

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA TORRE SOLAR A ESCALA
PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN COLECTOR DE UNA TORRE
SOLAR A ESCALA PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA
ELÉCTRICA**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
MECÁNICA**

CHRISTIAN FABRICIO ESCOBAR LOMAS

christian.escobar@epn.edu.ec

DIRECTOR: Ing. ÁNGEL ADALBERTO PORTILLA AGUILAR Msc

angel.portilla@epn.edu.ec

DMQ, agosto 2023

CERTIFICACIONES

Yo, CHRISTIAN ESCOBAR declaro que el trabajo de integración curricular 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.

CHRISTIAN ESCOBAR LOMAS

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por CHRISTIAN ESCOBAR, bajo mi supervisión.

ÁNGEL PORTILLA AGUILAR
DIRECTOR

Certificamos que revisamos el presente trabajo de integración curricular.

NOMBRE DEL REVISOR 1
REVISOR1 DEL TRABAJO DE
INTEGRACIÓN CURRICULAR

NOMBRE DEL REVISOR 2
REVISOR2 DEL TRABAJO DE
INTEGRACIÓN CURRICULAR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como los productos resultantes del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

CHRISTIAN FABRICIO ESCOBAR LOMAS

ÁNGEL ADALBERTO PORTILLA AGUILAR

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a mi familia que me apoyo en todo momento siempre estuvieron ahí de forma incondicional, en especial a mis Padres y Narcisa por ayudarme en todo mi camino universitario y en toda mi vida, así mismo a mis hermanos Bolívar y Jessica por ayudarme cuando lo necesitaba, así también a varios amigos con los que pude contar Daniel, Darío, José, Wesley, así como mis compañeros de carrera, Ricardo y Víctor.

El camino fue largo, pero no imposible, ni el cielo es el límite.

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a la Escuela Politécnica Nacional la mejor universidad del País, por darme la dicha de poder forjarme como ingeniero tanto en la parte profesional que ayudan a sobre salir en el campo laborar.

A mis profesores que me enseñaron que el papel aguanta todo, pero debes tener sentido común para realizar varias tareas.

Al Ing. Ángel Portilla que no solo fue mi director de tesis sino también mi tutor académico en todo el trayecto de la carrera, quien me aconsejo y supo mostrarme el camino para poder realizar este trabajo.

A mis padres que siempre me dieron la mano cuando se trataba de asuntos de la universidad pues esta es la mejor herencia que te pueden dar.

A mis hermanos que siempre me dieron la mano cuando necesitaba de ellos.

A todos mis compañeros con los que atravesamos juntos este camino, y a mis amigos que ya sean de la universidad o no aportaron algo para poder seguir adelante.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Contenido

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
1. DESCRICION DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo general.....	1
1.2 Objetivos Específicos.....	1
1.3 Alcance.....	1
1.4 Marco teórico.....	2
1.4.1 Torre solar	2
1.4.2 Energía Solar	3
1.4.3 Radiación Solar en el Planeta	3
1.4.4 Mecanismos de transferencia de Calor	6
1.4.5 Interacción de radiación con objetos	7
1.4.6 Condiciones ambientales	8
2. Metodología.....	11
2.1 Partes del colector y definición de variables.....	11
2.2 Balance de energía.....	12
2.2.1 Balance de ecuaciones parte externa de la cubierta (NODO 1) .	13
2.2.2 Balance de ecuaciones temperatura intermedia cubierta y placa absorvedora (NODO 2).....	13
2.2.3 Balance de ecuaciones parte externa placa absorvedora (NODO 3)	13
2.2.4 Balance de ecuaciones temperatura intermedia placa absorvedora y tierra (NODO 4).....	13
2.2.5 Balance de ecuaciones tierra (NODO 6).....	13
2.2.6 Sistema de ecuaciones.....	13
2.2.7 Coeficiente hw y hrs.....	13

2.2.8	Coefficiente de transferencia de calor(h_1, h_2, h_3 y h_4).....	13
2.2.9	Coefficiente de transferencia de calor del suelo	22
2.2.10	Coefficiente de transferencia de calor placas paralelas.....	23
2.2.11	Flujo másico.....	23
2.2.12	Constante.....	23
2.2.13	Formula S1.....	24
2.2.14	Formula S2	24
2.2.15	Vsalida.....	24
3.	DIMENSIONAMIENTO PRUEBAS, RESULTADOS RECOMENDACIONES Y RECOMENDACIONES.....	25
3.1.1	Solución del sistema de ecuaciones.....	25
	Calcular calcular h_w	26
	Calcular coeficiente h_{rs}	26
	Calcular coeficiente de transferencia de calor conveccion(h_1, h_2, h_3 y h_4).....	26
	Calcular coeficiente de transferencia de calor del suelo	26
	Calcular coeficiente h_{r21} entre 2 placas paralelas.....	28
	Calcular flujo masico.....	28
	Calcular constante.....	28
	Calcular S1.....	28
	Calcular S2.....	28
	Calcular Vsalida.....	28
3.1.2	Selección de altura y diámetro.....	29
3.2	Protocolo de pruebas.....	29
3.3	Resultados.....	31
3.3.1	Pruebas de funcionalidad.....	31
3.3.2	Errores	33
3.4	Conclusiones.....	34
3.5	Recomendaciones.....	34
4	REFERENCIAS.....	35
5	ANEXOS.....	37

RESUMEN

El trabajo realizado en este documento tiene como objetivo principal diseñar y construir el colector de la torre solar a escala para la generación de energía eléctrica, conociendo las características ambientales como son temperatura, velocidad del viento y radiación solar. Para lo cual se plantea un modelo matemático, el cual busca encontrar la temperatura del fluido de trabajo a la salida del colector en función del área del colector, la radiación global del sector en donde se ubique este. El colector es el encargado de concentrar la energía solar y con está mediante mecanismos de transferencia de calor como radiación y convección, el aire que pasa a sobre la superficie absorbedora se calienta, lo cual produce un cambio de densidades, este al ser un fluido y aumentar la temperatura tiene como consecuencia el aumento de la velocidad del aire. Al obtener el modelo matemático se procede a realizar el dimensionamiento y la construcción del colector solar el mismo que consta de una superficie absorbedora y una cubierta transparente la cual debe tener un material el cual facilita el paso de rayos solares.

Con el modelo matemático y los datos experimentales del prototipo se obtienen los errores y promedio de errores del 10% siendo este un valor aceptable en diseños térmicos

PALABRAS CLAVE: colector solar, densidades, radiación, convección.

ABSTRACT

The main objective of the work carried out in this document is to design and build the collector of the solar tower to scale for the generation of electrical energy, knowing the environmental characteristics such as temperature, wind speed and solar radiation. For which a mathematical model is proposed, which seeks to find the temperature of the working fluid at the collector outlet based on the collector area, the global radiation of the sector where it is located. The collector is in charge of concentrating solar energy and with it, through heat transfer mechanisms such as radiation and convection, the air that passes over the absorbing surface is heated, which produces a change in densities, this being a fluid and increasing the temperature results in an increase in air velocity. When obtaining the mathematical model, the sizing and construction of the solar collector is carried out, which consists of an absorbing surface and a transparent cover which must have a material which facilitates the passage of solar rays.

With the mathematical model and the experimental data of the prototype, the errors and average errors of 10% are obtained, this being an acceptable value in thermal designs.

KEYWORDS: solar collector, densities, radiation, convection.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

Para realizar el diseño y construcción de un colector de una torre solar a escala para la generación de energía eléctrica, al identificar los mecanismos de transferencias de calor y balance de energía en diferentes partes del colector aplicando la primera ley de la termodinámica se desarrolla un modelo matemático, con la ayuda de las ecuaciones de transferencia de calor se determinan los coeficientes de convección, radiación y pérdidas que existen en el proceso de funcionamiento del colector.

Se realiza la simulación, el dimensionamiento y así se procede a la selección de materiales y a la construcción de este.

Se concluye con pruebas de funcionalidad y se comparan los valores teóricos de la simulación del modelo matemático vs los valores experimentales a las mismas condiciones para conocer el error.

1.1 Objetivo general

Diseñar y construir un colector a escala de una torre solar para la generación de energía eléctrica.

1.2 Objetivos específicos

1. Establecer las características de funcionamiento del colector de una torre solar.
2. Determinar los mecanismos de transferencia de calor presentes.
3. Desarrollar el modelo matemático para el dimensionamiento
4. Dimensionar y elaborar planos
5. Construir el colector Solar
6. Evaluar el desempeño del colector

1.3 Alcance

El diseño y construcción del colector solar a escala para la generación de energía eléctrica consiste en el uso solo de energía solar y un flujo de aire, para este prototipo se busca incrementar la velocidad del fluido de trabajo a aproximadamente $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ para lo cual se utiliza una superficie absorbadora con alta emisividad con un valor muy cercano a 1 eso se obtiene utilizando una superficie metálica con una pintura negra sobre esta, se busca

aumentar la temperatura de la placa absorbidora hasta 60°C y así cambiar la densidad del aire que se dirige a la chimenea y genera electricidad.

Al tratarse de un prototipo demostrativo se va a comparar estos valores experimentales vs los valores obtenidos del modelo matemático mediante una simulación y conocer el error.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Torre solar

La torre solar o también conocida como chimenea solar es un equipo el cual es utilizado para la generación de energía eléctrica este equipo utiliza la energía solar y la convección para la generación de corrientes de aire, la torre solar consta de las siguientes partes como se observa en la figura 1 [1]:

1. Colector
2. Chimenea o torre
3. Turbinas

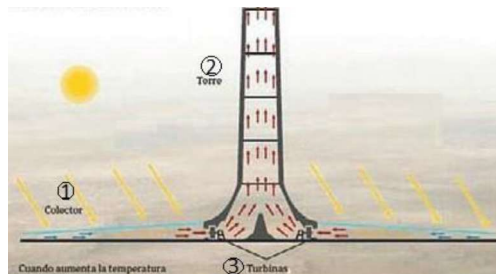


Figura 1. Torre solar [2]

El principio de funcionamiento de la torre solar se basa en el calentamiento de aire que ingresa y mediante la radiación solar la cual se almacena en la base del colector el aire se calienta se vuelve más liviano y hace que suba por la chimenea donde el aire aumenta su velocidad y mueve la o las turbinas y así generan la energía eléctrica [1].

Este trabajo de integración corresponde al diseño y construcción del colector solar, se describe a continuación la teoría necesaria para su dimensionamiento.

- **Colector solar**

Los colectores solares son dispositivos diseñados para la captación de radiación solar y transformarla en energía térmica y esta es transferida a un fluido en este caso a aire

mediante los mecanismos de transferencia de calor y así utilizar el fluido en diferentes aplicaciones [1].

- **Chimenea**

La chimenea es una parte de la torre solar de tiro ascendente, el aire que es calentado del colector se va a tener dirección hacia la chimenea, donde la diferencia de flotabilidad entre el aire caliente y la atmósfera circundante y así se crea una diferencia de presión que impulsa el aire por la chimenea.

- **Turbina**

Una turbina es una máquina la que aprovecha la energía cinética de un fluido de trabajo y la transforma en energía mecánica rotativa que a su vez es transformada en energía eléctrica, con la ayuda de un generador [3].

1.4.2 Energía Solar

La energía solar es una energía renovable obtenida a partir de la radiación electromagnética del Sol, la principal función en un colector solar absorber la energía y así calentar el fluido de trabajo con el propósito de generar energía eléctrica.

1.4.3 Radiación Solar en el Planeta

Es la energía emite el sol, la cual no necesita un medio para transmitirse esta energía utiliza ondas electromagnéticas, la radiación electromagnética es emitida con una velocidad de 299.792 Km/s conocida como velocidad de la luz [4], la radiación en la superficie del sol es de 63.450.720 W/m² y así como la energía que llega a la tierra en una superficie perpendicular se considera una cantidad fija, se conoce a esta como constante solar y está en el rango de (1400-1310) W/m² y se toma un promedio de 1353 W/m² [5]. Esta energía llega a la superficie de la tierra por medio de rayos solares esta radiación puede ser directa, difusa y global.3

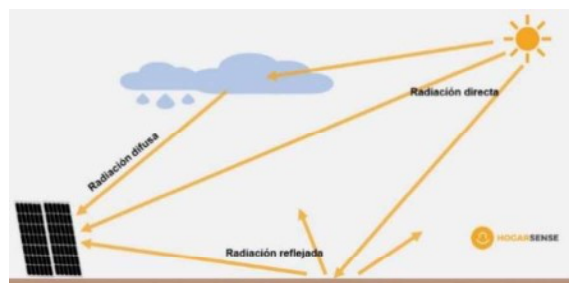


Figura 2. Tipos de radiación solar [6]

- **Radiación solar directa (ID)**

Esto sucede cuando la radiación pasa de manera directa por la atmósfera sin tener interrupción de ninguna manera, la interrupción puede ser nubes, pájaros, así como otro tipo de objetos, es decir los rayos son perpendiculares a la superficie [6].

- **Radiación solar difusa (Id)**

La radiación difusa es la radiación que ha sido dispersa es decir cuando esta antes de llegar a la superficie tuvo contacto con algún otro objeto como nubes, arboles, pájaros, entre otros [6].

- **Radiación solar reflejada (IR)**

Radiación solar reflejada se produce cuando después de haber sido reflejada o difundida por la atmósfera y por la superficie terrestre esta radiación se dirige hacia arriba [6].

- **Radiación Global (G)**

La irradiancia global se conoce como la sumatoria de la radiación difusa y la directa la cual incide en un lugar determinado.

$$G = ID + Id + IR$$

Ecuación 1: Radiación global [7]

Donde:

G: radiación solar global [W/m^2]

ID: radiación solar directa [W/m^2]

Id: radiación solar difusa [W/m^2]

IR: radiación solar reflejada [W/m^2]

- **Radiación Global Horizontal (GHI)**

Se conoce a la radiación global horizontal como la suma de la radiación directa medida de forma horizontal sumada con la radiación difusa.

$$GHI = IDh + Id$$

Ecuación 2: Radiación global horizontal [7]

Donde:

GHI: radiación global horizontal [W/m^2]

IDh: radiación solar directa medida de forma horizontal [W/m^2]

Id: radiación solar difusa [W/m^2]

- **Equipos de medición**

Entre los equipos que se utilizan para medir la radiación solar se tienen los siguientes que se enlistan en la tabla 1.

Tabla 1. Elementos meteorológicos de radiación [8]

Tipo de Instrumento	Parámetro de medida
Piranómetro	Radiación Global
Piranómetro absoluto	Radiación directa (usada como patrón nacional)
Pirheliómetro de incidencia normal	Radiación directa (usada como patrón secundario)
Pirheliómetro (con filtros)	Radiación directa en bandas espectrales anchas
Actinógrafo	Radiación directa
Pirgeómetro	Radiación difusa
Radiómetro neto	Radiación Neta
Heliógrafo	Brillo solar

- **Piranómetro**

Se conoce al piranómetro por ser equipo de medición de radiación más usado, este sirve para medir la radiación global horizontal, su principio de funcionamiento se basa que en la parte interna del instrumento se encuentra la pila termoeléctrica la cual tiene por secciones de colores blancas (frías) y negras (calientes), esta puede absorber la radiación y estos son transformados en voltaje para indicar la cantidad de radiación que existe en ese lugar. , para evitar pérdidas por el ambiente se procede a cubrir esto con un cristal en forma de cúpula de vidrio óptico transparente para proteger el detector, permite la transmisión isotrópica del componente solar y las longitudes de onda en las que trabaja oscilan entre 280 y 2.800 nm. [9] En la figura 3 se muestra un piranómetro.



Figura 3. piranómetro [9]

1.4.4 Mecanismos de transferencia de Calor

- **Convección**

La convección es un mecanismo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el fluido adyacente que está en movimiento [10].

La convección forzada es cuando el fluido es obligado a fluir puede ser un tubo o como un ventilador. Por otro lado, se dice que es convección libre si el movimiento del fluido es producido por las fuerzas de flotación las cuales son inducidas por diferencias de densidad” [10].



Figura 4. Actinógrafo [11]

$$q_{conv} = h * A_s * (T_s - T_{\infty})$$

Ecuación 3: Transferencia de calor por convección [10]

Donde:

q_{conv} = flujo de calor por convección [W]

h : coeficiente de convección $\left[\frac{W}{m^2K} \right]$

A_s : área de superficie en contacto [m^2]

T_s : temperatura de superficie [K]

T_{∞} : temperatura ambiente [K]

- **Radiación**

Este mecanismo de transferencia de calor es producido por radiación electromagnética la cual es emitida por todos los cuerpos que tengan una temperatura mayor a 0K. Es transferida mediante ondas electromagnéticas ya que no necesitan un medio para transportarse, el calor se transmite desde el cuerpo que tiene mayor temperatura hacia el de menor temperatura.

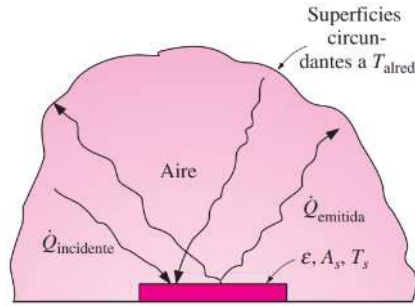


Figura 5. Transferencia de calor por radiación [10]

$$q_r = \varepsilon * A * \sigma(T_s^4 - T_{al}^4)$$

Ecuación 4: Transferencia de calor por radiación [10]

q_r : flujo de calor por radiación [W]

ε : emisividad de la superficie entre 0 y 1

A : área de la superficie [m^2]

T_s : temperatura de la superficie [K]

T_{al} : temperatura del alrededor [K]

- **Emisividad**

La emisividad es la propiedad que relaciona la radiación emitida por un cuerpo o superficie en una determinada temperatura y la radiación emitida por un cuerpo negro en la misma temperatura, este valor puede ser entre $0 < \varepsilon < 1$.

1.4.5 Interacción de radiación con objetos

La interacción de la radiación con los objetos se divide en absortividad, reflectividad y transmisividad, se observa en la figura 6.

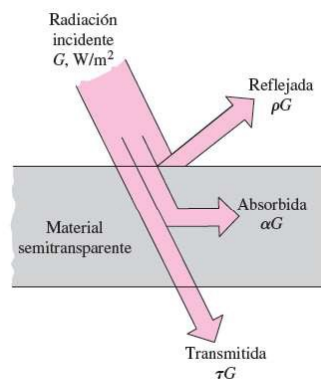


Figura 6. Radiación en placa semitransparente [10]

Relación entre absorptividad, reflectividad y transmisividad todas estas son globales.

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

Ecuación 5: Interacción de radiación con objetos [10]

Donde:

α : *absortividad*

ρ : *reflectividad*

τ : *transmisividad*

- **Transmisividad τ**

Se define como la cantidad de energía en forma de radiación que atraviesa un material con respecto a la cantidad total de radiación incidente, se conoce que, para elementos como el vidrio, así como algunos plásticos este valor se aproxima a la unidad.

- **Reflectividad ρ**

Se conoce como la relación de radiación reflejada a un cuerpo con respecto a la radiación incidente del mismo.

- **Absortividad α**

Se define como la cantidad de energía en forma de radiación que absorbe un cuerpo con respecto a la radiación incidente del mismo.

1.4.6 Condiciones ambientales

Para el diseño del colector se deben obtener datos del lugar en el cual será utilizado el prototipo, estos son:

- Temperatura ambiente
- Velocidad de viento
- Radiación
- **Temperatura ambiente**

Se conoce a la temperatura ambiente como la temperatura que rodea a un entorno o un objeto, para medir esta temperatura se debe tener en cuenta la radiación térmica de los objetos como a si mismo radiación de las superficies aledañas. Esta temperatura se mide directamente por un termómetro.

La temperatura promedio de quito se puede mostrar en la figura 7 la temperatura promedio es de 11,7 °C. [12]

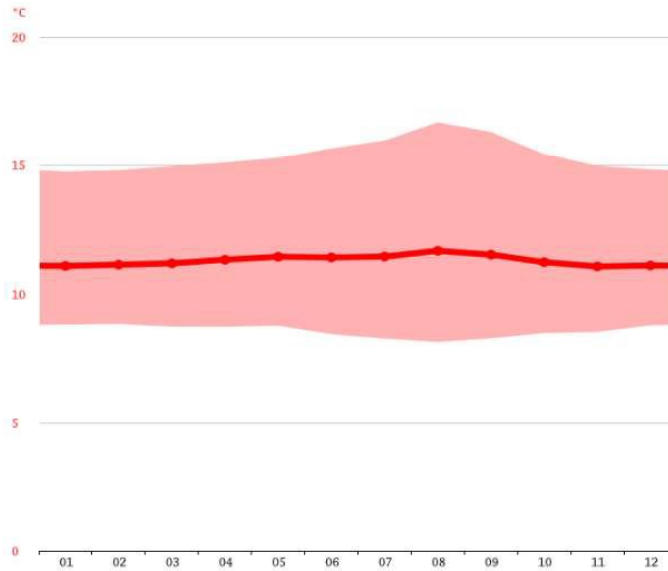


Figura 7. Temperatura anual de quito [12]

- **Velocidad del viento**

La velocidad del viento o también conocido como el aire en movimiento, se conoce como la distancia del viento que recorre en un intervalo de tiempo [13]

La velocidad promedio se puede observar en la figura 8 media a 2794 m sobre el nivel del mar y un promedio de $8.2 \frac{km}{h}$ o $2.2 \frac{m}{s}$.



Figura 8. Velocidad del viento anual de quito [14]

- **Radiación**

Los valores de radiación obtenidos del satélite se modifican mediante imágenes visibles a su vez como imágenes en infrarrojo y esto ayuda a que los valores sean complementados se observan en la tabla 1.1

Tabla 1.1. Radiación Global quito en superficie horizontal [14]

RADIACIÓN GLOBAL ANUAL MEDIA PARA SUPERFICIE HORIZONTAL					
		Observaciones en superficie	Observaciones satélites	Estaciones programa Informático	Estaciones modelo matemático
PARROQUIA	PROVINCIA	estación Met OCP	NASA	CENSOLAR	ANSTRONPAGE
Nueva Loja	Sucumbíos	3,42	3,76	3,64	4,92
Lumbaqui	Sucumbíos	3,65	4,24	3,64	4,97
El Reventador	Sucumbíos	2,79	3,88	4,8	4,97
El Reventador	Sucumbíos	2,43	3,88	4,99	4,97
Gonzalo Díaz de Pineda	Napo	3,35	3,88	3,44	4,97
Santa Rosa	Napo	3,32	3,88	3,44	4,97
San Francisco	Napo	3,47	3,88	4,01	4,31
Papallacta	Napo	3,46	4,25	4,01	4,31
Yaruqui	Pichincha	4,61	4,25	4,34	4,31
Nono	Pichincha	2,99	4,25	4,99	4,31
Pedro Vicente	Pichincha	2,54	3,96	3,64	4,97
Puerto Quito	Pichincha	3,02	4,2	4,78	4,97
Rosa Zarate	Esmeraldas	3,2	4,2	4,61	4,97
Viche	Esmeraldas	3,22	4,2	4,61	4,97
Vuelta larga	Esmeraldas	3,21	4,2	3,86	4,97

Se observan que los valores de radiación sobre una superficie horizontal todos son obtenidos en el mismo lugar, estos valores son promedios de un año.

2 METODOLOGÍA

En este apartado se desarrolla el modelo matemático para dimensionar el colector de la torre solar a escala para la generación de energía eléctrica.

En el diagrama de flujo de la figura 9 se describe los pasos a seguir para el desarrollo del trabajo.

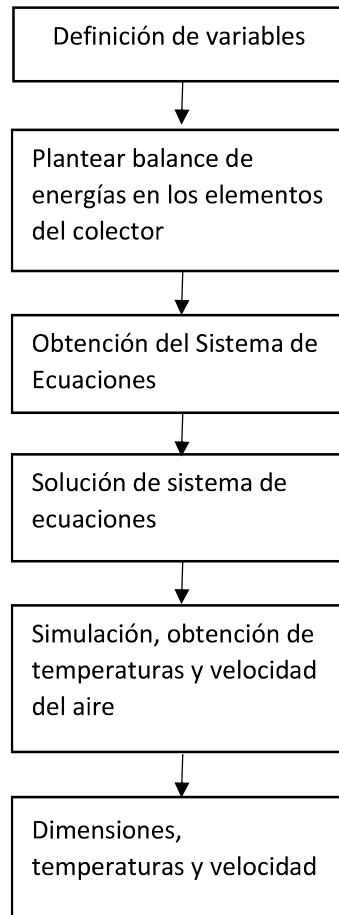


Figura 9. Diagrama de flujo de la solución [fuente propia]

2.1 Partes del colector y definición de variables

En la figura 9 se puede observar las partes del colector solar y las variables involucradas en el proceso de transferencia de calor.

En el colector la placa absorbidora va a ser calentado por energía solar y el aire al tener contacto con la superficie caliente cambiará su densidad lo que provoca que el aire se mueva por el cambio de densidades y tiro de la chimenea a subir que permitirá mover la turbina que generará energía eléctrica.

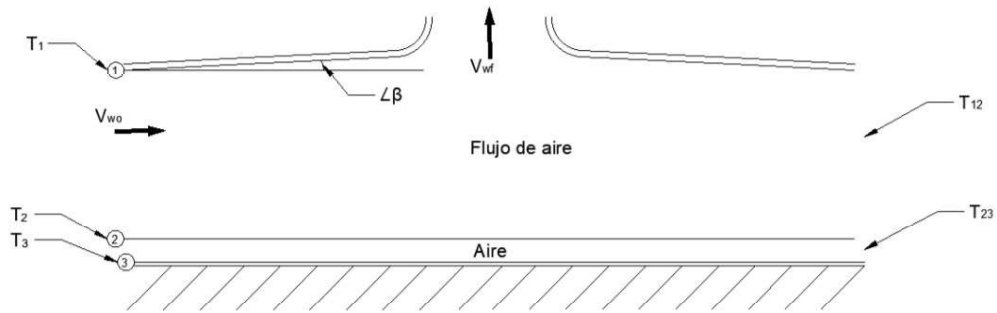


Figura 10. Colector solar y sus partes [15]

Partes:

1. Cubierta transparente
2. Placa absorbedora
3. Tierra

Variables

- Temperatura cubierta transparente T_1
- Temperatura placa absorbedora T_2
- Temperatura tierra T_3
- Velocidad del flujo de aire entrada V_{w0}
- Velocidad del flujo de aire a la salida V_{wf}
- Temperatura intermedia placa absorbedora y cubierta T_{f1}
- Temperatura intermedia placa absorbedora y tierra T_{f2}

2.2 Balance de energía

Para desarrollar el modelo matemático del colector solar se tiene en cuenta las siguientes consideraciones.

- El colector tiene una sola cubierta transparente
- El flujo de calor es unidireccional

En la figura 11 se muestra el flujo de energía a la izquierda, así como su circuito térmico equivalente a la derecha.

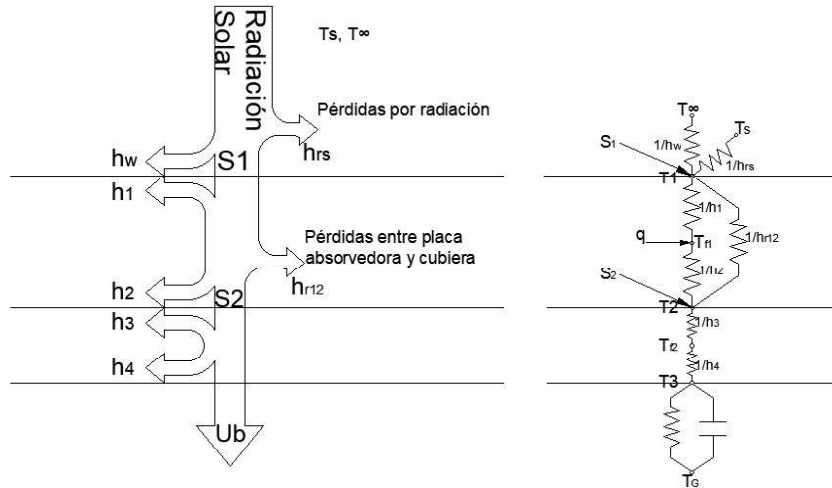


Figura 11. Diagrama de flujo y sistema equivalente de resistencias térmicas

Para obtener el modelo matemático se aplica la primera ley de la termodinámica o la conservación de la energía en las diferentes partes del colector [16]

$$E'_{en} + E'_g = E'_a + E'_{sa}$$

Ecuación 6: ecuación primera ley de la termodinámica [10]

Donde:

E'_{en} : energía que entra [W]

E'_g : energía generada en el sistema [W]

E'_{sa} : energía que sale [W]

E'_a : energía que se almacena [W]

Para comenzar con el modelo matemático se divide el circuito equivalente térmico por nodos como lo tenemos a continuación.

2.2.1 Balance de ecuaciones parte externa de la cubierta (NODO 1)

Aplicando el balance de energías en el nodo 1 se observa en la figura 12

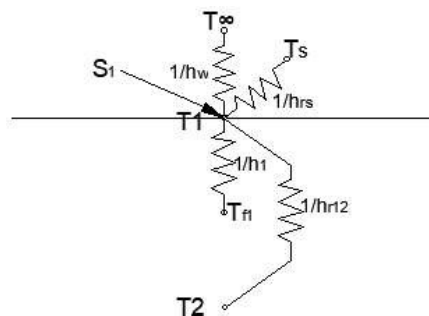


Figura 12. Sistema de resistencias térmicas nodo 1

$$S_1 + h_{r21} * (T_2 - T_1) + h_1 * (Tf_1 - T_1) = h_w * (T_1 - T_\infty) + h_{rs} * (T_1 - T_s)$$

Ecuación 7: balance de energía nodo 1

Donde:

S_1 : Flujo de calor absorbido por la cubierta $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

h_{r21} : coeficiente de transferencia por radiacion entre cubierta y placa absorbedora $\left[\frac{W}{m^2 * K}\right]$

T_2 : temperatura placa absorbedora [K]

T_1 : temperatura cubierta [K]

h_1 : coeficiente de transferencia de calor interna por conveccion cubierta $\left[\frac{W}{m^2 * K}\right]$

Tf_1 : temperatura intermedia placas paralelas [K]

h_w : coeficiente de transferencia de calor externa por conveccion de la cubierta $\left[\frac{W}{m^2 * K}\right]$

T_∞ : temperatura ambiente [K]

h_{rs} : coeficiente de transferencia de calor por radiación del cielo $\left[\frac{W}{m^2 * K}\right]$

T_s : temperatura cielo [K]

2.2.2 Balance de ecuaciones temperatura intermedia cubierta y placa absorbedora (NODO 2)

El balance de energías en el nodo 2 observado en la (figura 13), se obtiene la ecuación 8.

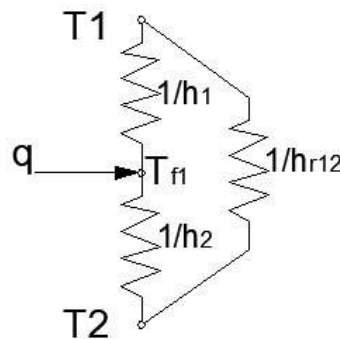


Figura 13. Sistema de resistencias térmicas nodo 2

$$h_1 * (T_1 - Tf_1) = h_2 * (Tf_1 - T_2) + q$$

Ecuación 8: balance de energía nodo 2

Donde:

h_2 : coeficiente de transferencia de calor por interna conveccion placa absorvedora $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$

q : calor transferido al aire del colector $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

- **Calor útil transferido**

El calor útil transferido al aire por medio de la placa absorbedora se escribe en términos de temperatura de entrada y salida y flujo masico medio.

$$q = \frac{\dot{m} * c_p}{\pi * r * L} * (T_f - T_{f,i})$$

Ecuación 9: calor útil transferido al aire del colector

Donde:

q : calor útil transferido al aire del colector $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

\dot{m} : flujo masico del aire $\left[\frac{Kg}{s}\right]$

c_p : calor específico $\left[\frac{J}{Kg \cdot K}\right]$

r : radio del colector [m]

L : altura del colector [m]

T_f : temperatura media [K]

$T_{f,i}$: temperatura media entrada de la sección del colector [K]

- **Flujo masico**

$$\dot{m} = \rho * (v * A)$$

Ecuación 10: flujo masico

Donde

\dot{m} : flujo masico $\left[\frac{kg}{s}\right]$

ρ : densidad $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

A : área [m²]

2.2.3 Balance de ecuaciones parte externa placa absorbedora (NODO 3)

El balance de energías en el nodo 3 que se observa en la figura 14 se obtiene de la ecuación 11.

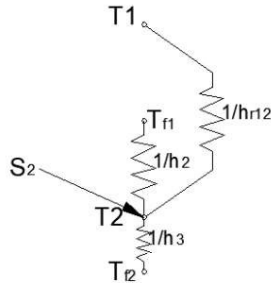


Figura 13. Sistema de resistencias térmicas nodo 3

$$S_2 = h_2 * (T_2 - T_{f1}) + h_{r21} * (T_2 - T_1) + h_3 * (T_2 - T_{f2})$$

Ecuación 11: balance de energía nodo 3

Donde:

S_2 : Flujo de calor absorbido por la placa absorbedora

T_{f2} : temperatura intermedia placas paralelas piso y cubierta absorbedora [K]

h_3 : coeficiente de transferencia de calor por conveccion placa absorbedora externa $\left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$

2.2.4 Balance de ecuaciones temperatura intermedia placa absorbedora y tierra (NODO 4)

Aplicando el balance de energías en el nodo 4 que se observa en la figura 15 se obtiene la ecuación 12

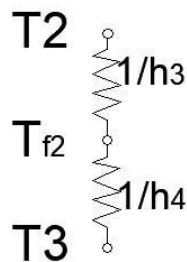


Figura 15 Sistema de resistencias térmicas nodo 4

$$h_3 * (T_2 - T_{f2}) = h_4 * (T_{f2} - T_3)$$

Ecuación 12: balance de energía nodo 4

Donde:

h_4 : coeficiente de transferencia de calor por conveccion suelo $\left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$

T_3 : temperatura suelo [K]

2.2.5 Balance de ecuaciones tierra (NODO 5)

Balance de energías en el nodo 5 que se observa en la figura 16 se obtiene en la ecuación 13.

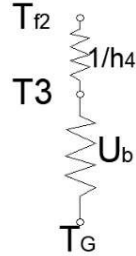


Figura 16. Sistema de resistencias térmicas nodo 5

$$h_4 * (T_{f2} - T_3) = U_b * (T_3 - T_{3,0}) = 0$$

Ecuación 13: balance de energía nodo 5

Donde:

U_b : coeficiente transferencia de calor suelo $\left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$

$T_{3,0}$: temperatura suelo [K]

2.2.6

2.2.6 Sistema de ecuaciones

Las ecuaciones que describen el comportamiento térmico del colector solar son:

$$S_1 + h_{r21} * (T_2 - T_1) + h_1 * (T_{f1} - T_1) = h_w * (T_1 - T_\infty) + h_{rs} * (T_1 - T_s)$$

$$h_1 * (T_1 - T_{f1}) = h_2 * (T_{f1} - T_2) + \frac{\dot{m} * c_p}{\pi * r * L} * (T_{f1} - T_{f,i})$$

$$S_2 = h_2 * (T_2 - T_{f1}) + h_{r21} * (T_2 - T_1) + h_3 * (T_2 - T_{f2})$$

$$h_3 * (T_2 - T_{f2}) = h_4 * (T_{f2} - T_3)$$

$$h_4 * (T_{f2} - T_3) = U_b * (T_3 - T_{3,0}) = 0$$

El sistema de ecuaciones se puede mostrar en forma de matriz de balance de energías y así obtener la solución de temperaturas.

Matriz balance de energía

$$\begin{bmatrix} h_1 + h_{r21} + h_w + h_{rs} & -h_1 & -h_{r21} & 0 & 0 \\ h_1 & -h_1 - h_2 - \frac{\dot{m} * c_p}{\pi * r * L} & h_2 & 0 & 0 \\ -h_{r21} & h_2 & h_2 + h_{r21} + h_3 & -h_3 & 0 \\ 0 & 0 & h_3 & -(h_3 + h_4) & h_4 \\ 0 & 0 & 0 & h_4 & (h_4 + U_b) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_{f1} \\ T_2 \\ T_{f2} \\ T_3 \end{bmatrix} \\
 = \begin{bmatrix} S_1 + h_w * T_{\infty} + h_{rs} * T_s \\ -\frac{\dot{m} * c_p}{\pi * r * L} * T_{f1,i} \\ S_2 \\ 0 \\ U_b * T_{3,0} \end{bmatrix}$$

Ecuación 14: matriz de balance de energía

La matriz anterior se puede escribir como

$$[A] * [T] = [S]$$

Para obtener los valores de temperaturas medias se puede hacerlo al invertir la matriz anterior

$$[T] = [A]^{-1}[S]$$

2.2.7 Coeficiente hw y hrs

El coeficiente global de pérdidas de transferencia de calor se define como:

$$U_t = h_w + h_{rs}$$

Ecuación 15 Coeficiente global de pérdidas en la cubierta

$$U_t : \text{coeficientes de perdidas globales en la cubierta } \left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$$

Donde

- **Coeficiente h_w**

Para calcular el coeficiente de transferencia de calor del viento utilizamos los experimentos

Juerges para una velocidad menor a $5 \frac{m}{s}$

$$h_w = 5.47 + 3.95 * V$$

Ecuación 16: coeficiente de convección del viento [17]

Donde:

$$h_w : \text{coeficiente de convección del viento } \left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$$

V : velocidad del viento $\frac{m}{s}$

- **Coefficiente h_{rs}**

$$h_{rs} = \frac{\sigma * \varepsilon * (T_1 + T_s) * (T_1^2 + T_s^2) * (T_1 - T_s)}{(T_1 - T_\infty)}$$

Ecuación 17: coeficiente de transferencia de calor por radiación del cielo

Donde:

σ : constante de Stefan – Boltzmann, $5.67 * 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right]$

ε : emisividad cubierta entre 0 y 1

- **Temperatura de cielo**

Para calcular la temperatura del cielo se utiliza:

$$T_s = T_\infty * \left[0.711 + 0.0056 * (T_{dp}) + 0.000073 * (T_{dp})^2 + 0.013 * \cos(15t) \right]^{\frac{1}{4}}$$

Ecuación 18: temperatura del cielo [7]

Donde:

T_{dp} : temperatura de punto de rocío en celcius[°C]

https://www.herramientasingeneria.com/onlinecalc/spa/trocio/p_rocio.html

t : hora a partir de media noche [s]

2.2.8 Coeficiente de transferencia de calor por convección (h_1, h_2, h_3 y h_4)

$$h = \frac{k}{L} * Nu$$

Ecuación 19: coeficiente de convección

Donde:

k : conductividad térmica del fluido $\left[\frac{W}{m * K} \right]$

L : longitud del colector [m]

Nu : número de Nusselt

- **Número de Nusselt para convección natural**

El número de Nusselt es utilizado para calcular el coeficiente de convección y este está en función de número de Rayleigh y número de Prandtl.

$$Nu = \left[0.60 + \frac{0.387 * Ra^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \left(\frac{0.559}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{17}}} \right]^2$$

$$Nu = 0.54 * Ra^{0.25}, \text{ para } 2 * 10^4 < Ra < 8 * 10^7$$

Ecuación 20: número de Nusselt convección natural [18]

Donde:

Nu: número de Nusselt convección natural

Ra: número de Rayleigh

Pr: número de Prandtl

- **Número de Nusselt para convección forzada**

El número de Nusselt es utilizado para calcular el coeficiente de convección forzada y este está en función de número de Reynolds y número de Prandtl.

$$Nuf = \frac{1}{\sqrt{\pi}} * \sqrt{Re} * \frac{Pr}{\left(1 + 1.7 * Pr^{\frac{1}{4}} + 21.36 * Pr \right)^{\frac{1}{6}}}$$

$$Re < 5 * 10^5$$

Ecuación 21: número de Nusselt convección forzada [18]

Donde:

Nuf: número de Nusselt convección natural

Re: número de Reynolds

Pr: número de Prandtl

- **Número de Reynolds**

$$Re = \frac{\rho * v * D_h}{\mu}$$

Ecuación 22: número de Reynolds [18]

Donde:

ρ : densidad $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$

v: velocidad del fluido $\left[\frac{m}{s} \right]$

D_h : diametro hidraulico [m]

μ : viscosidad cinemática $\left[\frac{m^2}{s}\right]$

Donde:

μ : viscosidad dinámica [Pa * s]

C_p : calor específico $\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$

k : conductividad termica del fluido $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$

- **Número de rayleigh**

El número de Rayleigh es otro número adimensional que sirve para calcular el coeficiente de convección se calcula de la siguiente manera

$$Ra_D = \frac{g * \beta - (T_{sup} - T_f) * D_h^3}{\mu * \alpha}$$

Ecuación 23: número de Rayleigh [18]

Donde:

Ra : número de Rayleigh

g : gravedad de la tierra $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

β : coeficiente de expansión $\left[\frac{1}{K}\right]$

T_{sup} = temperatura de la superficie [K]

T_f = temperatura temperatura media [K]

D_h : diametro hidraulico [m]

μ : viscosidad cinemática $\left[\frac{m^2}{s}\right]$

α : difusividad térmica $\left[\frac{m^2}{s}\right]$

- **Coefficiente de expansión volumétrico**

$$\beta = \frac{1}{T_f}$$

Ecuación 24: Coeficiente de expansión volumétrico [18]

Donde:

T_f : temperatura de película [K]

- **Temperatura de película**

$$T_f = \frac{T_s + T_{flu}}{2}$$

Ecuación 25: temperatura de película [18]

Donde:

T_s : temperatura del solido [K]

T_f : temperatura de del fluido libre [K]

El diámetro hidráulico se puede calcular de la siguiente manera

$$D_h = \frac{4 * A}{P}$$

Ecuación 26: Diámetro hidráulico [19]

Donde:

A : área de sección transversal [m^2]

P = perímetro humedecido de la sección transversal [m]

EL número de Rayleigh muestra si el fluido tiene un comportamiento laminar cuando este número es $Ra_D \leq 10^{12}$ y es turbulento cuando $Ra_D > 10^{12}$ [18]

2.2.9 Coeficiente de transferencia de calor del suelo

EL coeficiente de transferencia de calor del suelo se calcula de la siguiente manera

$$U_b = \frac{2 * \sqrt{k * \rho * Cp}}{\sqrt{\pi * t}}$$

Ecuación 27: Coeficiente de transferencia de calor del suelo [18]

k : conductividad termica del fluido [$\frac{W}{m * K}$]

ρ : densidad [$\frac{Kg}{m^3}$]

Cp : calor específico [$\frac{J}{Kg * K}$]

t : hora a partir de media noche [s]

2.2.10 Coeficiente de transferencia de calor entre 2 placas paralelas

El coeficiente de transferencia de calor por radiación entre 2 placas paralelas esta dado por:

$$h_{r21} = \frac{4 * \sigma * T_{f2}^3}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)}$$

Ecuación 28: coeficiente de transferencia de calor por radiación entre 2 placas paralelas [7]

Donde:

σ : constante de Stefan – Boltzmann, $5.67 * 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right]$

ε_1 : emisividad cubierta entre 0 y 1

ε_2 : emisividad placa absorbadora entre 0 y 1

T_{f2} : temperatura media del fluido

2.2.11 Flujo masico

$$\dot{m} = \rho * (v * p * a)$$

Ecuación 29: Flujo masico [7]

Donde:

\dot{m} : flujo masico $\left[\frac{kg}{s} \right]$

ρ : densidad $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$

v : velocidad del fluido $\left[\frac{m}{s} \right]$

p : perímetro [m]

a : altura [m]

2.2.12 Constante

$$W = \frac{\dot{m} * c_p}{R * \pi * a}$$

Ecuación 30: constante [7]

2.2.13 Formula S1

$$S1 = \alpha1 * G$$

Ecuación 31: Flujo radiación solar cubierta[7]

Donde:

$\alpha1$: absorptividad cubierta

G = radiación Global Horizontal $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

2.2.14 Formula S2

$$S2 = \alpha2 * S1 * \tau$$

Ecuación 32: Flujo radiación solar placa absorbadora[7]

Donde

$\alpha1$: absorptividad placa absorbadora

S : radiación en la cubierta $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

τ : transmisividad cubierta

2.2.15 Vsalida

$$V_{salida} = \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2} * v^2}$$

Ecuación 33: Velocidad salida del colector [20]

Donde:

V_{salida} : velocidad de salida $\left[\frac{m}{s}\right]$

ρ_1 : densidad entrada $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

ρ_2 : densidad salida $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

v : velocidad del fluido $\left[\frac{m}{s}\right]$

3 DIMENSIONAMIENTO PRUEBAS, RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para el dimensionamiento se utilizan valores fijos como son las condiciones ambientales y suposiciones de temperaturas para poder calcular las pérdidas y coeficientes de convección, radiación y una simulación para obtener las temperaturas mediante el modelo matemático.

3.1 Dimensionamiento

3.1.1 Solución del sistema de ecuaciones

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_{f1} \\ T_2 \\ T_{f2} \\ T_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 + h_{r21} + h_w + h_{rs} & -h_1 & -h_{r21} & 0 & 0 \\ h_1 & -h_1 - h_2 - \frac{\dot{m} * c_p}{\pi * r * L} & h_2 & 0 & 0 \\ -h_{r21} & h_2 & h_2 + h_{r21} + h_3 & -h_3 & 0 \\ 0 & 0 & h_3 & -(h_3 + h_4) & h_4 \\ 0 & 0 & 0 & h_4 & (h_4 + U_b) \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} S_1 + h_w * T_\infty + h_{rs} * T_s \\ -\frac{\dot{m} * c_p}{\pi * r * L} * T_{f1,i} \\ S_2 \\ 0 \\ U_b * T_{3,0} \end{bmatrix}$$

Para la solución se van a utilizar los siguientes datos se observan en la tabla 3.1

Tabla 3.1. Datos para el análisis

DATOS					
Constantes	Valor	Unidades	Constantes	Valor	Unidades
T ∞	18	°C	E placa absor	0,97	-----
T1	31	°C	α cubierta	0,8	-----
T2	60	°C	α placa aves	0,97	-----
T3	14	°C	T rocío	12,4	°C
Tf1	29	°C	C Tbolz	5,67E-08	W/(m ² K ⁴
Tf2	36,85	°C	trans cubierta	0,9	-----
v	1,1	m/s	trans-placa	0,97	-----
G	900	W/m ²	absor placa	0,03	-----
ρ suelo	2300	kg/m ²	E cubierta	0,9	-----
ρ aire	1,2082	kg/m ²	Variables	Valor	Unidades
Cp aire	2,005	kJ/(kg * K)	R	0,8-1,5	m
Cp suelo	0,653	kJ/(kg * K)	a	0,03-0,1	m

- **Coefficiente calcular h_w**

Para calcular el coeficiente de transferencia de calor del viento utilizamos los experimentos

Juerges para una velocidad menor a $5 \frac{m}{s}$

$$h_w = 5,47 + 3,95 * 1,1 = 9,8850 \left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$$

- **Calcular coeficiente h_{rs}**

$$h_{rs} = \frac{5,61 * 10^{-8} * 0,9 * (300,15 + 274,26) * (300,15^2 + 274,15^2) * (300,15 - 274,15)}{(300,15 - 291,15)}$$

$$h_{rs} = 31,093 \left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$$

- **T_s**

$$T_s = 291 * [0,711 + 0,0056 * (12,4) + 0,000073 * (12,4)^2 + 0,013 * \cos(15t)]^{\frac{1}{4}} = 274,26 [K]$$

- **Calcular coeficiente de convección forzada**

$$T_f = \frac{304,5 + 333,15}{2} = 318,82[K]$$

Tabla 3.2. Propiedades termo físicas [20]

Propiedad	Valor	Unidad
ρ	0,8441	$\left[\frac{Kg}{m^3} \right]$
k	0,02616	$\left[\frac{W}{m * K} \right]$
μ	1,84*E-5	$\left[\frac{m^2}{s} \right]$
α	3,081*e-5	$\left[\frac{m^2}{s} \right]$
Pr	0,7074	----
β	3,399*E-3	$\left[\frac{1}{K} \right]$

- **Reynolds y Nusselt**

Al tratarse de datos iterativos se asume un colector de diámetro de 1.5 m y una altura de 0.05 m

$$D_h = \frac{4 * (2 * 3,14 * 1 * 0,05)}{2 * 2 * 3,14 * 1} = 0,1 m$$

$$Re = \frac{0.8441 * 1.1 * 0.1}{1.84 * E - 5} = 5046.25$$

$$Nuf = \frac{1}{\sqrt{\pi}} * \sqrt{5046.25} * \frac{0.7074}{\left(1 + 1.7 * 0.7074^{\frac{1}{4}} + 21.36 * 0.7074\right)^{\frac{1}{6}}} = 17.56$$

$$h_1 = \frac{0.02616}{0.1} * 17.56 = 4.59 \left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$$

- El coeficiente de convección natural se calcula mediante el Rayleigh y Nusselt

$$T_f = \frac{287.15 + 310.15}{2} = 298.65 [K]$$

Tabla 3.3. Propiedades termo físicas [20]

Propiedad	Valor	Unidad
ρ	0,8399	$\left[\frac{Kg}{m^3} \right]$
k	0,02627	$\left[\frac{W}{m * K} \right]$
μ	1,84 * E-5	$\left[\frac{m^2}{s} \right]$
α	3,1 * E-5	$\left[\frac{m^2}{s} \right]$
Pr	0,7072	----
β	0,003348	$\left[\frac{1}{K} \right]$

$$Ra_D = \frac{9.81 * 0.003348 - (287.15 - 310.15) * 0.1^3}{1.84 * E - 5 * 3.1 * E - 5} = 85061873$$

$$Nu = \left[0.60 + \frac{0.387 * 85061873^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0.559}{0.7072} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{17}}} \right]^2 = 44.03$$

$$D_h = \frac{4 * (\tau * 3.14 * 1^2)}{2 * 3.14 * 1} = 1 m$$

$$h_3 = \frac{0.02627}{2 * 1} * 44.03 = 0.5784 \left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$$

- Calcular coeficiente de transferencia de calor del suelo

$$U_b = \frac{2 * \sqrt{1.2 * 2300 * 0.653}}{\sqrt{\pi} * 32400} = 8622 \left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$$

- **Calcular coeficiente h_{r21} entre 2 placas paralelas**

$$h_{r21} = \frac{4 * \sigma * 310.15^3}{\left(\frac{1}{0.9} + \frac{1}{0.97} - 1\right)} = 6.1514 \left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$$

- **Calcular flujo masico**

$$\dot{m} = 1.2082 * (1.1 * 2 * 3.14 * 0.05) = 0.4175 \left[\frac{kg}{s} \right]$$

- **Calcular constante**

$$W = \frac{0.4175 * 1.005}{\pi * 1 * 0.05} = 2.6713$$

- **Calcular S1**

$$S1 = 0.9 * 900 = 810 \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

- **Calcular S2**

$$S2 = 810 * 0.9 * 0.03 = 20.95 \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

- **Calcular Vsalida**

$$V_{salida} = \sqrt{\frac{1.282}{0.7624} * 1.1^2} = 1.42 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Tabla 3.4. Temperaturas de respuesta

	Altura 4 cm				
Diámetro	T1 [°C]	Tf1[°C]	T2[°C]	Tf2[°C]	T3[°C]
1.5	46	41	61	35	14
Vsalida	1.42 [m/s]				

3.1.2 Selección de altura y diámetro

Se realiza el dimensionamiento teniendo en cuenta que se desea alcanzar una temperatura Tf1 aproximada a unos 40°C y al ser un prototipo que tenga la menor área posible.

Tabla 3.5. Dimensionamiento en varias alturas y radios del colector

altura 4 cm					
Radio	T1 [°C]	Tf1 [°C]	T2 [°C]	Tf2 [°C]	T3 [°C]
1	46,20	41,40	61,40	35,10	14,00
1,5	46,26	41,42	61,44	35,15	14,00
altura 5 cm					
Radio	T1 [°C]	Tf1 [°C]	T2 [°C]	Tf2 [°C]	T3 [°C]
1	46,46	40,86	62,40	31,74	14,00
1,5	46,46	40,86	62,40	31,74	14,00
altura 6 cm					
Radio	T1 [°C]	Tf1 [°C]	T2 [°C]	Tf2 [°C]	T3 [°C]
1	46,42	40,00	62,38	38,54	14,00
1,5	46,59	40,30	63,00	38,80	14,00
altura 7 cm					
Radio	T1 [°C]	Tf1 [°C]	T2 [°C]	Tf2 [°C]	T3 [°C]
1	46,49	39,50	62,70	38,70	14,00
1,5	46,49	39,50	62,70	38,70	14,00
altura 8 cm					
Radio	T1 [°C]	Tf1 [°C]	T2 [°C]	Tf2 [°C]	T3 [°C]
1	46,54	39,00	62,90	38,80	14,00
1,5	46,54	39,00	62,90	38,80	14,00
altura 9 cm					
Radio	T1 [°C]	Tf1 [°C]	T2 [°C]	Tf2 [°C]	T3 [°C]
1	46,57	38,53	63,10	39,00	14,00
1,5	46,57	38,53	63,10	39,00	14,00
altura 10 cm					
Radio	T1 [°C]	Tf1 [°C]	T2 [°C]	Tf2 [°C]	T3 [°C]
1	46,60	38,00	63,30	39,00	14,00
1,5	46,60	38,00	63,30	39,00	14,00

Se decide seleccionar los datos de una altura de 5 cm y un radio de 1 m, pues el valor es muy cercano a los 40°C del fluido de trabajo y es el que ocupa menos material en relación de diámetros y alturas.

Obteniendo las dimensiones mediante la simulación se procede a la realización de planos para proceder a su construcción, ver ANEXO IV

3.2 Protocolo de pruebas

Para la realización de las mediciones se procede de la siguiente manera.

Temperaturas


1. Tomar el termómetro digital
2. Colocar en la superficie que se desea medir la temperatura
3. Esperar al menos 2 min para que llegue al equilibrio térmico
4. Anotar el resultado

Velocidad

1. Identificar la superficie donde se va a colocar el anemómetro
2. Colocar el anemómetro
3. Anotar el resultado

Para la medición de velocidad y temperaturas se ocupan los siguientes instrumentos observados en la tabla 3.6

Tabla 3.6. Instrumentos de medición

Características de los instrumentos de medición			
Nombre	Parámetro	Características	Equipo
Anemómetro	Velocidad del viento	Marca AMPROBE TMA40-A Registra velocidad, humedad relativa [0.1 a 38 m/s] [0 – 100 % RH]	
Termómetro digital	T1, Tf1, T2, Tf2, T3, T ∞	Termómetro digital TPM-10 [0 °C -100°C]	

En la tabla 3.7 se puede observar el formato de pruebas de funcionamiento

Tabla 3.7. Formato tabla de resultados

REGISTRO DE EVALUACIÓN					
Fecha y hora de la evaluación					
Nombre del encargado:					
Puesto del encargado					
Magnitud					°C
Medida	T1	Tf1	T2	Tf2	T3
1					
2					
3					
4					
Promedio					
Velocidad Aire				Magnitud	
Medida	Entrada		Salida		
1					
2					
3					
4					
Promedio					

3.3 Resultados

Posteriormente a la construcción del colector solar se muestran los resultados.

3.3.1 Pruebas de funcionalidad

Se procede a realizar las mediciones tanto de las temperaturas como de las velocidades en los puntos de interés, se realizaron dos días de pruebas el primero de ellos fue el 10 de agosto como se muestra en la tabla 3.8 y el otro fue el 14 de agosto.

Todos los resultados son valores obtenidos en un lapso de 10 minutos a partir de la primera medida.

Los valores de resultados se observan en la tabla 3.8

Tabla 3.8. Resultados Experimentales del colector

REGISTRO DE EVALUACIÓN						
Fecha y hora de la evaluación					10/8/2023 11:30	
Nombre del encargado:					Christian Escobar	
Puesto del encargado						
Magnitud					°C	
Medida	T1	Tf1	T2	Tf2	T3	
1	31.2	44.5	66.3	35.1	13	
2	30.5	42.1	65.5	34.3	15	
3	30.2	41.2	65.4	33.1	14	
4	29.5	41.1	65.3	33.4	13.5	
Promedio	30.3	42.2	65.6	33.9	13.87	
Velocidad Aire					Magnitud	
Medida	Entrada		Salida		m/s	
1	1,1		1,4			
2	1		1,5			
3	0,9		1,5			
4	1,1		1,4			
Promedio	1,025		1,45			

Valores obtenidos con los datos experimentales en el modelo matemático se realizan con los siguientes datos medidos el 10 de agosto

Tabla 3.9. Datos experimentales ingresados en el modelo matemático

DATOS					
Constantes	Valor	Unidades	Constantes	Valor	Unidades
T_{∞}	21	°C	E placa absor	0,97	-----
T1	30,3	°C	α cubierta	0,8	-----
T2	65,6	°C	α placa abs	0,97	-----
T3	13,87	°C	T roció	12,4	°C
Tf1	42,2	°C	C Tbolz	5,67E-08	W/(m ² K ⁴)
Tf2	33,9	°C	trans cubierta	0,9	-----
v	1,025	m/s	trans-placa	0,97	-----
G	700	W/m ²	absor placa	0,03	-----
ρ suelo	2300	kg/m ²	E cubierta	0,9	-----
ρ aire	1,2082	kg/m ²	Variables	Valor	Unidades
Cp aire	2,005	kJ/(kg * K)	R	1	m
Cp suelo	0,653	kJ/(kg * K)	a	0,05	m

Con los valores de la tabla 3.9 se obtienen los resultados de la tabla 3.10

Tabla 3.10. Resultados Experimentales en el modelo matemático

T1 [°C]	Tf1[°C]	T2[°C]	Tf2[°C]	T3[°C]	Vsalida[m/s]
41.90	42.74	57.83	36.76	13.87	1.37

3.3.2 Errores

Los errores podemos observarlo en la tabla 3.11

Tabla 3.11. Errores de datos experimentales vs el modelo con los datos experimentales

	errores		
	Datos		error
	Experimental	Teórico	
T1	30,3	41,9	28%
Tf1	42,2	42,74	1%
T2	65,6	57,83	13%
Tf2	33,9	36,76	8%
T3	13,87	13,87	0%
Promedio			10%
Vsalida	1.45	1.37	5.8%

En la figura 17 observamos los errores experimentales vs teóricos de

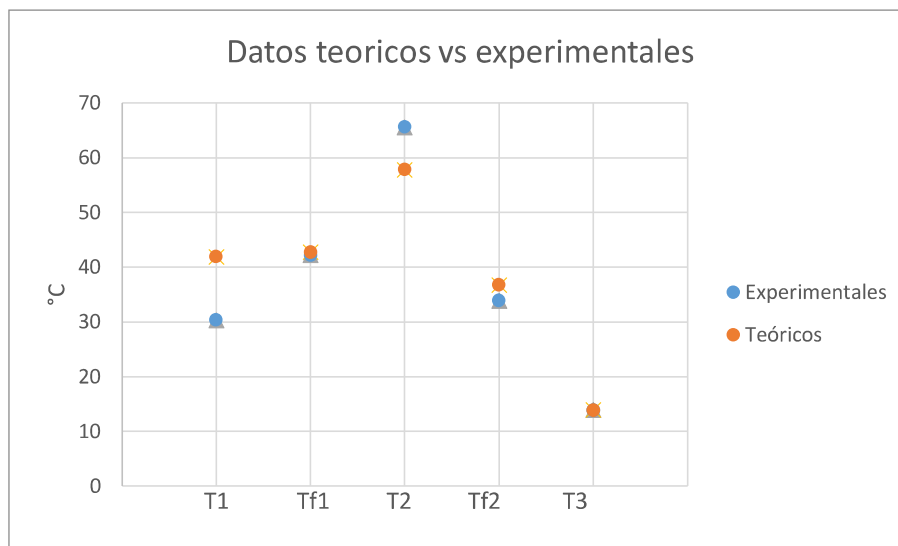


Figura 17. Errores de temperatura

3.4 Conclusiones

- Se cumplió el objetivo del TIC diseñar y construir el colector solar a escala para la generación de energía eléctrica
- El modelo matemático que permitió el diseño y construcción del colector tiene un promedio de errores del 10% al tratarse solo de temperaturas de diferentes partes del colector y considerando que se debe a que al trabajar con materiales que no tienen especificadas las propiedades termo-físicas y al aplicar fórmulas que dependen de esto se puede esperar este tipo de errores, ya que estas propiedades se consideraron constantes.
- Durante el proceso de simulación y el proceso experimental al ver los resultados de las temperaturas para el dimensionamiento se logró concluir que el sistema tiene un valor considerable de pérdidas por el suelo
- En el proceso de dimensionamiento se puede observar que al aumentar la altura de la entrada del colector solar este va a tener un mayor flujo másico y necesita mayor energía para calentar este flujo por lo cual se decide utilizar una altura de 5 cm y así obtener la temperatura de salida deseada sin tener que aumentar la energía que entra al colector.
- En el proceso de pruebas se puede concluir que el prototipo funciona de la manera esperada ya que cumple con la función de elevar la temperatura de trabajo a un promedio de 40°C.
- Se concluye que para que el colector absorba la suficiente energía y este pueda elevar la temperatura del fluido de trabajo a la temperatura deseada , se debe precalentar la placa absorbedora.

3.5 Recomendaciones

- Se recomienda colocar debajo de la superficie absorbedora un material con una alta capacidad calorífica para que el colector pueda ser utilizado también en la noche y generar energía todo el día.
- Se recomienda utilizar el modelo matemático para aplicaciones a una mayor escala para así obtener una mayor potencia de energía ya que el modelo funciona al conocer las condiciones ambientales del lugar de instalación.

- Se recomienda colocar un material aislante térmico debajo la placa absorbadora para así poder desprejar las pérdidas y simplificar el modelo matemático.
- Se recomienda para reducir el error calcular las propiedades termo-físicas en intervalos de 10°C de temperatura y así resolver el modelo con estas.
- Se recomienda calentar la placa absorbadora al menos unos 30 minutos antes de realizar las mediciones, y al momento de medir temperaturas dejar que el termómetro llegue al equilibrio térmico con la superficie que se desea medir.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. H. Ali, «Analysis Study of Solar Tower Power Plant & Its Configuration,» Canadian Center of Science and Education , Baghdad, 2012.
- [2] A. Mellado, «ABC.es,» 09 12 2013. [En línea]. Available: <https://www.abc.es/ciencia/20131208/abci-invento-chimenea-solar-espanol-201312072202.html?ref=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F>. [Último acceso: 18 06 2023].
- [3] E. d. energía, «<https://energyeducation.ca/>,» [En línea]. Available: https://energyeducation.ca/Enciclopedia_de_Energia/index.php/Turbina#cite_note-RE1-2. [Último acceso: 18 06 2023].
- [4] E. CITY, «<https://enercitysa.com/>,» 18 10 2022. [En línea]. Available: <https://enercitysa.com/blog/radiacion-solar-en-ecuador/>. [Último acceso: 8 01 2023].
- [5] E. Ingenieria, «<https://estudiandoingenieriaenmexico.blogspot.com/>,» [En línea]. Available: <https://estudiandoingenieriaenmexico.blogspot.com/2018/01/energia-el-sol-es-una-estrella-de-tipo.html>. [Último acceso: 24 06 2023].
- [6] M. Carbonell, «<https://www.hogarsense.es/>,» 02 02 2023. [En línea]. Available: <https://www.hogarsense.es/placas-solares/radiacion-solar-directa-e-indirecta>. [Último acceso: 18 06 2023].
- [7] W. A. B. John A. Duffie, Solar Engineering, New Jersey: Wiley, 2013.
- [8] Gov.co, «<http://www.ideam.gov.co/>,» [En línea]. Available: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/caracteristicas-de-la-radiacion-solar#:~:text=Por%20ejemplo%2C%20el%20Sol%20con,de%20Stefan%2DBoltzmann%20relacionando%20estas>. [Último acceso: 19 01 2023].
- [9] Proviento, «Piranómetro FIRST CLASS LSI LASTEM,» [En línea]. Available: <https://proviento.com.ec/irradiacion-ondas/140-piranometro-first-class-lsi-lastem.html>. [Último acceso: 19 01 2023].
- [10] F. J. G. YUNUS A. ÇENGEL, TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA, Mc GRAW Hill, 2011.

- [11] Meteogalicia, «<https://www.meteogalicia.gal/>,» [En línea]. Available: https://www.meteogalicia.gal/web/informacion/glosario/est29.action?request_locale=es. [Último acceso: 18 06 2023].
- [12] climate-data.or, «Climate Data,» [En línea]. Available: <https://es.climate-data.org/america-del-sur/ecuador/provincia-de-pichincha/quito-1012/>. [Último acceso: 21 08 2023].
- [13] ideam.gov.co, «<http://atlas.ideam.gov.co/>,» [En línea]. Available: http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/VelocidaddelViento_texto.pdf. [Último acceso: 2023 08 21].
- [14] WeatherOnline, [En línea]. Available: <https://www.woespana.es/weather/maps/city?FMM=1&FYY=2000&LMM=12&LYY=2022&WMO=84071&CONT=samk®ION=0021&LAND=EQ&ART=WST&R=0&NOREGION=0&LEVEL=162&LANG=es&MOD=tab>. [Último acceso: 21 08 2023].
- [15] educaplus.org, «[educaplus.org](http://www.educaplus.org/),» [En línea]. Available: <http://www.educaplus.org/geografia/horas-de-luz.html>. [Último acceso: 03 07 2023].
- [16] A. V. G. W. M.A. dos S. Bernardes, «Thermal and technical analyses of solar chimneys,» Stuttgart, 2003.
- [17] annaratone, Engineering Heat Transfer, Heidelberg: Springer, 2009.
- [18] P. J. D. D. Frank Incropera, Fundamentals of Heat and Mass Transfer,, Philadelphia: John , 2011.
- [19] N. Connor, «<https://www.thermal-engineering.org/>,» 30 09 2019. [En línea]. Available: <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-diametro-hidraulico-definicion/>. [Último acceso: 2023 07 12].
- [20] J. G. NAVARRO, «<https://mecanicadefluidoscod5131587.blogspot.com/>,» 23 11 2015. [En línea]. Available: <https://mecanicadefluidoscod5131587.blogspot.com/2015/11/teorema-de-bernoulli.html>. [Último acceso: 20 08 2023].
- [21] E. E. Solver, «ees,» 2023.
- [22] M.H.Ali, «Analysis Study of Solar Towe Plat & Its Configuration,» Canadian Center of Science and Education, Baghdad, 2012.
- [23] M. Hilcu, «<https://www.otovo.es/>,» 19 05 2021. [En línea]. Available: <https://www.otovo.es/blog/energia/que-es-la-energia-solar/>. [Último acceso: 18 06 2023].
- [24] M. Mateo, «<https://www.researchgate.net/>,» 2015. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/320474536_Simulacion_de_un_Colector_para_Refrigerador_Solar_por_Adsorcion. [Último acceso: 04 07 2023].
- [25] U. d. murcia, «<https://www.um.es/>,» [En línea]. Available: <https://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/tema02.pdf>. [Último acceso: 04 07 2023].

[26] Piranómetro, «Grupo de Investigación Sinergy/Departamento de Ingeniería Mecánica,» Quito, 2022.

5 ANEXOS

ANEXO I. código de simulación Matlab

ANEXO II. Propiedades termo-físicas del aire EES ANEXO

ANEXO III. Fotografías modelo a escala

ANEXO IV. Planos