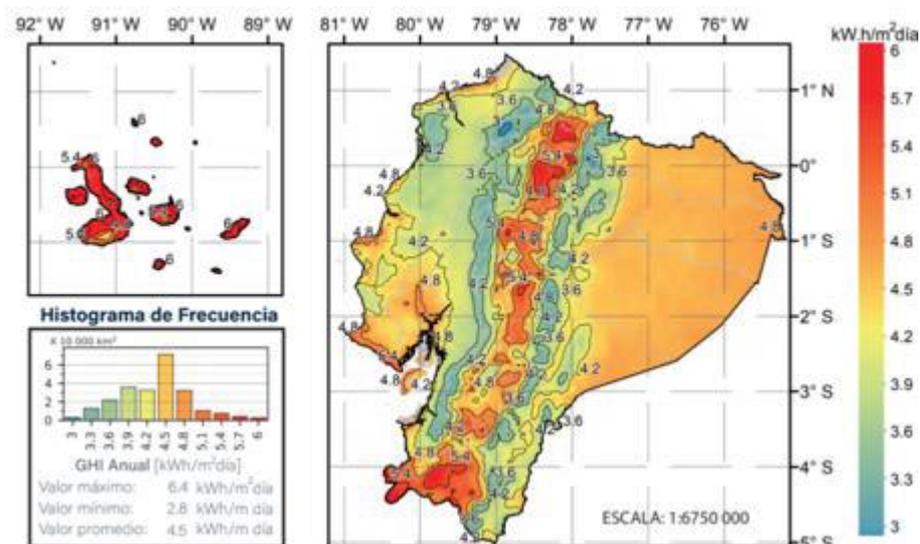


Figura 1.1 – Irradiación solar global horizontal (GHI) anual.

[5]

- Quito y la radiación solar.

Ubicación Geográfica: Quito está ubicada en las coordenadas 0°13'23"S y 78°30'45"O y como se encuentra sobre la línea ecuatorial recibe mayor incidencia de radiación solar [6].

Hora solar: La radiación es mayor al medio día, entre las 12 y 15 horas, esto depende de la región.

Altitud: Quito se encuentra a 2800 m.s.n.m [6]. En [7] cada 1000 m de altitud, la radiación UV aumenta entre un 10 - 12 %, por esta razón existe mayor incidencia de radiación solar en la ciudad.

En la siguiente tabla se puede ver los valores promedios de irradiación solar promedio registrada en Quito en el año 2019 [5].

Tabla 1.1. Datos de irradiación solar promedio en Quito [5]

Map data		Per year ▾	
Specific photovoltaic power output	PVOUT specific	1664	kWh/kWp °
Irradiación directa normal	DNI	1754	kWh/m ² °
<input checked="" type="checkbox"/> Irradiación horizontal global	GHI	2039	kWh/m ² °
Irradiación difusa horizontal	DIF	817	kWh/m ² °
Irradiación global inclinada para el ángulo óptimo	GTI _{opta}	2042	kWh/m ² °
Temperatura del aire	TEMP	15.0	°C °
Inclinación óptima de los módulos fotovoltaicos	OPTA	3 / 0	°
Elevación del terreno	ELE	2704	m °

1.1.2. Colectores solares térmicos

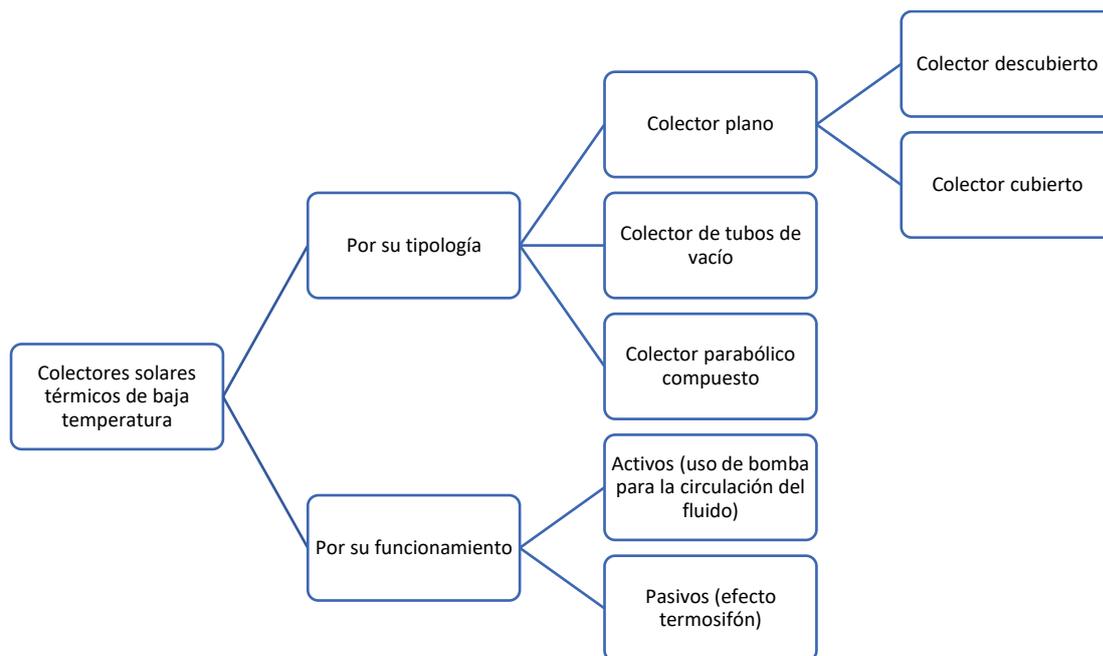
Para el aprovechamiento de la radiación solar es necesario el empleo de tecnología solar, parte de los dispositivos que permiten alcanzar ese propósito son los colectores solares térmicos [8].

Un colector solar térmico es un dispositivo con el cual se transforma la radiación proveniente del sol en energía térmica mediante la circulación de un fluido que se encarga de absorber el calor producido en esa transición [8].

Para aplicaciones residenciales los aspectos que deben ser estudiados para la implementación de estos dispositivos son los siguientes [8]:

- Temperatura por alcanzar.
- Requerimiento de energía auxiliar.
- Disponibilidad de recursos económicos.
- Espacio y tipología del terreno.
- Grado de tecnología del entorno.

El desarrollo del presente trabajo, por la temperatura de confort del agua de uso doméstico, se enfoca en el estudio de los colectores de baja y mediana temperatura. Una clasificación en general de los dispositivos que cumplen dicha función en base al documento [9] se presenta en el siguiente esquema.



El prototipo que se realiza en el presente proyecto se clasifica por la tipología como un colector solar plano cubierto y por el tipo de funcionamiento dentro de los activos.

1.1.3. Descripción del funcionamiento y partes del prototipo

En un colector solar térmico plano, la transformación energética de la radiación solar en térmica comienza con el paso de los rayos solares a través de una cubierta transparente, seguido a ello la radiación incidente es absorbida por la superficie de colección, esta se calienta y el calor generado es transferido hacia los tubos por donde circula el fluido para finalizar en un tanque de almacenamiento [8]. Un esquema de lo mencionado se encuentra representado en la figura a continuación.



Figura 1.2 – Partes de un colector plano.

[8]

El principal objetivo por el cual se coloca una cubierta transparente y se encapsula el sistema del colector, es generar un ambiente de efecto invernadero, con ello se logra mantener por más tiempo el calor interno generado y reducir en gran medida las pérdidas generadas por la convección en la superficie. En la figura a continuación se representa un esquema en el que se aprecia los elementos con los cuales será armado el prototipo.

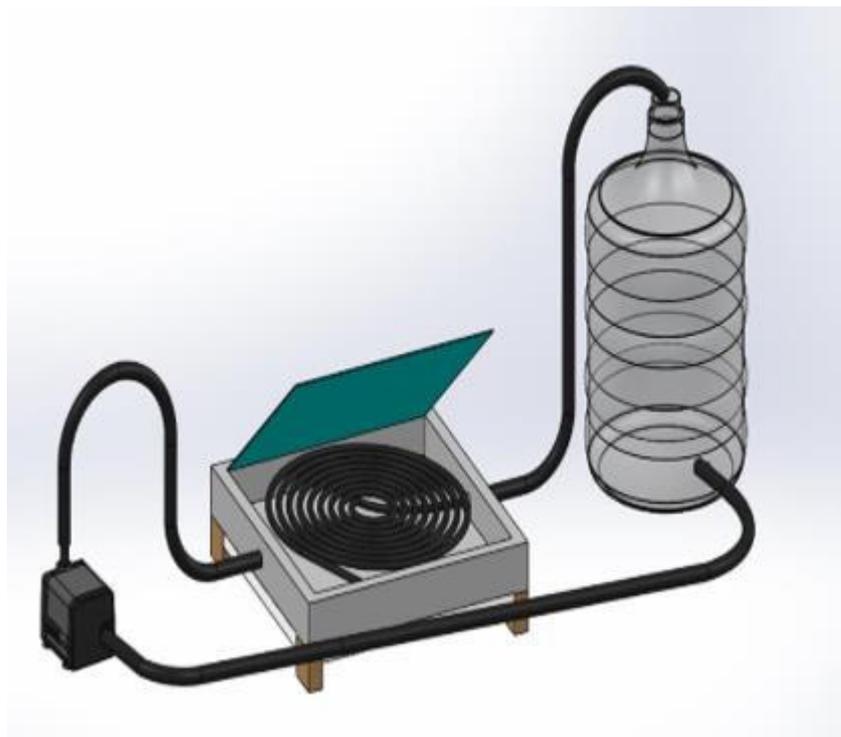


Figura 1.3 – Partes de un colector plano.

Elaboración: propia

El agua almacenada en el tanque es movida por la acción de la bomba a través de la manguera que se encuentra dentro de la cubierta absorbiendo el calor, paso seguido retorna al tanque y así continúa el ciclo hasta alcanzar la temperatura objetivo. De forma resumida esa es la forma en la que opera el sistema.

- Cubierta

El material que se elija para la cubierta debe satisfacer dos necesidades primordiales, la primera es que sea lo suficientemente transparente para permitir el ingreso de la mayor cantidad de radiación y la segunda es que sea un material que se pueda obtener de la acción del reciclaje.

Se analizaron dos alternativas que se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 1.2. Comparación de alternativas para la cubierta

MATERIAL	TRANSMITANCIA	OPCIÓN DE RECICLAR	COSTO
PET	34,57%	OK	Bajo
Policarbonato	86,27%	NO OK	Medio

Elaboración: Propia

Como se aprecia en la Tabla 1.2, el policarbonato presenta un mayor porcentaje de transmitancia, esto quiere decir que permite el paso de una mayor cantidad de radiación incidente por lo que sería una buena opción, pero al ser el objetivo principal del proyecto el uso de materiales reciclables y al buscar conseguir un prototipo de bajo presupuesto, entonces se opta por utilizar PET para la cubierta del prototipo.

El valor de la transmitancia del PET se la obtuvo del trabajo [10] y el valor para el policarbonato se extrajo de [11]

- Captador

Para el captador se debe usar un material que permita la mayor cantidad de absorción de la radiación que atraviesa la cubierta, aparte de ello el captador va a cumplir la función de transportar el agua por su interior. Para el prototipo se va a emplear manguera negra que es usada en los sistemas de riego por goteo, el diámetro es de 3/4 de pulgada (19.05 mm). Este tipo de manguera se usa por la facilidad de adaptarla a diferentes geometrías, está hecha de polietileno y soporta una presión de hasta 4 bar 60 (psi) [12], suficiente para las presiones que se encuentra en la red de suministro de agua potable de Quito.

- Carcasa

El proyecto trata del uso de materiales reciclables, por ello el material más adecuado es el cartón. La maleabilidad del material permite realizar la forma de caja que se requiere para el prototipo, a parte que brinda soporte para que se asiente el captador.

- Aislante

Con el fin de reducir las pérdidas del calor a través de las paredes de la carcasa y aún más importante proteger de la intemperie al prototipo, se coloca un revestimiento con la misma lámina de PET que se usa para la cubierta.

1.2. Modelo matemático

1.2.1. Esquema de transferencia de calor del sistema

Para el modelo matemático se estudia la transferencia de calor que se da en cada una de las etapas del sistema y la interacción que existe entre cada uno de los elementos.

Consideraciones:

- Flujo de calor unidimensional.
- Las pérdidas de calor por los lados se desprecian.
- El espesor de la cubierta es despreciable por ello no existe conducción.
- La cubierta no absorbe la energía solar incidente sobre ella.
- Ningún elemento genera energía.
- No existe variación de las propiedades térmicas de cada elemento.
- Transferencia de calor en estado estable.
- Convección del agua despreciable.

En la figura 1.4 se aprecia una vista en corte de las distintas variables que se toman en cuenta dentro de los cálculos.

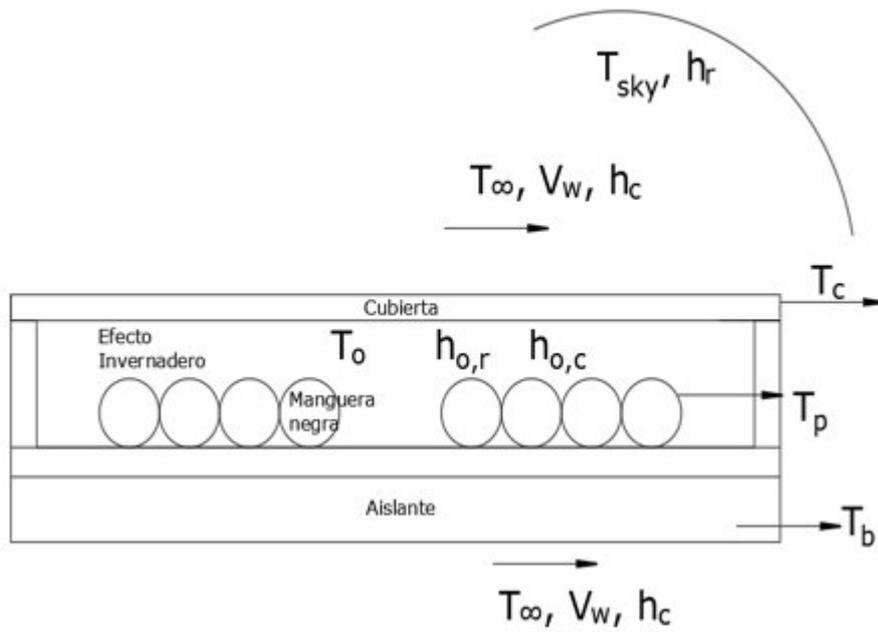


Figura 1.4 – Esquema de transferencia de calor.

Elaboración: propia.

La figura 1.5 muestra esquemáticamente como se arma el circuito de resistencias eléctricas y sus correspondientes variables. Todas las relaciones y expresiones matemáticas están en función de [3], caso contrario se indica su respectiva fuente.

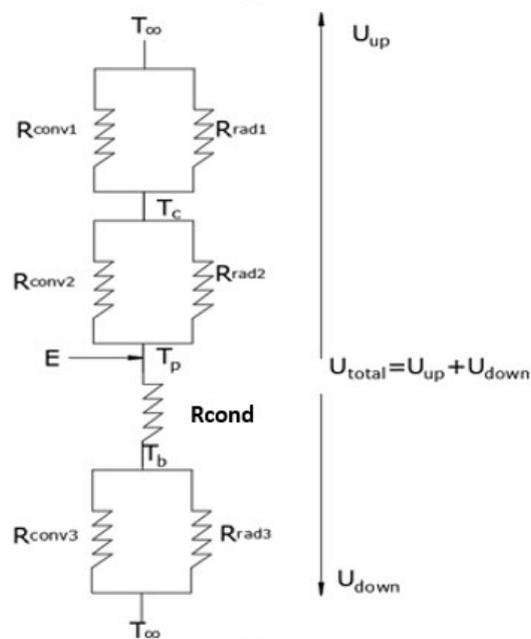


Figura 1.5 – Esquema de resistencias térmicas.

Elaboración: propia

1.2.2. Ecuaciones que gobiernan el fenómeno

- Resistencia de convección y radiación entre el ambiente y la manguera.

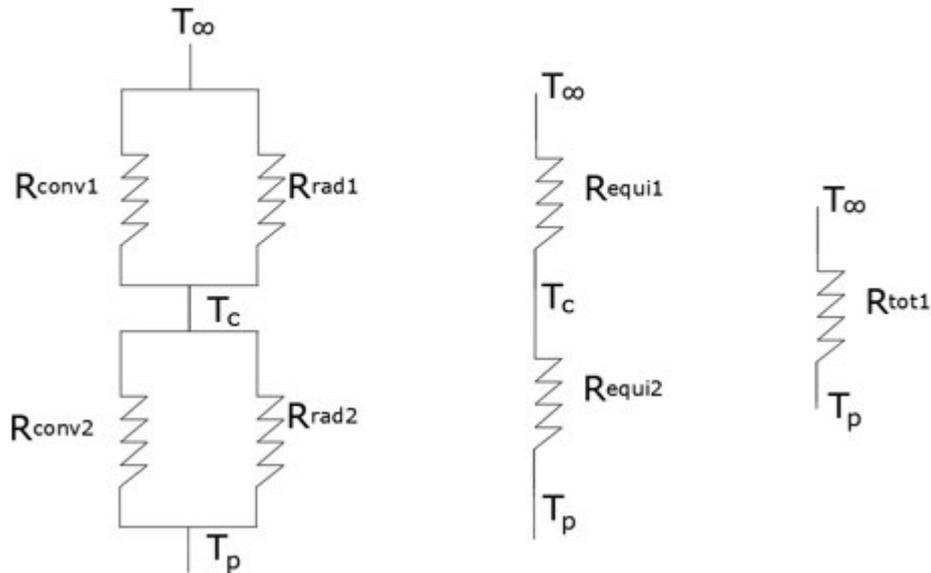


Figura 1.6 – Cálculo de resistencia equivalente 1.

Elaboración: propia

$$R_{tot1} = \left(\frac{R_{conv1} * R_{rad1}}{R_{conv1} + R_{rad1}} + \frac{R_{conv2} * R_{rad2}}{R_{conv2} + R_{rad2}} \right) \quad (1)$$

Donde:

R_{conv1} = Resistencia térmica de convección entre la cubierta transparente de vidrio y el ambiente.

R_{rad1} = Resistencia térmica de radiación entre la cubierta transparente de vidrio y el cielo.

R_{conv2} = Resistencia térmica de convección entre la manguera y la cubierta transparente de vidrio.

R_{rad2} = Resistencia térmica de radiación entre la manguera y la cubierta transparente de vidrio.

$$R_{conv1} = \frac{1}{h_{c, c-a}} \quad (2)$$

$$h_{c, c-a} = 2.8 + 3 * V \quad (3)$$

Donde:

$h_{c,c-a}$ = Coeficiente de transferencia de calor por convección del viento entre la cubierta y el ambiente.

V = Velocidad del viento.

$$R_{rad1} = \frac{1}{h_{r,c-a}} \quad (4)$$

$$h_{r,c-a} = 4 * \varepsilon_c * \sigma * T_m^3 \quad (5)$$

$$T_m = \frac{T_c + T_{sky}}{2} \quad (6)$$

$$T_{sky} = T_a - 6^\circ\text{C} \quad (7)$$

Donde:

$h_{r,c-a}$ = Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la cubierta y el ambiente.

ε_c = Emisividad de la cubierta transparente.

σ = Constante de Boltzmann.

T_m = Temperatura media.

T_{sky} = Temperatura del cielo.

$T_a = T_\infty$ = Temperatura ambiente.

T_c = Temperatura de la cubierta de vidrio.

$$R_{conv2} = \frac{1}{h_{c,c-p}} \quad (8)$$

$$Nu_\delta = 1 + 4.44 * \left(1 - \frac{1708}{Ra_\delta}\right) + \left[\left(\frac{Ra_\delta}{5830}\right)^{1/3} - 1\right] \quad (9)$$

$$Ra_\delta = Gr_\delta * Pr \quad (10)$$

$$Gr_\delta = \delta^3 * \frac{\beta * g}{\nu^4} * (T_p - T_c) \quad (11)$$

$$\beta = \frac{1}{T} = \frac{1}{T_p} \quad (12)$$

$$Nu_{\delta} = \frac{h_{c,c-p} * \delta}{k_a} \quad (13)$$

Donde:

$h_{c,c-p}$ = Coeficiente de transferencia de calor por convección del aire entre la cubierta y la manguera.

δ = Distancia entre la cubierta y la manguera.

Nu_{δ} = Número de Nusselt para el aire comprendido entre la manguera y la cubierta que se encuentran a una distancia δ .

Ra_{δ} = Número de Rayleigh.

Gr_{δ} = Número de Grashof para el aire comprendido entre la manguera y la cubierta que se encuentran a una distancia δ .

β = Coeficiente de expansión volumétrica.

T_p = Temperatura superficial de la manguera.

g = Gravedad.

ν = Viscosidad cinemática del aire.

k_a = Conductividad térmica del aire.

Pr = Número de Prandtl del aire.

$$R_{rad2} = \frac{1}{h_{r,c-p}} \quad (14)$$

$$h_{r,c-p} = \frac{\sigma * (T_p^2 - T_c^2) * (T_p^2 + T_c^2)}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} * \frac{1}{T_p - T_c} \quad (15)$$

Donde:

$h_{r,c-p}$ = Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la cubierta y la manguera.

ε_p = Emisividad de la manguera.

- Resistencia de conducción en el aislante

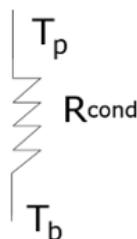


Figura 1.7 – Cálculo de resistencia de conducción.

Elaboración: propia

$$R_{cond} = \frac{e}{k_i} \quad (16)$$

Donde:

R_{cond} = Resistencia térmica de conducción entre la manguera y la base.

e = Espesor del aislante.

k_i = Conductividad térmica del aislante.

- Resistencia de convección y radiación entre la base y el ambiente

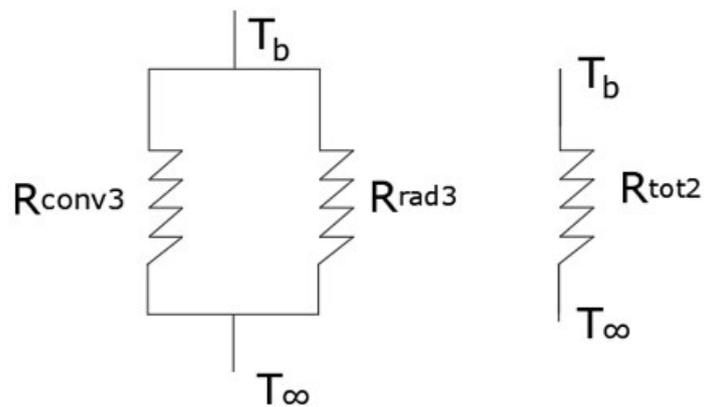


Figura 1.8 – Cálculo de resistencia equivalente 2.

Elaboración: propia

$$R_{conv3} = \frac{1}{h_{c,b-a}} \quad (17)$$

$$h_{c,b-a} = 2.8 + 3 * V \quad (18)$$

$$R_{rad3} = \frac{1}{h_{r,b-a}} \quad (19)$$

$$h_{r,b-a} = 4 * \epsilon_b * \sigma * Tm^3 \quad (20)$$

$$Tm = \frac{T_b + T_{sky}}{2} \quad (21)$$

$$R_{tot2} = \left(\frac{R_{conv3} * R_{rad3}}{R_{conv3} + R_{rad3}} \right) \quad (22)$$

Donde:

R_{conv3} = Resistencia térmica de convección entre la base y el ambiente.

R_{rad3} = Resistencia térmica de radiación entre la base y el ambiente.

$h_{c, b-a}$ = Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la base y el ambiente.

$h_{r, b-a}$ = Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la base y el ambiente.

- Resistencia total

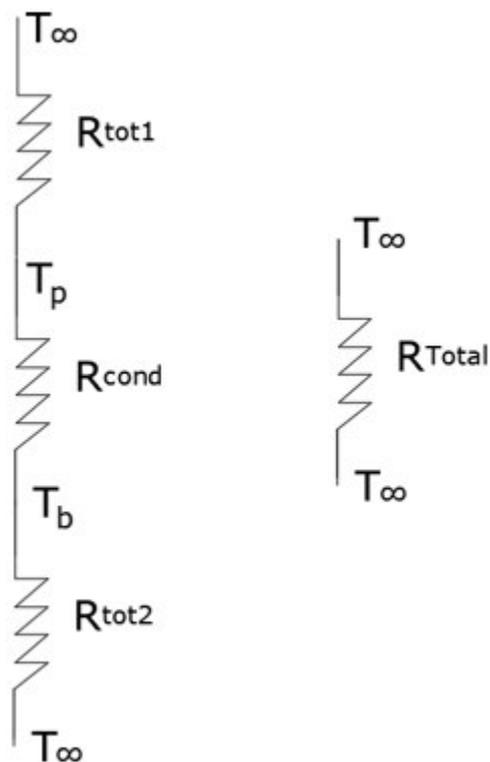


Figura 1.9 – Esquema de resistencias térmicas.

Elaboración: propia

$$R_{Total} = R_{tot1} + R_{cond} + R_{tot2} \quad (23)$$

$$U_{Total} = \frac{1}{R_{Total}} \quad (24)$$

Donde:

U_{Total} = Coeficiente global de transferencia de calor del sistema.

- Potencia térmica

$$Q = \frac{M}{HSP} * Cp * (T_{confort} - T_i) \quad (25)$$

Donde:

M= Masa de agua a ser calentada.

Cp= Calor específico del agua.

HSP= Horas de Sol Pico.

$T_{confort}$ = Temperatura confort para agua caliente sanitaria.

T_i = Temperatura del agua de la red.

Q= Potencia térmica.

- Área de transferencia de calor

$$Q = A * Fr * [E * (r * \alpha) * K - U_{Total} * (T_m - T_i)] \quad (26)$$

$$(r * \alpha) = 1.02 * r * \alpha \quad (27)$$

$$T_m = \frac{T_{confort} + T_i}{2} \quad (28)$$

Donde:

Q= Potencia Térmica

Fr= Factor de remoción del calor.

E= Irradiancia.

A= Área de transferencia de calor.

r= Transmitancia de la cubierta.

α = Absortancia de la manguera.

K= Factor de sombra y suciedad.

U_{Total} = Coeficiente global de transferencia de calor.

T_m = Temperatura media

- Longitud de manguera

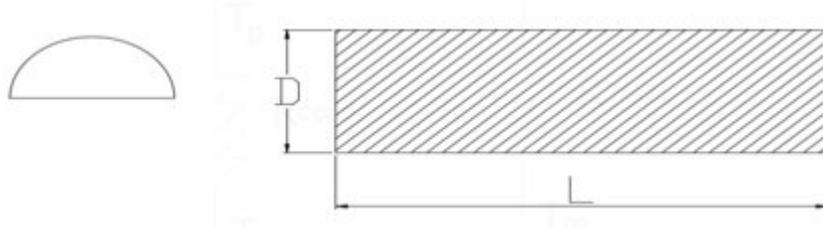


Figura 1.10 – Longitud de la manguera.

Elaboración: propia

$$A = D * L \quad (29)$$

Donde:

L= Longitud de la manguera.

D= Diámetro de la manguera.

1.2.3. Definición de parámetros

- Coeficiente de convección cubierta – ambiente, calculado mediante la ecuación de Watt Muff [13].

$$h_{c, c-a} = 2.8 + 3 * V$$

Tabla 1.3. Consideraciones para hallar el coeficiente de convección cubierta-ambiente

Variable	Valor	Especificación
V	2.3 [m/s]	Velocidad promedio del viento en Quito

- Coeficiente de radiación cubierta – ambiente, calculado de la ecuación de Whiller [13].

$$h_{r,c-a} = 4 * \epsilon_c * \sigma * T_m^3$$

$$T_m = \frac{T_c + T_{sky}}{2}$$

$$T_{sky} = T_a - 6^\circ\text{C}$$

Tabla 1.4. Consideraciones para hallar el coeficiente de radiación cubierta – ambiente

Variable	Valor	Especificación	Referencia
T_c	70 [°C]	Temperatura máxima que puede alcanzar la cubierta	[16]
T_a	16.1 [°C]	Temperatura ambiente en Quito	[5]
ε_c	0.94	Emisividad de la cubierta (PET)	[3]
σ	5.67×10^{-8} [J/K]	Constante de Stefan-Boltzmann	[3]

- Coeficiente de convección cubierta – manguera, calculado de la ecuación de Holland [13].

$$Nu_{\delta} = 1 + 4.44 * \left(1 - \frac{1708}{Ra_{\delta}}\right) + \left[\left(\frac{Ra_{\delta}}{5830}\right)^{1/3} - 1\right]$$

$$Ra_{\delta} = Gr * Pr$$

$$Gr_{\delta} = \delta^3 * \frac{\beta * g}{\nu^4} * (T_p - T_c)$$

$$\beta = \frac{1}{T} = \frac{1}{T_p}$$

$$Nu_{\delta} = \frac{h_{c,c-p} * \delta}{k_a}$$

Tabla 1.5. Consideraciones para hallar el coeficiente de convección cubierta – manguera

Variable	Valor	Especificación	Referencia
T_p	100 [°C]	Temperatura máxima que puede alcanzar la superficie de la manguera	[16]
T_c	70 [°C]	Temperatura máxima que puede alcanzar la cubierta	[16]
Pr	0.7	Número de Prant del aire para una temperatura media entre $T_{p,max}$ y T_c	[3]
ν	20.92×10^{-6} [Kg/m*s]	Viscosidad cinemática del aire para una temperatura media entre $T_{p,max}$ y T_c	[3]

k_a	30×10^{-3} [W/m*K]	Conductividad térmica del aire para una temperatura media entre $T_{p,max}$ y T_c	[3]
δ	40 [mm]	Distancia Cubierta-Superficie de la manguera	[16]

- Coeficiente de radiación cubierta – manguera, calculado de la ecuación de Duffie Beckman [14].

$$h_{r,c-p} = \frac{5.67 \times 10^{-8} * (T_p^2 - T_c^2) * (T_p^2 + T_c^2)}{\frac{1}{\epsilon_p} + \frac{1}{\epsilon_c} - 1} * \frac{1}{T_p - T_c}$$

Tabla 1.6. Consideraciones para hallar el coeficiente de radiación cubierta – manguera

Variable	Valor	Especificación	Referencia
T_p	373 [K]	Temperatura máxima que puede alcanzar la superficie de la manguera	[3]
T_c	343 [K]	Temperatura máxima que puede alcanzar la cubierta	[16]
ϵ_p	0.95	Emisividad de la manguera (placa negro mate)	[13]
ϵ_c	0.94	Emisividad de la cubierta (PET)	[13]

- Resistencia de conducción en la parte inferior de la caja

$$R_{cond} = \frac{e}{k_i}$$

Tabla 1.7. Consideraciones para hallar la resistencia de conducción en la parte inferior de la caja

Variable	Valor	Especificación	Referencia
e	0.001 [m]	Espesor del aislante	-----
k_i	0.016 [W/mK]	Conductividad térmica del aislante (PET)	[3]

- Resistencia de convección base - ambiente, calculado de la ecuación de Watt Muff [13].

$$h_{c, b-a} = 2.8 + 3 * V$$

$$R_{conv3} = \frac{1}{h_{c,b-a}}$$

Tabla 1.8. Consideraciones para hallar la resistencia de convección base - ambiente

Variable	Valor	Especificación	Referencia
V	2.3 [m/s]	Velocidad promedio del viento en Quito	[16]

- Coeficiente de radiación base – ambiente, calculado de la ecuación de Whiller [13].

$$h_{r,b-a} = 4 * \epsilon_b * \sigma * Tm^3$$

$$Tm = \frac{T_b + T_{sky}}{2}$$

$$T_{sky} = T_a - 6^{\circ}\text{C}$$

Tabla 1.9. Consideraciones para hallar el coeficiente de radiación cubierta – ambiente

Variable	Valor	Especificación	Referencia
T_b	16.1 [°C]	Temperatura de la base	Experimentación
T_a	16.1 [°C]	Temperatura ambiente en Quito	[5]
ϵ_b	0.94	Emisividad de la base (PET)	[3]
σ	5.67×10^{-8} [J/K]	Constante de Stefan-Boltzmann	[3]

- Potencia térmica para elevar la temperatura del agua de la red hasta la temperatura de confort

$$Q = \frac{M}{HSP} * Cp * (T_{confort} - T_i)$$

Tabla 1.10. Consideraciones para hallar la potencia térmica requerida

Variable	Valor	Especificación	Referencia
Cp	4184 [J/Kg*K]	Calor específico del agua	[3]
M	50 [Kg]	Cantidad de agua	-----

HSP	4 [Horas]	Horas de Sol Pico promedio en Quito	[16]
$T_{confort}$	42 [°C]	Temperatura confort para agua caliente sanitaria.	[17]
T_i	14.5 [°C]	Temperatura del agua de la red	[Propia]

- Potencia térmica instantánea según la Ecuación de Hottel – Whillier – Bliss [15].

$$Q = A * Fr * [E * r * \alpha * K - U_{Total} * (Tm - Ti)]$$

$$(r * \alpha) = 1.02 * r * \alpha$$

$$Tm = \frac{T_{confort} + T_i}{2}$$

Tabla 1.11. Consideraciones para hallar la potencia térmica instantánea

Variable	Valor	Especificación	Referencia
Fr	0.8	Factor de remoción de calor	[17]
E	678 [W/m ²]	Irradiación media Quito	[5]
r	0.85	Transmitancia de la cubierta (PET)	[18]
α	0.90	Absortancia de la manguera (placa negro mate)	[18]
K	0.90	Factor de remoción y sombra	[18]

- Cálculo de la longitud de manguera

$$A = D * L$$

$$L = \frac{A}{D}$$

Tabla 1.12. Consideraciones para calcular la longitud de manguera

Variable	Valor	Especificación	Referencia
D	0.0195 [m]	Diámetro de la manguera (3/4")	-----

1.3. Cálculos

1.3.1. Cálculo del coeficiente de transferencia de calor

- Coeficiente de convección cubierta – ambiente, calculado mediante la ecuación de Watt Muff [13].

$$h_{c, c-a} = 2.8 + 3 * V$$

$$h_{c, c-a} = 2.8 + 3 * 2.3 = 8.1 \left[\frac{W}{K * m^2} \right]$$

- Coeficiente de radiación cubierta – ambiente, calculado de la ecuación de Whiller [13].

$$h_{r,c-a} = 4 * \varepsilon_c * \sigma * Tm^3$$

$$h_{r,c-a} = 4 * \varepsilon_c * \sigma * \left(\frac{343.15 + 283.25}{2} \right)^3 = 6.55 \left[\frac{W}{K * m^2} \right]$$

- Coeficiente de convección cubierta – manguera, calculado de la ecuación de Holland [13].

$$Nu_{\delta} = 1 + 4.44 * \left(1 - \frac{1708}{83.66 * 10^3} \right) + \left[\left(\frac{83.66 * 10^3}{5830} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right] = 6.78$$

$$h_{c,c-p} = \frac{Nu_{\delta} * k_a}{\delta} = 5.08 \left[\frac{W}{K * m^2} \right]$$

- Coeficiente de radiación cubierta – manguera, calculado de la ecuación de Duffie Beckman [14].

$$h_{r,c-p} = \frac{5.67 * 10^{-8} * (373.15^2 - 343.15^2) * (373.15^2 + 343.15^2)}{\frac{1}{0.95} + \frac{1}{0.94} - 1} * \frac{1}{373.15 - 343.15}$$
$$= 9.34 \left[\frac{W}{K * m^2} \right]$$

- Resistencia de conducción en la parte inferior de la caja

$$R_{cond} = \frac{0.001}{0.16} = 0.00625 \left[\frac{K * m^2}{W} \right]$$

- Coeficiente de convección base - ambiente, calculado de la ecuación de Watt Muff [13].

$$h_{c, b-a} = 2.8 + 3 * 2.3 = 9.7 \left[\frac{W}{K * m^2} \right]$$

- Coeficiente de radiación base – ambiente, calculado de la ecuación de Whiller [15].

$$h_{r,b-a} = 4 * \varepsilon_b * \sigma * Tm^3$$

$$h_{r,b-a} = 4 * \varepsilon_b * \sigma * \left(\frac{289.25 + 283.25}{2}\right)^3 = 5 \left[\frac{W}{K * m^2}\right]$$

- Coeficiente global de transferencia de calor

$$R_{tot1} = \frac{\frac{1}{8.1} * \frac{1}{6.55}}{\frac{1}{8.1} + \frac{1}{6.55}} + \frac{\frac{1}{5.08} * \frac{1}{9.34}}{\frac{1}{5.08} + \frac{1}{9.34}} = 0.137$$

$$U_{tot1} = \frac{1}{R_{tot1}} = 7.26 \left[\frac{W}{m^2 * K}\right]$$

$$U_{cond} = \frac{1}{R_{cond}} = 16 \left[\frac{W}{m^2 * K}\right]$$

$$R_{tot2} = \frac{\frac{1}{9.7} * \frac{1}{5}}{\frac{1}{9.7} + \frac{1}{5}} = 0.06$$

$$U_{tot2} = \frac{1}{R_{tot2}} = 14.7 \left[\frac{W}{m^2 * K}\right]$$

$$U_{Total} = 7.26 + 16 + 14.7 = 37.96 \left[\frac{W}{m^2 * K}\right]$$

De [3] se obtiene la siguiente tabla sobre los valores representativos del coeficiente global de transferencia de calor que se hallan para diferentes tipos de arreglo de intercambiadores de calor. El prototipo de este trabajo se lo clasifica dentro de los intercambiadores de calor con el paso de agua al interior de tubos y flujo de aire en el exterior. El valor hallado de $37.96 \left[\frac{W}{m^2 * K}\right]$ se encuentra dentro del valor referencial entre $25 - 50 \left[\frac{W}{m^2 * K}\right]$, esto es una forma de verificar el cálculo del coeficiente.

Tabla 1.13. Valores representativos del coeficiente global de transferencia de calor [3]

TABLE 11.2 Representative Values of the Overall Heat Transfer Coefficient

Fluid Combination	U (W/m ² · K)
Water to water	850–1700
Water to oil	110–350
Steam condenser (water in tubes)	1000–6000
Ammonia condenser (water in tubes)	800–1400
Alcohol condenser (water in tubes)	250–700
Finned-tube heat exchanger (water in tubes, air in cross flow)	25–50

1.3.2. Cálculo de la longitud de la manguera

El objetivo del presente trabajo es estudiar el comportamiento por 1 m^2 del tipo de arreglo propuesto para un colector solar plano, por lo tanto, una vez conocida el área de colección se despeja de la fórmula 29 la variante de la longitud.

$$L = \frac{1 \text{ m}^2}{0.01905 \text{ m}} = 52.5 \text{ m}$$

Para absorber cualquier error cometido por la estimación de la fórmula del área de colección y para tener espacio para realizar las conexiones necesarias del prototipo, se toma una longitud de manguera de 60 m.

1.3.3. Cálculo de la potencia requerida para la bomba

Para este cálculo se requiere empezar por el cálculo de las pérdidas de bombeo que se tiene en el sistema, para ello se usa la ecuación de Bernoulli [3].

$$P_1 + \frac{V_1^2}{2a} + Z_1 + H_b = P_2 + \frac{V_2^2}{2a} + Z_2 + \frac{\lambda + L + V_2^2}{2 * g * D} \quad (30)$$

Donde:

P_1 = Presión a la entrada de la manguera [Pa]

P_2 = Presión a la salida de la manguera [Pa]

V_1 = velocidad del fluido a la entrada de la manguera [$\frac{m}{s}$]

H_b = Pérdidas por bombeo [m]

V_2 = velocidad del fluido a la salida de la manguera [$\frac{m}{s}$]

Z_1 = altura inicial del agua [m]

Z_2 = altura final del agua [m]

g = gravedad [$\frac{m}{s^2}$]

λ = factor de fricción

L = longitud de la manguera [m]

D = diámetro de la manguera [m]

De acuerdo con la configuración del sistema del prototipo del presente trabajo, la ecuación 30 se simplifica a la siguiente expresión:

$$H_b = \frac{V_2^2}{2 * g} + \frac{\lambda + L + V_2^2}{2 * g * D}$$

De acuerdo con el Código Técnico de la Edificación, se estipula que la velocidad de un fluido dentro de un colector solar se encuentra en el rango de $1 - 2.5 \left[\frac{m}{s}\right]$. Para el prototipo del presente trabajo se escoge trabajar con una velocidad de $2.5 \left[\frac{m}{s}\right]$.

Para encontrar las pérdidas por bombeo se calculan las variables faltantes de la siguiente manera:

- Cálculo del número de Reynolds para determinar si el fluido se encuentra en estado laminar o turbulento.

$$R_e = \frac{\rho * D * V_2}{\mu} \quad (31)$$

$$R_e = \frac{1000 * 19.05 * 10^{-3} * 2.5}{1.005 * 10^{-3}} = 47388.06$$

El valor hallado para el número de Reynolds indica que el fluido dentro del sistema se encuentra en estado turbulento, por ende, se calcula el factor de fricción con la siguiente ecuación.

$$\lambda = \frac{1.325}{\left[-\ln\left(\frac{\varepsilon}{3.7 * D} + \frac{5.74}{R_e^{0.9}}\right)\right]^2} \quad (32)$$

Donde:

ε = Rugosidad absoluta de la manguera 0.0015 [mm]

$$\lambda = \frac{1.325}{\left[-\ln\left(\frac{0.0015}{3.7 * 0.01905} + \frac{5.74}{47388.06^{0.9}}\right)\right]^2} = 0.0213$$

Con las variables faltantes calculadas se despeja y se obtiene la pérdida por bombeo.

$$H_b = \frac{2.5^2}{2 * 9.8} + \frac{0.0213 * 60 + 2.5^2}{2 * 9.8 * 0.01905} = 21.71[m]$$

Las pérdidas por bombeo permiten calcular la potencia necesaria para la bomba con la siguiente expresión.

$$P_{bomba} = \frac{Q * \rho * g * H_b}{746 * e} \quad (33)$$

Donde:

Q = Caudal $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

g = Gravedad [$\frac{m}{s^2}$]

ρ = Densidad del agua [$\frac{kg}{m^3}$]

H_b = Pérdidas por bombeo [m]

e = Eficiencia de la bomba

$$Q = V_2 * A \quad (34)$$

$$Q = 1.3 * \frac{\pi * D^2}{4} = 1.3 * \frac{\pi * 0.01905^2}{4} = 7.12 * 10^{-4} \left[\frac{m^3}{s}\right]$$

La potencia mínima que debe tener la bomba es:

$$P_{bomba} = \frac{7.12 * 10^{-4} * 1000 * 9.8 * 21.71}{746 * 0.8}$$

$$P_{bomba} = 0.254 \text{ HP}$$

1.3.4. Consumo eléctrico de la bomba

La bomba disponible en el mercado y que permite satisfacer los cálculos realizados es de 1 HP de potencia. Por ende, el consumo de energía eléctrica se obtiene de la siguiente manera.

$$\text{Consumo eléctrico} = 1 \text{ [Hp]} * \frac{0.7457 \text{ [kw]}}{1 \text{ [Hp]}} * \frac{1}{1 \text{ [h]}} = 0.7457 \left[\frac{\text{kw}}{\text{h}}\right]$$

2. METODOLOGÍA

2.1. Dimensionamiento

Las medidas con las cuales se construye el prototipo están relacionadas directamente al espacio que se requiere para enrollar la manguera, para el presente trabajo se probaron diferentes formas de posicionar la bobina de manguera, y se optó por el dimensionamiento que se muestra en la figura a continuación.

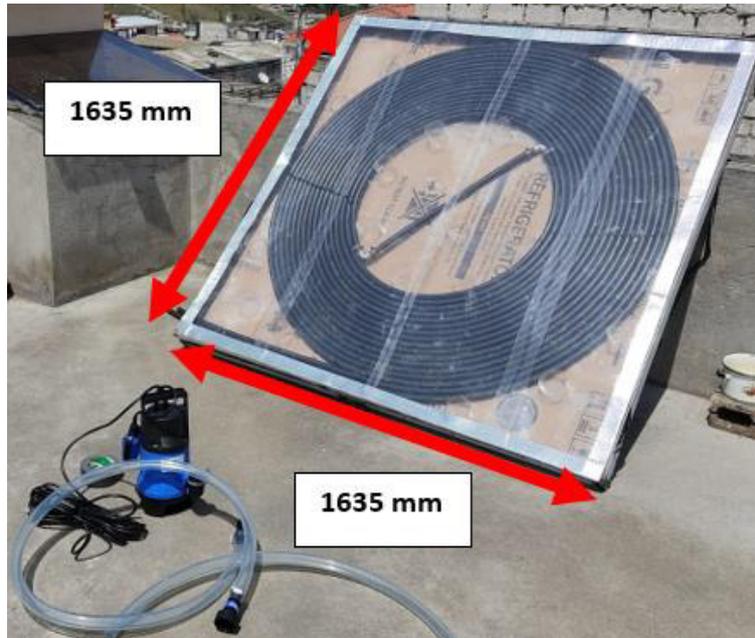


Figura 2.1 – Dimensiones generales del prototipo.

Elaboración: propia

2.2. Construcción

La construcción del prototipo empezó por el corte de la manguera de riego a la longitud de 60m. Esta tarea se facilita por el hecho de que a lo largo de la manguera se presentan marcas separadas a 1m de distancia cada una.



Figura 2.2 – Marcación sobre la manguera.

Elaboración: propia

Con la manguera lista se procede a enrollarla para estimar las dimensiones que va a tener la caja.



Figura 2.3 – Manguera embobinada.

Elaboración: propia

Para asegurar la bobina y evitar que se desenrolle se colocan amarras plásticas que unen cada dos vueltas a la manguera, a parte en cada unión de cada vuelta se colocó una capa de cemento de contacto. Se realizó una configuración que permita tener al mismo nivel tanto la entrada como la salida de la manguera, dicho propósito se logra cortando la manguera por la mitad, enrollando ambos tramos juntos y haciendo la unión de ambos tramos con 2 codos de PVC de $\frac{3}{4}$ " y con 4 uniones flex de $\frac{3}{4}$ ". Como se indica en la siguiente figura.



Figura 2.4 – Unión de ambos tramos de la manguera.

Elaboración: propia

Para la caja se usa el cartón de embalaje de una refrigeradora y se recortan las piezas con las siguientes dimensiones:

- 1 pieza de 1600 * 1600 mm
- 2 pieza de 1600 * 50 mm
- 2 pieza de 1590 * 50 mm



Figura 2.5 – Corte de piezas de cartón para ensamblar la caja.

Elaboración: propia

El proyecto al estar a la intemperie necesita ser impermeable, por ello a cada pieza de cartón se la emplastica con la lámina de PET.



Figura 2.6 – Base de la caja emplastificada.

Elaboración: propia

Con las piezas de cartón emplastadas y la manguera enrollada se realiza el ensamblaje de la caja con la bobina. Para la unión de las paredes con la base de la caja se usó tiras de chova de 10 cm de ancho, estas láminas son ideales para evitar filtraciones de agua al interior de la caja.



Figura 2.7 – Ensamblaje de la caja y la bobina.

Elaboración: propia

Para culminar el prototipo se coloca la cubierta hecha con la misma lámina de PET que se usó para emplastar las piezas de cartón. El prototipo final se aprecia en la siguiente imagen, cabe mencionar que se usaron otros adhesivos para evitar las filtraciones en las uniones del proyecto.



Figura 2.8 – Prototipo final.

Elaboración: propia

La bomba fue conectada mediante una extensión hecha con 2 m de manguera transparente de 1 ¼" y un acople flex de ¾" para la entrada del agua al prototipo. Para la salida también se usó un acople flex de ¾", 1 m de manguera transparente de 1 ¼" y al final se colocó una llave de paso para regular el caudal de salida del agua del colector. Ambas conexiones se muestran en la imagen a continuación.



Figura 2.9 – Mangueras para la conexión de bomba y la salida del prototipo.

Elaboración: propia

Siguiendo todos los procesos detallados anteriormente se finaliza el colector solar de placa plana y queda listo para realizar las pruebas y verificar su funcionamiento.



Figura 2.10 – Prototipo para pruebas.

Elaboración: propia

2.3. Pruebas

Para realizar las pruebas del prototipo se establece un formato que se llena de acuerdo con los datos que se registran conforme avanza el tiempo. Se toman datos cada 10 minutos dentro de las 11:00 am y 13:00 pm, periodo en el cual se observa la mayor cantidad de radiación. Se llena el tanque de reserva hasta alcanzar el volumen de prueba, una vez hecho eso se sumerge la bomba en el recipiente y se acciona levantando el flotador; el caudal es regulado con la apertura de válvula de paso que se encuentra en la manguera de salida del colector. En la siguiente tabla se detallan cada uno de los datos que se registran, con su respectivo instrumento de mediación o fuente de donde se extrajo.

Tabla 2.1. Datos e instrumentación o fuente usados.

DATOS	INSTRUMENTO FUENTE
Tiempo [s]	Cronometro del celular
Temperatura ambiente [°C]	[5]
Temperatura dentro del prototipo [°C]	Termómetro digital
Velocidad del aire [m/s]	[5]
Temperatura del agua de ingreso al colector [°C]	Termómetro digital
Temperatura del agua de salida del colector [°C]	Termómetro digital
Volumen de agua a calentar [m ³]	Recipiente marcado
Caudal [m ³ /s]	Experimentación
Temperatura promedio del agua en el tanque [°C]	Cálculo en Excel

Δ Temp Ambiente y Temp dentro del prototipo [°C]	Cálculo en Excel
--	------------------

Se tomaron datos por cuatro días, durante el periodo de pruebas se experimentaron diferentes condiciones ambientales, por lo cual se estima que los datos fueron los necesarios para proceder al análisis y conclusiones sobre el prototipo.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

- Primer día de pruebas

Tabla 3.1. Datos registrados el primer día de pruebas.

Datos									
Tiempo [s]	Temperatura ambiente [°C]	Temperatura dentro del prototipo [°C]	Velocidad del aire [m/s]	Temperatura del agua de ingreso al colector [°C]	Temperatura del agua de salida del colector [°C]	Volumen de agua a calentar [m³]	Caudal [m³/s]	Temperatura promedio del agua en el tanque [°C]	Δ Temp Ambiente y Temp dentro del prototipo [°C]
1200	17,1	34	1,5	28,7	29,7	0,05	1,00E-05	29,2	16,9
1800	17,1	37,2	1,5	30,8	31,7	0,05	1,00E-05	31,25	20,1
2400	17,1	39,4	1,5	32,7	33,6	0,05	1,00E-05	33,15	22,3
3000	17,1	40,2	1,5	34,6	35,8	0,05	1,00E-05	35,2	23,1
3600	17,1	41,9	1,5	37	37,7	0,05	1,00E-05	37,35	24,8
4200	17,1	44,4	1,5	38,4	38,9	0,05	1,00E-05	38,65	27,3
4800	17,1	46,9	1,5	39,5	40,4	0,05	1,00E-05	39,95	29,8
5400	17,1	47,2	1,5	41,3	42,2	0,05	1,00E-05	41,75	30,1
6000	17,1	50	1,5	43,2	43,7	0,05	1,00E-05	43,45	32,9
6600	17,1	52,1	1,5	44,2	45,1	0,05	1,00E-05	44,65	35
7200	17,1	53,1	1,5	46	53,7	0,05	1,00E-05	49,85	36

Análisis:

La temperatura del agua del suministro de la red en ese día fue de 14.7 °C. El prototipo al estar expuesto a la radiación solar durante las primeras horas de la mañana y al no tener circulando por su interior agua, eleva la temperatura de los elementos en el interior de la caja, por lo que en el momento que se enciende la bomba del colector y se produce la circulación del agua por primera vez se registra una temperatura promedio en el tanque de reserva de 29.2 °C que responde al equilibrio de la temperatura del interior del colector y la temperatura del agua del suministro de la red. Al inicio de la prueba se presentó una fuga en la unión central de la manguera, por lo que se realizó una abertura en la cubierta para solucionar este problema.

Conforme avanza el tiempo se registra una elevación de la temperatura del agua en el tanque de reserva, teniendo como resultado al final del tiempo de prueba una temperatura promedio

del agua en el tanque de reserva de 49.85 °C; lo cual cumple satisfactoriamente con la consigna de alcanzar la temperatura de confort en el agua. Durante las horas de prueba se registró una radiación solar global promedio de 799.9 $\left[\frac{W}{m^2}\right]$.

- Segundo día de pruebas

Tabla 3.2. Datos registrados el segundo día de pruebas.

Datos									
Tiempo [s]	Temperatura ambiente [°C]	Temperatura dentro del prototipo [°C]	Velocidad del aire [m/s]	Temperatura del agua de ingreso al colector [°C]	Temperatura del agua de salida del colector [°C]	Volumen de agua a calentar [m³]	Caudal [m³/s]	Temperatura promedio del agua en el tanque [°C]	Δ Temp Ambiente y Temp dentro del prototipo [°C]
600	15,7	26,1	1,3	21,2	22,1	0,05	1,00E-05	21,65	10,4
1200	15,7	23,5	1,3	23,1	23,6	0,05	1,00E-05	23,35	7,8
1800	15,7	26,2	1,3	24,2	24,6	0,05	1,00E-05	24,4	10,5
2400	15,7	28,4	1,3	25,1	25,6	0,05	1,00E-05	25,35	12,7
3000	15,7	31,6	1,3	26,1	26,7	0,05	1,00E-05	26,4	15,9
3600	15,7	35,5	1,3	27,3	28,4	0,05	1,00E-05	27,85	19,8
4200	15,7	30,6	1,3	29,6	30,1	0,05	1,00E-05	29,85	14,9
4800	15,7	31,7	1,3	30,5	30,9	0,05	1,00E-05	30,7	16
5400	15,7	32	1,3	31,4	31,8	0,05	1,00E-05	31,6	16,3
6000	15,7	34,3	1,3	32,3	33	0,05	1,00E-05	32,65	18,6
6600	15,7	35,1	1,3	33,7	34	0,05	1,00E-05	33,85	19,4
7200	15,7	33,5	1,3	34,3	34,4	0,05	1,00E-05	34,35	17,8

Análisis:

La temperatura del agua del suministro de la red en ese día fue de 14.9 °C. En el momento que se enciende la bomba del colector y se produce la circulación del agua se registra una temperatura promedio en el tanque de reserva de 21.65 °C que responde al equilibrio de la temperatura del interior del colector y la temperatura del agua del suministro de la red. Respecto al primer día de pruebas se aprecia una diferencia de la temperatura de inicio de funcionamiento de 7.55 °C, es coherente ya que durante las horas de prueba la cantidad de radiación fue muy baja, alrededor de 164.8 $\left[\frac{W}{m^2}\right]$.

A pesar de las condiciones de día nublado, conforme avanza el tiempo se registra una elevación de la temperatura del agua en el tanque de reserva, teniendo como resultado al final del tiempo de prueba una temperatura promedio del agua en el tanque de reserva de 34.35 °C; no se logra alcanzar la temperatura de confort, pero la sensación al tacto del agua es bastante agradable.

- Tercer día de pruebas

Tabla 3.3. Datos registrados el tercer día de pruebas.

Datos									
Tiempo [s]	Temperatura ambiente [°C]	Temperatura dentro del prototipo [°C]	Velocidad del aire [m/s]	Temperatura del agua de ingreso al colector [°C]	Temperatura del agua de salida del colector [°C]	Volumen de agua a calentar [m³]	Caudal [m³/s]	Temperatura promedio del agua en el tanque [°C]	Δ Temp Ambiente y Temp dentro del prototipo [°C]
600	17,2	32,8	1,7	27,1	28,4	0,05	1,00E-05	27,75	15,6
1200	17,2	34,2	1,7	29,8	30,5	0,05	1,00E-05	30,15	17
1800	17,2	39,9	1,7	31,3	32,3	0,05	1,00E-05	31,8	22,7
2400	17,2	43,5	1,7	33,4	34,5	0,05	1,00E-05	33,95	26,3
3000	17,2	45,9	1,7	35,6	36,6	0,05	1,00E-05	36,1	28,7
3600	17,2	47,5	1,7	37,6	38,7	0,05	1,00E-05	38,15	30,3
4200	17,2	50,9	1,7	39,8	40,7	0,05	1,00E-05	40,25	33,7
4800	17,2	54,5	1,7	41,7	42,5	0,05	1,00E-05	42,1	37,3
5400	17,2	57,3	1,7	43,3	43,9	0,05	1,00E-05	43,6	40,1
6000	17,2	59,9	1,7	44,5	45,4	0,05	1,00E-05	44,95	42,7
6600	17,2	61,9	1,7	46,3	46,75	0,05	1,00E-05	46,525	44,7
7200	17,2	60,5	1,7	47,2	49,1	0,05	1,00E-05	48,15	43,3

Análisis:

La temperatura del agua del suministro de la red registrada en ese día fue de 14.5 °C. Para cuando se pone en marcha al prototipo y se registra el primer valor, se obtiene una temperatura promedio en el tanque de reserva de 28.4 °C, respecto al primer día de pruebas se aprecia una diferencia de 1.2 °C y respecto al segundo día la diferencia 6.75 °C. Es un día soleado en el cual se registra una radiación solar global promedio de $800.1 \left[\frac{W}{m^2} \right]$.

La diferencia de la cantidad de radiación registrada ese día respecto a la del primer día es casi nula, es por ello por lo que al finalizar el periodo de pruebas de este día se registra una temperatura promedio de 48.15 °C. Esta temperatura se encuentra por encima de la temperatura de confort, lo cual resulta satisfactorio para el objetivo planteado.

Adicional se registra la temperatura del primer instante de la salida del colector del agua y se alcanza una temperatura de 62 °C, este valor permite estimar la temperatura de estancamiento del prototipo.

- Cuarto día de pruebas

Tabla 3.4. Datos registrados el cuarto día de pruebas.

Datos									
Tiempo [s]	Temperatura ambiente [°C]	Temperatura dentro del prototipo [°C]	Velocidad del aire [m/s]	Temperatura del agua de ingreso al colector [°C]	Temperatura del agua de salida del colector [°C]	Volumen de agua a calentar [m³]	Caudal [m³/s]	Temperatura promedio del agua en el tanque [°C]	Δ Temp Ambiente y Temp dentro del prototipo [°C]
600	17,5	47,3	1,9	33,3	34,6	0,05	1,00E-05	33,95	29,8
1200	17,5	48,9	1,9	35,9	37,1	0,05	1,00E-05	36,5	31,4
1800	17,5	50,1	1,9	38,4	39,6	0,05	1,00E-05	39	32,6
2400	17,5	50,8	1,9	40,8	42,07	0,05	1,00E-05	41,435	33,3
3000	17,5	53,8	1,9	43,34	44,1	0,05	1,00E-05	43,72	36,3
3600	17,5	55	1,9	44,9	46,4	0,05	1,00E-05	45,65	37,5
4200	17,5	56,3	1,9	47,9	48,7	0,05	1,00E-05	48,3	38,8
4800	17,5	57,7	1,9	49,5	50,5	0,05	1,00E-05	50	40,2
5400	17,5	59,3	1,9	51,5	52,1	0,05	1,00E-05	51,8	41,8
6000	17,5	60,3	1,9	52,7	53,5	0,05	1,00E-05	53,1	42,8
6600	17,5	61,9	1,9	54,4	55,3	0,05	1,00E-05	54,85	44,4
7200	17,5	63,2	1,9	56,2	58,9	0,05	1,00E-05	57,55	45,7

Análisis:

Para el último día de pruebas se registra una temperatura del agua del suministro de la red de 14.2 °C. Este día se registró el valor más alto de radiación solar global, que promediado durante las horas de prueba fue de 943 $\frac{W}{m^2}$, debido a este alto nivel de radiación, la temperatura promedio del agua en el tanque de reserva para el primer registro fue de 33.95 °C.

El valor registrado de la temperatura del agua del tanque de reserva al final de la jornada de prueba fue de 57.55 °C, obviamente este dato alcanzado cumple con las aspiraciones de obtener agua a temperatura de confort para el uso doméstico y con ello, pues queda comprobado que el prototipo cumple con su principal función.

Al encender por primera vez el prototipo en el último día de pruebas se registra una alta temperatura que bordea los 79 °C, este dato es muy importante a tomar en cuenta para establecer la temperatura de estancamiento del colector.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Es posible diseñar y construir un colector solar de placa plana a partir de materiales reciclables para el calentamiento de agua de uso doméstico, ya que estos tienen características similares a los materiales comúnmente usados en colectores de mayor tecnología, por ende, van a satisfacer las necesidades sin problema alguno dentro del sistema.
- La recolección de los materiales para la construcción del prototipo no es ningún inconveniente, ya que muchos de estos se encuentran en el diario vivir de las

personas y muchas veces en el propio hogar se pueden conseguir. Para el prototipo del presente trabajo tanto botellas para las láminas de PET como el cartón para la caja se obtuvieron del reciclaje en casa de una familia.

- Con la ayuda del programa Inventor se pudo hacer una aproximación del diseño que tendría el prototipo y con ello estimar la cantidad de materiales y espacio físico que ocuparía el prototipo. Al final del trabajo este software permite realizar un plano detallado y brindar la información sobre los requerimientos para la elaboración de próximos sistemas.
- Se logró construir un prototipo con un área de exposición de 1 m^2 y una capacidad de 50 L, dichas dimensiones sirven para hacer un estudio de la configuración planteada y a futuro proyectarlo hacia un proyecto con una mayor área de exposición y almacenaje.
- Se concluye que el prototipo con la configuración y materiales planteados cumple satisfactoriamente con el aprovechamiento de la radiación solar para elevar la temperatura del agua circulante en su interior hasta una temperatura de confort para su aprovechamiento en el uso del hogar. De igual forma con las pruebas realizadas se observa que la temperatura de estancamiento del sistema se encuentra entre los $70 - 80 \text{ }^\circ\text{C}$ y que los materiales con los que se construyó el prototipo soportan sin ningún problema estas condiciones.

4.2. Recomendaciones

- Destinar un lugar de trabajo con el espacio necesario para poder manipular todos los materiales ya que al ser un trabajo con grandes dimensiones se requiere un área considerable para almacenar cada parte del prototipo y para su posterior ensamblaje.
- Para facilitar la construcción de la caja se recomienda hacer el desarrollo de esta en una sola pieza, con ello se evita las dificultades que se presentan al querer colocar las paredes por separado.
- Para moldear las láminas de PET se sugiere el uso de una pistola de calor, ya que, si se pliega este material sin calor, se forman grietas y el material se fractura.
- Para las uniones de las láminas de PET se debe usar un pegamento adecuado que fije correctamente las piezas, no es recomendable el uso de silicona caliente porque no cumple dicha función.
- Previo a la colocación de la cubierta, verificar que todas las uniones de la manguera con los accesorios plásticos se encuentren bien hechas para evitar fugas de agua en el interior de la caja.

- Colocar cinta aislante tipo chova como refuerzo en cada una de las uniones de diferentes piezas, con ello también se asegura que no se produzcan filtraciones hacia el cartón.
- Construir una estructura metálica tipo parrilla para colocar al prototipo en la terraza y evitar que con el tiempo los materiales se pandeen.
- Cabe mencionar que es importante el apoyo a proyectos que permitan desacelerar y porque no frenar el cambio drástico en el clima del mundo entero. Optar por una economía circular y el aprovechamiento de lo que consideramos desechos, ayudan para alcanzar este objetivo. Si se quieren ver cambios, iniciativas como estas se deben aplicar no solo a un núcleo familiar, sino a una colectividad y que poco a poco se vayan sumando las distintas localidades.

REFERENCIAS

- [1] M. P. Aparicio, Radiación solar y su aprovechamiento energético, Barcelona: Marcombo, 2010.
- [2] C. Lema y D. Zuleta, "Solmáforo (Semáforo Solar): Modelo ambiental de alerta por exposición a la radiación solar en Quito, " Quito, 2015.
- [3] T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera y D. P. DeWitt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Wiley, 2012.
- [4] M. Martínez, "Radiación Solar - Conceptos y aplicaciones, " *Informativo INIA-URURI*, vol. 58, nº 109, pp. 3-4, 2016.
- [5] D. Revelo y F. Ordóñez, "meteo-scinergy.epn.edu.ec, " 2019. [En línea]. Available: <https://meteo-scinergy.epn.edu.ec/mapa-solar>. [Último acceso: 25 Noviembre 2021].
- [6] A. Varela y S. Ron, "bioweb.bio, " 23 Noviembre 2020. [En línea]. Available: <https://bioweb.bio/fungiweb/GeografiaClima/>. [Último acceso: 30 Noviembre 2021].
- [7] "IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, " [En línea]. Available: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/generalidades-de-la-radiacion-ultravioleta#:~:text=La%20altitud%20tambi%C3%A9n%20determina%20la,mayor%20altitud%20mayor%20radiaci%C3%B3n%20UV..> [Último acceso: 25 Noviembre 2021].
- [8] W. Carrión, W. Murillo y A. Montero, "A review of the state-of-the-art of solar thermal collectors applied in the industry, " *INGENIUS*, nº 27, 2022.
- [9] O. García y I. Pilatowsky, Aplicaciones térmicas de la energía solar en los sectores residencial, servicios e industria, Ciudad de México, 2017.
- [10] L. Rodríguez, M. Chávez, F. Lartategui y A. d. P. Letona, "Factibilidad de uso del PET reciclado en elementos de cubiertas y envolventes, " *Ingeniería*, nº 27, pp. 40-55, 2017.
- [11] A. Fasulo y D. Perelló, "Comparación de las transmitancias de policarbonato y vidrio, " *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. V, 2001.
- [12] "agrosistemas.com.ec, " [En línea]. Available: <https://www.agrosistemas.com.ec/>. [Último acceso: 22 Junio 2021].

- [13] R. Almanza y F. Muñoz, Ingeniería de la energía solar, Ciudad de México, 1994.
- [14] J. Duffie y W. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, New Jersey: Wiley, 2013.
- [15] C. Charles y A. Thomas, "Design application of the Hottel-Whillier-Bliss equation, " *Solar Energy*,, vol. IXX, nº 2, pp. 109-113, 1977.
- [16] C. Corp, Interviewee, *Colectores solares*. [Entrevista]. 18 Junio 2019.
- [17] I. d. C. d. I. C. E. Torroja, "codigotecnico.org, " 2006. [En línea]. Available: <https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/DocumentosCTE.html>. [Último acceso: 10 Noviembre 2021].
- [18] F. Kreith, R. Manglik y M. Bohn, Principios de la transferencia de calor, Ciudad de México: Cengage Learning, 2012.

ANEXOS

- Costos de los materiales para la construcción del prototipo

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	COSTO
100 mts	Rollo de manguera negra de PE	35
1 u	Bomba sumergible 1HP	60
7 kg	Rollo de lámina de PET, ancho = 50 cm	37,5
1 u	Cartón de embajale de refrigeradora	0
2 u	Rollo de lámina CHOVA	15
1 u	Accesorio plásticos para conexiones	11,35
1 u	Pegamento para acrilico	7,8
2 u	Cinta ploma para filtraciones	9,6
TOTAL		176,25

- Fotografías de las pruebas realizadas

Primer día de pruebas

Primer dato de temperatura del agua en el tanque de reserva	Dato de temperatura del agua en el tanque de reserva al finalizar el periodo de prueba
	

Segundo día de pruebas

Primer dato de temperatura del agua en el tanque de reserva	Dato de temperatura del agua en el tanque de reserva al finalizar el periodo de prueba
	

Tercer día de pruebas

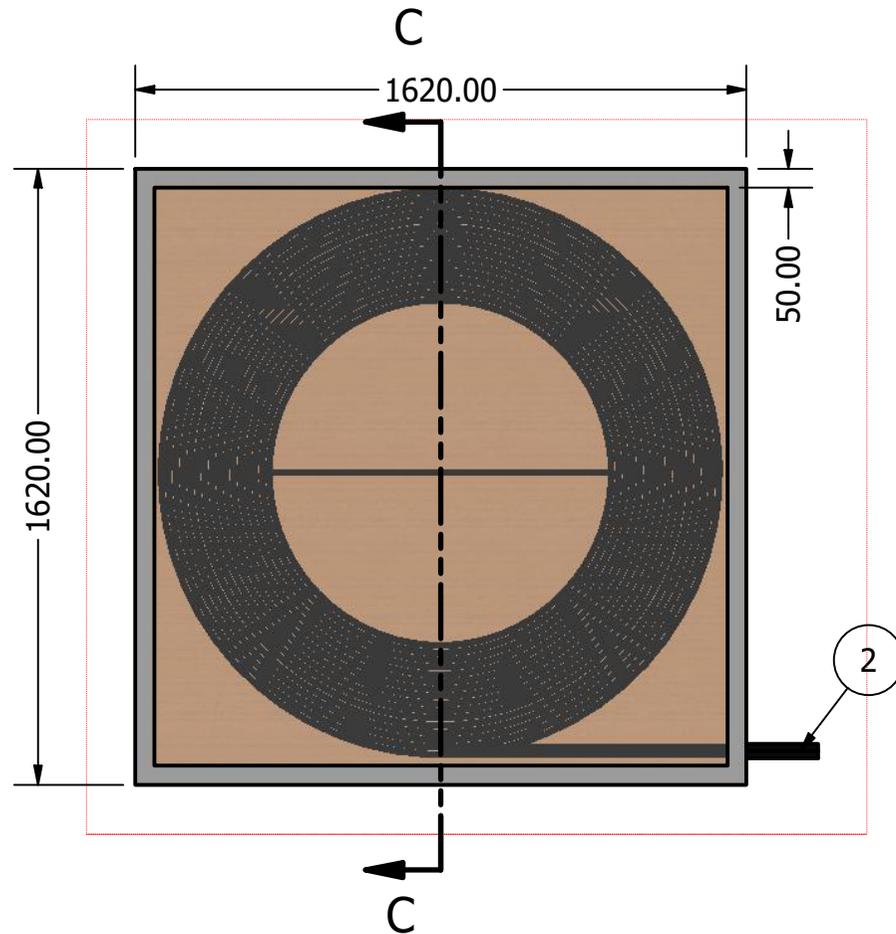
Primer dato de temperatura del agua en el tanque de reserva	Dato de temperatura del agua en el tanque de reserva al finalizar el periodo de prueba
	

Cuarto día de pruebas

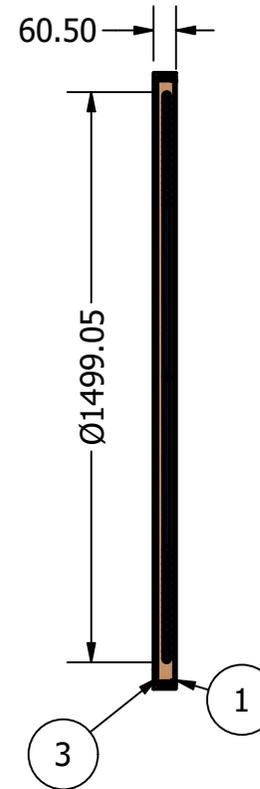
Primer dato de temperatura del agua en el tanque de reserva	Dato de temperatura del agua en el tanque de reserva al finalizar el periodo de prueba
	

Temperatura de estancamiento





SECTION C-C
SCALE 1 / 20



LISTADO DE PARTES			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	Caja de cartón	1600 x 1600
2	1	Serpenti n de PE	60 m
3	1	Cubierta de PET	1600 x 1600
4	1	Recubri miento de chova	

TRAT. TÉRM.	N/A	E.P.N.	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA				
RECUBRIM.	N/A						
MATERIAL	VARIOS	TOL. GRAL.	± 5	ESCALA:	1:20	DIB.	MARCOS SANTILLÁN
COLECTOR SOLAR				N/A		DIS.	MARCOS SANTILLÁN
						REV.	FÍS. MARCO YÁNEZ
						FECHA:	14/03/22