



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE MECATRÓNICA

ESTUDIO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN
SOLAR PARA UN INTERCAMBIADOR DE CALOR NO
CONVENCIONAL

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniera en Mecatrónica

AUTOR: EVELYN PRISCILA PAÑEGA PACURUCU
TUTOR: ING. JULIO CÉSAR LOJA QUEZADA, PH.D.

Cuenca – Ecuador

2026

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Evelyn Priscila Pañega Pacurucu con documento de identificación N° 0105252670 manifiesto que:

Soy la autora y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Ciudad, 05 de enero del 2026

Atentamente,



Evelyn Priscila Pañega Pacurucu
0105252670

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, Evelyn Priscila Pañega Pacurucu con documento de identificación N° 0105252670, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy la autora del artículo académico: “Estudio de la transferencia de calor por radiación solar para un intercambiador de calor no convencional”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 05 de enero de 2026

Atentamente,



Evelyn Priscila Pañega Pacurucu

0105252670

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Julio César Loja Quezada con documento de identificación N° 0102263480, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ESTUDIO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN SOLAR PARA UN INTERCAMBIADOR DE CALOR NO CONVENCIONAL, realizado por Evelyn Priscila Pañega Pacurucu con documento de identificación N° 0105252670, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 05 de enero de 2026

Atentamente,



Julio César Loja Quezada
0102263480

Dedicatoria

Evelyn Pañega

A mi papá, Jesús, con todo mi amor y gratitud. Gracias por acompañarme en cada paso de este camino, por tu apoyo incondicional y por todos los sacrificios que hiciste para que yo pudiera continuar con mis estudios universitarios. Gracias por tus palabras de ánimo cuando sentía que ya no podía más, por creer en mí incluso en los momentos en los que yo misma dudaba, y por enseñarme con tu ejemplo el valor del esfuerzo y la perseverancia. Esta meta que hoy cumplo también es tuya, porque fuiste mi guía, mi fuerza y mi mayor ejemplo.

Y a mí misma, por no rendirme. Por continuar incluso cuando quise dejar todo atrás. Por permanecer firme frente a cada obstáculo y recordar que mis sueños merecen el esfuerzo. Este logro es también un homenaje a la versión de mí que nunca se rindió.

Agradecimientos

Evelyn Pañega

A mis amigos Kinara, Santiago, Danny, José Luis, Jenny, Darwin y Martín, quienes fueron un apoyo incondicional dentro y fuera de las aulas. Gracias por su compañía, por cada momento compartido y por hacer que este camino académico fuera más llevadero y significativo.

A mis docentes, por sus consejos, su guía y todo el aprendizaje que recibí de cada uno de ellos. En especial, agradezco al Ing. Julio Loja por su apoyo, orientación y dedicación durante el desarrollo de mi trabajo de titulación.

A la Universidad Politécnica Salesiana, por permitirme crecer tanto en lo académico como en lo personal, y por darme la oportunidad de formar parte de esta comunidad que ha marcado mi vida.

Y, sobre todo, a mi familia, por estar siempre a mi lado, por su amor, paciencia y apoyo incondicional en este extenso e importante camino. Sin ustedes, nada de esto habría sido posible.

Este documento fue realizado enteramente en L^AT_EX

Índice

Certificado de responsabilidad y autoría del trabajo de titulación	I
Certificado de cesión de derechos de autor del trabajo de titulación a la Universidad Politécnica Salesiana	II
Certificado de dirección del trabajo de titulación	III
Dedicatoria	IV
Agradecimientos	V



ESTUDIO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN SOLAR PARA UN INTERCAMBIADOR DE CALOR NO CONVENCIONAL

STUDY OF SOLAR RADIATION HEAT TRANSFER FOR AN UNCONVENTIONAL HEAT EXCHANGER

Evelyn Priscila Pañega Pacurucu ¹, Julio César Loja Quezada ²

Resumen

El presente trabajo presenta dos aportes, el primero corresponde a un análisis de datos de radiación solar históricos tomados de NASA POWER data access viewer, a fin de obtener un modelo aproximado del comportamiento de la misma en la provincia del Azuay - Ecuador. El segundo aporte es el estudio de transferencia de calor combinado por radiación solar, conducción y convección en un intercambiador no convencional para agua sanitaria, que consta de un tubo de polietileno de alta densidad (PEAD) enrollado como una espiral de Arquímedes. Se logró establecer una función aproximada de tipo senoidal de la radiación disponible en el año, con esta información y los cálculos de transferencia de calor en el intercambiador analizado, se logró establecer el comportamiento de algunas variables como, temperatura exterior, velocidad del flujo, resistencia térmica, temperatura de salida del agua a lo largo del año.

Palabras clave: Energía solar térmica, Transferencia de calor, Radiación, Intercambiador de calor

Abstract

The present work presents two contributions, the first corresponds to an analysis of historical solar radiation data taken from NASA POWER data access viewer in order to obtain an approximate model of its behavior in the province of Azuay - Ecuador. The second contribution is the study of combined heat transfer by solar radiation, conduction and convection in an unconventional heat exchanger for domestic water, which consists of a high-density polyethylene (HDPE) tube wound like an Archimedean spiral. It was possible to establish an approximate sinusoidal function of the radiation available in the year, with this information and the calculations of heat transfer in the analyzed exchanger, it was possible to establish the behavior of some variables such as outside temperature, flow velocity, thermal resistance, water outlet temperature throughout the year.

Keywords: Solar Thermal, Heat Transfer, Radiation, Heat Exchanger

1. Introducción

El presente documento busca abordar el aprovechamiento de la energía solar a través de un intercambiador que capte la energía térmica solar que llega a la superficie terrestre, específicamente en la provincia del Azuay - Ecuador. En Ecuador los métodos más comunes para el acceso a agua caliente son por medio de duchas eléctricas que generan un gasto mensual de 13.80 USD que representa el 38.89% de la planilla eléctrica mensual [1], o el uso de gas licuado de petróleo (GLP) en calefones que varía desde los 1.4 a 2 tanques de gas de 15Kg al mes por familia, lo que representa al rededor de 6 USD incluido el transporte [2]. La temperatura general del agua caliente para uso doméstico se encuentra entre los 40° y 60°C [3], lo que hace interesante el estudio de la transferencia de calor por radiación en sistemas intercambiadores adquirir agua caliente sanitaria. Las energías renovables, como la solar, son importantes en la reducción de fuentes contaminantes que emiten CO_2 , además de ser considerada una fuente inagotable de energía [4], [5].

Durante todo el año en Ecuador los rayos inciden de manera casi perpendicular por su ubicación geográfica, lo que lo convierte en un país con un amplio recurso de energía solar [6]. En Ecuador el índice de promedio de radiación solar anual es $4200kWh/año/m^2$ con variaciones del 30% de un lugar a otro en Ecuador y de más de 40% en las islas Galápagos [7], superando a España con un promedio de $1400kWh/año/m^2$, Brasil con $1800kWh/año/m^2$ y Estados Unidos con $1600kWh/año/m^2$ [8]. El aprovechamiento de la energía solar en Ecuador es mínimo en sistemas térmicos, ofreciendo una oportunidad de estudio e investigación. Actualmente el 92% de la energía del país es hidroeléctrica, el 7% térmica (proyectos geotérmicos) y el 1% es proveniente de fuentes no convencionales, como fotovoltaica, eólica, biomasa, biogas, térmica solar, entre otras [9].

Según Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21), la demanda global de energía ha aumentado en un 4%, igual que el aumento de energía dentro del sector eléctrico en América Latina [10], principalmente con combustibles fósiles. REN21 sugiere la implementación de energías renovables como respuesta a la elevación de precios de energía y la crisis energética global [11].

Según un informe anual de la International Energy Agency (IEA)- Solar Heating & Cooling Programme (SHC) en el año 2021, los sistemas solares térmicos instalados en ese año representan un ahorro de 47.5 millones de toneladas de petróleo y 147.5 millones de toneladas de CO_2 que no se emite, esto a nivel mundial se indica en la figura 1. Italia lideró el crecimiento con un incremento del 83%, seguido por Brasil con una

demanda que creció un 29% y Estados Unidos, un 19% [12].

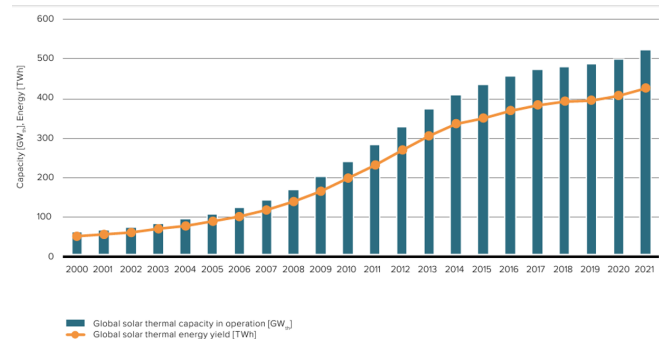


Figura 1. Capacidad solar térmica global en funcionamiento y energía anual 2000-2021 [12].

La energía solar se aprovecha mediante dos métodos principales: la conversión de la radiación solar en electricidad y la transformación de la radiación solar en calor, conocida como energía solar térmica [13]. Esta energía es utilizada por diversos sistemas como células fotovoltaicas, heliostatos, colectores solares e intercambiadores, de manera que se pueda transformar en energía térmica o eléctrica [14].

La radiación solar como recurso de energía tiene aplicaciones como: uso de sistema solar para calentamiento de piscinas domésticas o comerciales, calentamiento de agua sanitario, climatización de espacios de tipo termohidráulico, sistemas de calentamiento de aire para climatización [15], iluminación con energía fotovoltaica para autoservicios [16], riego por medio de energía solar a través de paneles solares [17]. Los intercambiadores de calor que aprovechan la energía solar para calentar fluidos son objeto de estudio e investigaciones que exploran su potencial en aplicaciones como: deshidratación de alimentos [18], rendimiento de sistemas térmicos solares analizando la evolución de intercambiadores de calor desde el más simple hasta el más complejo [19] e intercambiadores de calor solar de polímeros para calentamiento de agua. [20].

El uso de termoplásticos como el PEAD y el polipropileno (PP) en intercambiadores de calor solares ofrece importantes ventajas en costo y resistencia a la corrosión en comparación con los materiales metálicos [21]. Además en 2019 la revista “Materials Science and Engineering” en su evaluación encontró que los tubos de PEAD tienen una alta capacidad de aislamiento térmico y una vida útil de hasta 50 años, lo que los hace ideales para retener calor o frío en el fluido [22].

Actualmente se han realizado estudios de varios modelos que analizan el comportamiento térmico de colectores solares o intercambiadores de calor tanto en estado transitorio como en estado estacionario. En [23]

se presenta un modelo matemático dinámico de transferencia de calor para un colector solar de placa plana, este modelo identifica la temperatura de salida del fluido del colector. Mendoza y Rodriguez [24] presentan un modelo transitorio en el que predice la temperatura de salida del colector en función del tiempo pero considerando el coeficiente global de pérdidas de calor. El estudio realizado por [25] investiga la transferencia de calor combinada en intercambiadores de calor, conducción, convección y radiación para aplicaciones solares.

El trabajo presenta un caso de estudio de un intercambiador de calor no convencional de PEAD en la configuración de un espiral de Arquímedes para el calentamiento de agua sanitaria en la ciudad de Cuenca. El análisis de este diseño específico se llevará a cabo mediante los principios de termodinámica y transferencia de calor por radiación, además de los procesos de transferencia de calor por conducción y convección. Se analiza el caso de estudio en donde a partir de datos de la radiación solar incidente se analiza el comportamiento del intercambiador de calor, la efectividad del intercambiador en términos de la cantidad de radiación absorbida por el tubo de PEAD, y la temperatura de salida del fluido a lo largo del año para la obtención de agua caliente sanitaria igual o mayor a 35°C. Este enfoque, además de aprovechar las propiedades del material de uso común en la ciudad para la distribución de agua sanitaria en viviendas, busca proporcionar valiosos aportes para el estudio de eficiencia en la implementación de sistemas sostenibles y económicos de suministro de agua caliente en entornos residenciales en Cuenca aprovechando la radiación solar térmica.

2. Materiales y Métodos

Como parte del estudio de transferencia de calor por radiación solar es importante identificar los parámetros que se involucran en la radiación solar como la irradiación solar, radiación incidente, radiación reflejada, absorptividad, emisividad, y otros factores. Además, se deben considerar los factores geográficos como la latitud, altitud, orientación y otras variables involucradas en este proceso térmico.

2.1. Energía Solar

La energía solar es una fuente de luz y calor primaria que incide sobre la tierra en forma de radiación electromagnética (rayos ultravioletas, luz y calor) proveniente del Sol [26], [4].

Cuando la energía solar alcanza la superficie terrestre se conoce como irradiancia solar, también denominada constante solar. Esta medida representa la tasa de incidencia solar sobre una superficie que es perpendicular a los rayos del sol [27]. El sol es considerado un cuerpo negro, entonces el calor emitido por

el mismo es expresado por medio de la ley de Stefan-Boltzmann, donde la radiación térmica emitida (E) es proporcional a su temperatura elevada a la cuarta potencia (T^4) como $E = \sigma \cdot T^4$ donde (σ) es la constante de Boltzmann [4].

Existen dos tecnologías para aprovechar la energía solar: *energía solar pasiva* y *energía solar activa*, energía que abarca dos subgrupos: Térmica y Fotovoltaica [13]. La energía térmica se clasifica según la temperatura requerida: alta temperatura para aplicaciones industriales (250°C), mediana temperatura para desalinización del agua del mar y refrigeración (80°C-250°C) y baja temperatura (80°C) para la obtención de agua caliente sanitaria y climatización de piscinas [28].

2.2. Radiación solar en Cuenca-Ecuador.

El estudio de los cálculos de transferencia de calor por radiación solar se realizará para la ciudad de Cuenca de la provincia de Azuay, por lo que los datos de radiación solar son tomados para la zona de interés.

Tabla 1. Coordenadas geográficas de Cuenca.

Lugar	Cantón - Cuenca
Ubicación	Cuenca-Azuay-Ecuador
	Grados decimales:
Coordenadas	Latitud: -2.89
	Longitud: -79.0

Tabla 2. Rango mínimo y máximo de radiación solar en Cuenca - Ecuador. [29]

Datos del mapa (Rango mínimo-máximo)			
Irradiación normal directa	DNI	1299.3	kWh/m ²
Irradiación horizontal global	GHI	1779.7	kWh/m ²
Irradiación horizontal difusa	DIF	877.2	kWh/m ²
Irradiación inclinada global	GTI	1781.2	kWh/m ²
Temperatura del aire	TEMPERATURA	13.9	°C
Elevación del terreno	ELE	2513	m

La tabla 2 muestra los datos de irradiación solar anual obtenidos desde Global Solar Atlas [29]. Sin embargo, para comprender las variaciones de irradiación incidente de acuerdo a la geografía de la zona en estudio, es necesario contar con datos diarios de irradiación solar en distintas condiciones.

La energía solar térmica, es esencial para comprender los parámetros que están involucrados en un sistema no convencional de calentamiento de agua, teniendo en cuenta factores como la ubicación geográfica, la hora del día y las condiciones climáticas. Estos datos son obtenidos de reportes de estaciones meteorológicas para el caso de estudio se utilizará la herramienta "NASA POWER Data Access" que permite obtener

datos de radiación solar incidente, temperatura y velocidad del viento a nivel global.

Para la ciudad de Cuenca-Azuay, en la latitud -2.89 y longitud -79.0 , se recolectaron dos tipos de datos diarios de irradiancia solar entre las fechas de 01-01-2023 y el 31-10-2023.

Se presenta en la figura 3 la comparación de dos variables de irradiancia solar a lo largo de los meses de Enero-Octubre para el año 2023.

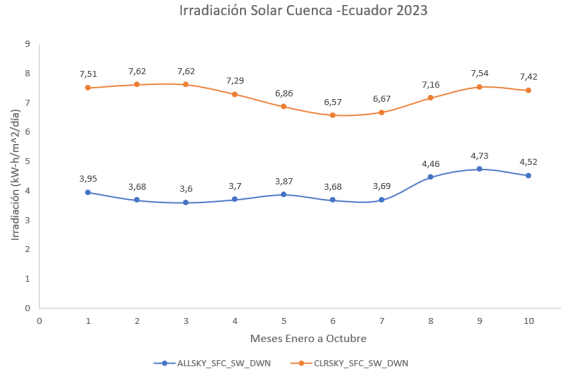


Figura 2. Irradiación solar en Cuenca-Ecuador 2023.

La primer variable denominada "All Sky Surface Shortwave Downward Irradiance" que es la irradiancia de onda corta que llega a la superficie terrestre desde todas las direcciones del cielo, incluyendo tanto la radiación directa del sol como la radiación difusa, considerando todas las obstrucciones como nubes o aerosoles que dispersen la radiación y el segundo dato que se trata del "Clear Sky Surface Shortwave Downward Irradiance" que es la cantidad de radiación solar de onda corta que llega a la superficie terrestre bajo condiciones de cielo despejado y sin nubes, es decir, en condiciones ideales [30].

Al analizar los datos de irradiación solar presentados en la figura 2, se puede observar un aumento de irradiación en los meses de agosto, septiembre y octubre, alcanzado valores de 4.46 , 4.73 y $4.52 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$ respectivamente. Estos meses son correspondientes a la temporada seca o verano en Ecuador. De igual manera, la irradiación en condiciones de cielo despejado toma valores de 7.16 , 7.54 , y $7.42 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$ en estos mismos meses, considerando que estos datos son para una irradiación en condiciones ideales los meses con una irradiación alta son los meses de febrero y marzo con un valor de $7.62 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$. Considerando que en la mayor parte de Ecuador el índice de promedio de irradiación solar anual es de 4.2 kWh/m^2 , se puede aplicar a sistemas térmicos adecuados para baja temperatura que sean de bajo costo.

2.3. Tubos de PEAD en Sistemas de Radiación Solar

Los tubos PEAD son ampliamente usados en sistemas de distribución de agua por su bajo costo y durabilidad. Existen sistemas de energía solar de bajo costo para obtención de agua caliente sanitaria por lo que se busca analizar y calcular la eficiencia del uso de tubos de PEAD en estos sistemas [31]. Por lo tanto, se analizará comportamiento térmico de los tubos frente a la exposición de radiación solar y el aprovechamiento de esta energía para la obtención de agua caliente sanitaria.

Según [21] existe una gran variedad de intercambiadores de calor en los cuales se utiliza termoplásticos para sistemas de bajas temperaturas. Las ventajas de usar termoplásticos en intercambiadores de calor son: costo accesible, resistencia a la corrosión y degradación, peso liviano. Como desventaja en su uso se tiene baja conductividad térmica, de manera que se debe usar tubos de un espesor delgado para lograr una transferencia de calor adecuada. En la tabla 3 se muestra una comparación de varios materiales para transporte de agua sanitaria y sus características:

Tabla 3. Comparación de materiales para transporte de agua sanitaria.

Material	Acero inoxidable	PEAD	PVC	PP
Conductividad térmica [W/mK]	16.3	0.45 – 0.52	0.12 – 0.25	0.22
Densidad [Kg/m^3]	7970	950	1040	910
Temperatura de Trabajo [$^{\circ}\text{C}$]	870 – 925(max)	-40 – 80	-30 – 75	-20 – 120
Resistencia [MPa]	460 – 860	15 – 40	25 – 70	-20 – 100
Corrosión	Permite	No permite	No permite	No permite
Costo m x 32mm \varnothing [USD\$]	32.70	1.69	1.23	6.49

Los tubo de PEAD además de brindar una vida útil de 50 años tiene ventajas como: resistencia a la radiación ultravioleta, no tóxico, alta tolerancia al impacto, resistencia a daño en curvas y baja caída de presión debido a la superficie interna lisa [31].

Una mayor eficiencia en la transferencia de calor hacia el fluido depende de la conductividad del material y el espesor de sus diámetros. En la tabla 4 se especifica los parámetros del tubo de PEAD [31].

Tabla 4. Parámetro de tubo de polietileno de alta densidad

Polietileno de alta densidad PE 100	
Serie del tubo (S)	S5
Diámetro nominal exterior (mm)	20
Espesor nominal de pared (mm)	2.0
Presión nominal de trabajo en MPa	1.6
Conductividad Térmica ($\text{W/m} \cdot \text{K}$)	0.46
Emisividad (ϵ)	0.94
Absortividad (α)	0.9

2.4. Modelo Matemático

La investigación desarrollada es de tipo aplicada enfocada en el estudio de calor por radiación de un sistema de intercambiador de calor por radiación solar no convencional, aplicando modelos matemáticos y ecuaciones de transferencia de calor que aporten a los conocimientos de estos nuevos temas.

2.4.1. Radiación solar incidente sobre una superficie

La irradiación solar que incide sobre la tierra esta dada por la ecuación 1.

$$G_{solar} = G_D \cdot \cos(\theta) + G_d \quad (1)$$

Donde G_D es la radiación solar directa, G_d es la radiación solar difusa y θ el ángulo de incidencia de radiación solar.

Para esta investigación no se calcularán datos de irradiación solar G_{solar} , puesto que, serán tomados de la herramienta "NASA POWER Data Access" que brinda los datos de la sumatoria de la radiación solar directa más la radiación solar difusa incidente en un plano horizontal denominada como All Sky Surface Shortwave Downward Irradiance o $Q_{incidente}$ en unidades de $(kWh/m^2/día)$. La radiación solar G_{solar} se mide en (W/m^2) . Dado que $1kWh = 1000W/h$ y la superficie está expuesta al sol 10h diarias, se tiene que:

$$G_p = \frac{Q_{incidente}}{10h/día} \times 1000W \quad (2)$$

Donde $G_p = G_{solar}$ y es la radiación incidente promedio en la ciudad de Cuenca en (W/m^2) .

Se realizo un análisis de datos de irradiación solar, que representa de manera mas acertada la variación de esta energía a lo largo del año, obteniendo un modelo matemático que muestra que la irradiación en función del tiempo se comporta como una función senoidal como se muestra en la figura 3.

El modelo matemático esta descrito como:

$$y = y_0 + A \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{x - x_c}{w}\right) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} y_0 &= 3.90105 \pm 0.05463 \\ x_c &= 573265.45725 \pm 137743.61871 \\ w &= 139.97417 \pm 10.21835 \\ A &= 0.38313 \pm 0.07904 \end{aligned}$$

La amplitud A , la fase x_c y el periodo w del modelo se determinaron mediante un ajuste de curva a los datos de radiación solar para la ciudad de Cuenca.

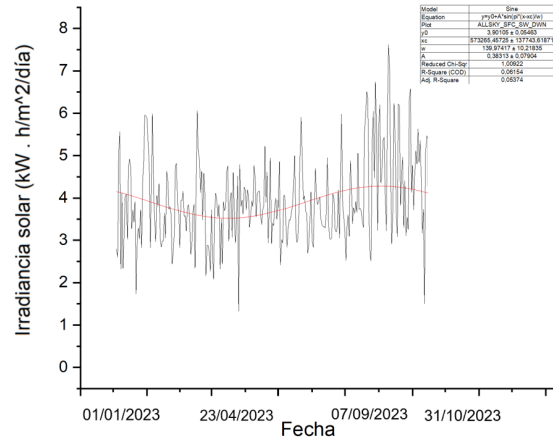


Figura 3. Irradiación solar en función del año.

Combinando este modelo con la ecuación de transferencia de calor, podemos estimar con mayor precisión cómo se convierte la energía solar en calor útil y cómo se distribuye este calor en un sistema de intercambiador de calor no convencional.

Cuando la radiación incide sobre una superficie, parte de esta energía es absorbida (figura 4), se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Q_{abs} = G_p \times \alpha \times A_s \quad (4)$$

Donde Q_{abs} es la tasa de calor incidente absorbido por el tubo de PEAD, A_s es el área superficial de captación de la radiación en el espiral de Arquímedes y α es el coeficiente de absorción del material que es considerado una superficie opaca.

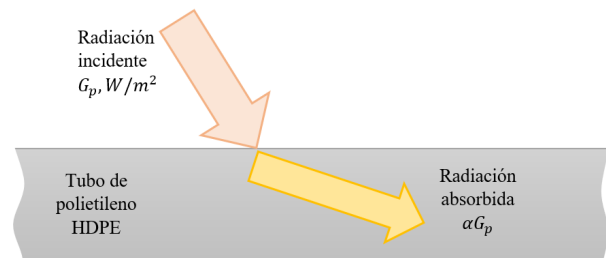


Figura 4. Radiación solar incidente y absorbida [27].

2.4.2. Caso de estudio de modelo matemático

Para el propósito de esta investigación se dispone de un conjunto específicos de datos conocidos como, las propiedades termodinámicas de los materiales involucrados, tales como el aire, el tubo de polietileno de alta densidad (PEAD) y el agua. Además, se cuenta con la

temperatura inicial del agua a temperatura ambiente T_{amb} y la irradiación solar incidente G_{solar} , que serán utilizados como base para los cálculos subsiguientes.

El objetivo de la presente investigación es calcular la temperatura final del agua (T_{fa}) después de haberse producido la transferencia de calor en función los meses de Enero - Octubre. Para ello, se considerará la cantidad de calor transferido q y la resistencia térmica R del sistema estudiado como muestra la tabla 5. Estos parámetros serán objeto de un análisis detallado con el fin de obtener resultados precisos y significativos en la transferencia de calor en el sistema en cuestión.

Tabla 5. Ecuaciones de transferencia de calor y resistencia térmica

Flujo de calor (q)	Resistencia térmica (R)
Radiación	
$q_{rad} = \varepsilon(T_s^4 - T_{amb}^4)$	$R_{rad} = \frac{1}{h_r A}$
Conducción	
$q_{cond} = kCA_{lm} \frac{T_{ext} - T_{int}}{r_{ext}/r_{int}}$	$R_{cond} = \frac{\ln(D_{ext}/D_{int})}{2\pi Lk}$
Convección	
$q_{conv} = h_c A T_{int} - T_{fluido}$	$R_{conv} = \frac{1}{h_c A}$

La transferencia de calor también se da por conducción a través del espesor del tubo, desde el diámetro exterior D_{ext} hasta el diámetro interior D_{int} y por convección desde el diámetro interior del tubo hacia el fluido dentro del tubo. Se considera una resistencia R_1 de radiación, con una serie de resistencias R_2 de conducción y R_3 de convección.

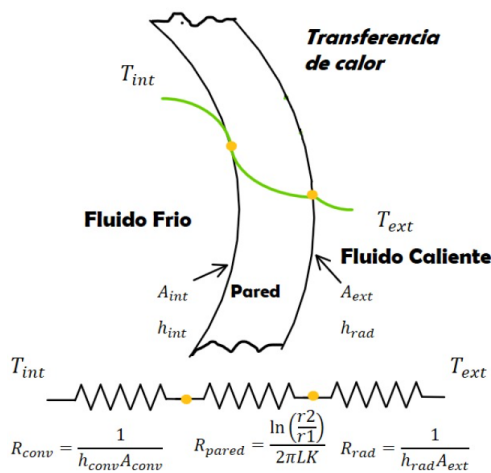


Figura 5. Red de resistencias térmicas asociadas a la transferencia de calor del intercambiador de calor no convencional. [27].

El tubo en forma de espiral de Arquímedes per-

mite una mayor superficie de contacto entre el tubo y el agua, además ayuda a maximizar la captación radiación solar, lo que aumenta la eficiencia en la transferencia de calor. Para esta configuración, se propone un diámetro inicial de espiral de Arquímedes de $r_0 = 7.5cm$ con n vueltas.

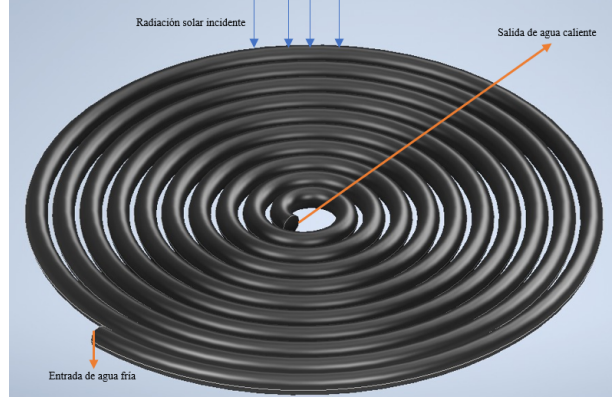


Figura 6. Configuración del tubo de PEAD en espiral de Arquímedes

Además, para determinar el comportamiento del fluido es necesario conocer la velocidad dentro del tubo $V = Q/A_{int}$, teniendo un caudal volumétrico $Q = 0.01m^3/s$ que se obtiene de las especificaciones del medidor regulado por la empresa encargada de la distribución de agua en Cuenca, Ecuador [32] y el área interna de la sección transversal del tubo A_{int} .

Una vez recopilada la información requerida para la elaboración de los cálculos, se inicia el proceso de análisis de la transferencia de calor.

Como primera instancia se busca evaluar el calor útil de radiación solar $Q_{util,rad}$, que para este sistema se trata del Q_{abs} que es la parte de energía incidente absorbida por el tubo de PEAD. En este proceso de transferencia de calor se considera que la pérdida de calor es despreciable y se calcula mediante la ecuación 5.

$$Q_{util,rad} = Q_{abs} \quad (5)$$

2.4.3. Coeficiente de calor total

Para un intercambiador de calor tubular, el coeficiente general de transferencia de calor puede ser determinado como la suma de tres resistencias en serie debidas a:

$$\frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{UA} = \frac{1}{U_o A_o} \quad (6)$$

$$R = \frac{1}{h_r A} + \frac{\ln(D_2/D_1)}{2\pi Lk} + \frac{1}{h_c A} \quad (7)$$

$$h_c = \frac{k}{D} Nu \quad (8)$$

$$h_r = \varepsilon\sigma(T_{ext}^2 + T_{amb}^2)(T_{ext} + T_{amb}) \quad (9)$$

Donde h_c y h_r son los coeficientes de calor por convección y radiación respectivamente.

Para calcular el área de incidencia, se empleará las ecuaciones asociadas a la espiral de Arquímedes [33]. Se tomará en consideración que en cualquier momento del día la incidencia solar afectará solamente a la mitad del área de los tubos, por lo que solo se tomará en cuenta la mitad de la periferia [34], entonces el área de transferencia de calor se representa mediante la siguiente ecuación:

$$A_s = \frac{\pi \cdot D_{ext} \cdot L}{2} \quad (10)$$

Debido a que en la espiral el radio cambia en función del número de vueltas n , se debe considerar que:

$$r = r_0 + a \cdot \theta \quad (11)$$

Donde r_0 es el radio inicial, a es la distancia entre vueltas (incremento por vuelta) y θ es el ángulo en coordenadas polares.

Por lo que la longitud para el cálculo del área depende de la siguiente expresión:

$$L = \int_0^{n2\pi} \sqrt{\frac{a^2}{4\pi^2} + \left(r_0 + \frac{a}{2\pi}\theta\right)^2} d\theta \quad (12)$$

Integrando se obtiene:

$$L = r_0 \cdot \theta + \frac{a}{4\pi} \cdot \theta^2 \Big|_0^{n2\pi} \quad (13)$$

La temperatura exterior del tubo está dada por la radiación incidente en el área superficial del tubo, esta temperatura se puede calcular mediante la ecuación de Stefan-Boltzmann:

$$T_{ext} = \left(\frac{Q_{abs}}{\varepsilon \sigma A_s} + T_{amb}^4 \right)^{1/4} \quad (14)$$

Donde $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \cdot K^4$ es la constante de Stefan-Boltzmann y ε es la emisividad del tubo de PEAD.

El número de Reynolds determina si un flujo es laminar o turbulento y se expresa con la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (15)$$

Donde V es la velocidad del flujo dentro del tubo, D es el diámetro interno del tubo y $\nu = \mu/\rho$ es la viscosidad cinemática del fluido.

Dado que el número de Reynolds es menor a 2000, se tiene un sistema con flujo laminar, entonces el número de Nusselt es:

$$Nu = 3.66 + \frac{0.065(D/L)RePr}{1 + 0.04[(D/L)RePr]^{2/3}} \quad (16)$$

2.4.4. Eficiencia del intercambiador de calor

La carga total del intercambiador de calor se obtiene a partir de la expresión del balance de calor se indica en la ecuación 17.

$$Q = C_C(T_o - T_i) = C_H(T_i - T_o) \quad (17)$$

La tasa de transferencia de calor en el intercambiador de calor también se puede expresar de la misma manera que la ley de enfriamiento de Newton:

$$\dot{Q} = U A_s \Delta T_m \quad (18)$$

Por lo tanto la efectividad del intercambiador de calor esta dada por:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{max}} \quad (19)$$

3. Resultados y Discusión

El conjunto de ecuaciones planteadas en el apartado anterior fueron cargadas en el software MATLAB junto con el modelo de irradiación solar y se logro obtener los siguientes resultados:

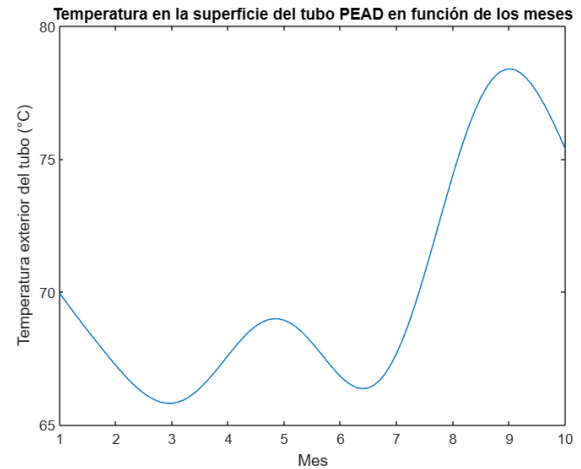


Figura 7. Temperatura de tubo de polietileno

El gráfico de la figura 7 muestra la temperatura exterior calculada del tubo en función de los meses (Enero - Octubre) datos que fueron obtenidos a partir de la ecuación Stefan-Boltzmann. Estos datos son una representación de cómo la radiación solar incide en el tubo y provoca un aumento gradual de la temperatura en su superficie.

La temperatura exterior del tubo tiende a aumentar durante los meses de agosto, septiembre y octubre, meses que corresponden a la temporada cálida o verano en Cuenca. Esto es consistente con la radiación

solar incidente en la ciudad de Cuenca, que es más intensa durante los meses de verano y menos intensa durante los meses de invierno (enero, febrero y marzo).

Por otra parte los datos de resistencia térmica y flujo de calor representan el comportamiento del sistema de intercambiador de calor no convencional de PEAD en diferentes condiciones ambientales y de radiación solar. Dado que la resistencia térmica se mantiene ligeramente constante entre valores de $0.19 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ y $0.20 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, es decir, que el sistema tiene una mayor eficiencia en la transferencia de calor hacia el fluido. El flujo de calor tiene valores que varían significativamente desde 106 W/m^2 hasta 412 W/m^2 , esto puede deberse a cambios en la intensidad y duración de la radiación solar.

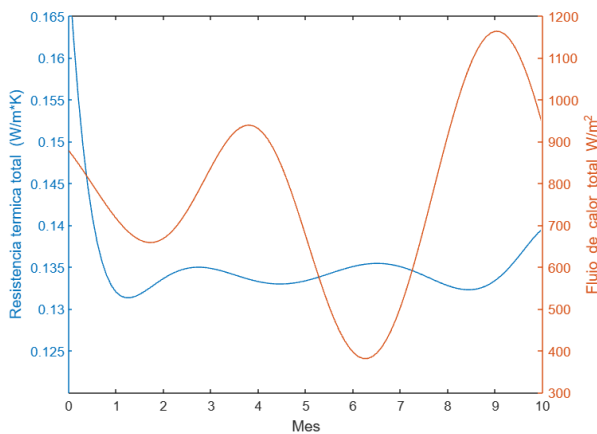


Figura 8. Flujo de calor total y resistencia total del intercambiador de calor no convencional.

La efectividad del intercambiador se refiere a la fracción de energía solar incidente que captura el sistema, lo transfiere y se utiliza posteriormente para en este caso calentar el fluido (agua).

La efectividad para el intercambiador de calor es de 0,94 significa que el sistema puede capturar y utilizar el 94% de la energía solar incidente para calentar agua. Esto indica que el sistema es eficiente a la hora de convertir la energía solar en calor útil.

Los resultados muestran que la configuración con 23 vueltas es efectivo en el proceso de transferencia de calor.

La figura 9 muestra la variación de temperatura para la salida de agua del intercambiador no convencional, dado que el sistema presenta una efectividad alta se ha conseguido llegar a la temperatura objetivo de 35°C , sin embargo este valor es variable dependiendo de la cantidad radiación solar que incide sobre el tubo de PEAD. El gráfico muestra una temperatura de salida de 47°C en el mes de septiembre, uno de los meses con irradiación solar más alta del año y una temperatura mínima en el mes de febrero igual a 34.7°C .

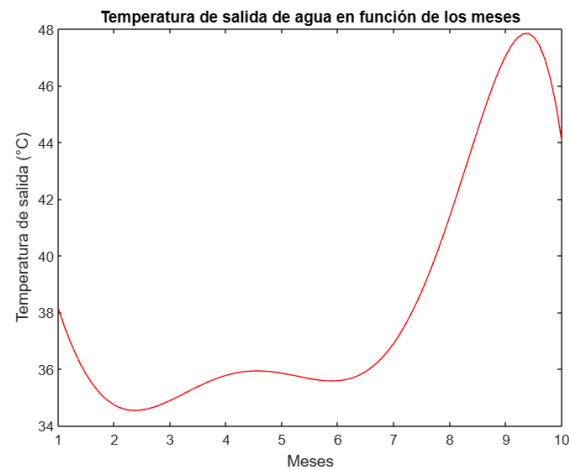


Figura 9. Temperatura de salida de agua en función de los meses de Enero - Octubre.

4. Conclusiones

El modelo de irradiancia obtenido se basa en datos de radiación solar medidos a lo largo del año y se ajusta a un patrón sinusoidal. El modelo proporciona una representación matemática de la radiación solar en función del tiempo (x) y puede usarse para aplicaciones de sistemas solares no convencionales.

Durante los meses de verano de Cuenca (agosto, septiembre y octubre), la temperatura exterior del tubo de PEAD aumenta debido a la mayor intensidad de la radiación solar y la capacidad del material de absorción y emisividad, que determinan cuánta radiación solar se absorbe y se emite por el sistema.

La resistencia térmica y flujo de calor obtenidos reflejan el desempeño del intercambiador de calor no convencional de PEAD bajo distintas condiciones de radiación solar. La resistencia térmica se mantiene constante entre 0.19 y $0.20 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, lo que sugiere una alta eficiencia en la transferencia de calor al fluido. El flujo de calor varía de 106 a 412 W/m^2 , debido a cambios en la intensidad y duración de la radiación solar. Para una configuración con 23 vueltas y una longitud de 44.07m la efectividad del intercambiador es del 94%, siendo un sistema de bajo costo en relación con su precio por metro equivalente a 1.06USD .

Debido a la alta efectividad del sistema, se logra alcanzar la temperatura deseada de 35°C . No obstante, este valor es variable y depende de la radiación solar que incide en el tubo de PEAD y sus propiedades térmicas para la transferencia de calor. Durante el mes de septiembre, uno de los meses con mayor irradiación solar, la temperatura de salida alcanza los 47°C mientras que el mínimo de temperatura alcanzado por el sistema es de 34.7°C que corresponden al mes de febrero.

Referencias

- [1] F. Santos and E. Carrión, “Estadística Anual y Multianual del Sector Eléctrico Ecuatoriano 2022,” 2022. [Online]. Available: <https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2023/03/EstadisticaAnual2022-baja-1.pdf>
- [2] J. Pesántez, “Reducción de costos en el calentamiento de agua en Ecuador, a través de la sustitución de calefones con uso de GLP por sistemas de energía solar térmica,” *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, vol. 1, no. 1, Dec. 2012, number: 1. [Online]. Available: <https://incyt.upse.edu.ec/ciencia/revistas/index.php/rctu/article/view/2>
- [3] J. C. Burbano, Hernan, and O. Julian, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CALENTADOR SOLAR DE AGUA OPERANDO POR TERMOSIFÓN,” *Scientia et Technica*, vol. 2, no. 31, Aug. 2006, number: 31. [Online]. Available: <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/6389>
- [4] Á. Queizán, V. Borges, and A. C. Luna, “Simulación de las temperaturas alcanzadas por la radiación solar en el pavimento,” *ENCUENTRO LATINO AMERICANO E EUROPEO SOBRE EDIFICACIONES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS*, pp. 369–380, 2019.
- [5] R. R. Hernandez, S. B. Easter, M. L. Murphy-Mariscal, F. T. Maestre, M. Tavassoli, E. B. Allen, C. W. Barrows, J. Belnap, R. Ochoa-Hueso, S. Ravi, and M. F. Allen, “Environmental impacts of utility-scale solar energy,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, no. C, pp. 766–779, 2014, publisher: Elsevier. [Online]. Available: <https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v29y2014icp766-779.html>
- [6] N. C. Aimacaña Alomoto and B. E. Blandon Matamba, “Implementación de un seguidor solar de un eje para un sistema fotovoltaico de 100 W en el CEAA – ESPOCH.” bachelorThesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Dec. 2019, accepted: 2019-06-06T18:27:03Z. [Online]. Available: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/10824>
- [7] CONELEC, “ATLAS SOLAR DELECUADOR,” Aug. 2008. [Online]. Available: <https://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00041.pdf>
- [8] G. F. Velasco and E. Cabrera, “Generación solar fotovoltaica dentro del esquema de generación distribuida para la provincia de Imbabura,” Nov. 2009, accepted: 2010-01-15T16:17:54Z. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/9350>
- [9] “ECUADOR CONSOLIDA LA PRODUCCIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE FUENTES RENOVABLES – Ministerio de Energía y Minas.” [Online]. Available: <https://www.recursosyenergia.gob.ec/ecuador-consolida-la-produccion-electrica>
- [10] C. Robles and O. Rodríguez, “Un panorama de las energías renovables en el Mundo, Latinoamérica y Colombia,” vol. 39, no. 34, p. 10, Apr. 2018.
- [11] A. Zervos, “The Renewables 2022 Global Status Report in 150 words,” Jun. 2022. [Online]. Available: <https://www.ren21.net/the-renewables-2022-global-status-report-in-150-words/>
- [12] W. Weiss and M. Spörk-Dür, “Solar heat worldwide edition 2022,” 2021.
- [13] A. B. Meinel and M. P. Meinel, *Aplicaciones de la energía solar*. Reverte, 1982, google-Books-ID: pxEjgDdLIaoC.
- [14] M. R. Peláez-Samaniego and J. L. E. Abad, *Energías renovables en el Ecuador: situación actual, tendencias y perspectivas*. Universidad de Cuenca, 2015.
- [15] O. García, *Aplicaciones térmicas de la energía solar en los sectores residencial, servicios e industrial*. 1ra: Universidad Nacional Autónoma de México, 2017. [Online]. Available: <http://www.fordecyt.ier.unam.mx/pdf/pdfTermoSolar.pdf>
- [16] J. Barbosa-Urbano, W. G. Santamaría, M. A. Mayorga, and D. M. García-Reyes, “Iluminación con energía solar fotovoltaica para autoservicios en bogotá,” *Ingenio Magno*, vol. 5, no. 1, pp. 81–94, 2014.
- [17] F. A. L. Yévenes and F. Andrés, “Diseño de un sistema de riego por medio de energía solar, a través de paneles fv,” *Valdivia-Chile. Universidad Austral De Chile Facultad De Ciencias De La Ingeniería, Escuela De Mecánica*, 2007.
- [18] J. L. Peinado Martínez, R. Vidal Herrera, and J. A. Gándara Fernández, “Deshidratación de alimentos utilizando energía solar térmica,” *CULCyT: Cultura Científica y Tecnológica*, vol. 10, no. Extra 50, pp. 99–107, 2013, publisher: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez Section: CULCyT: Cultura Científica y Tecnológica. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7070085>

- [19] A. Patel, “Enhancing heat transfer efficiency in solar thermal systems using advanced heat exchangers,” *Multidisciplinary International Journal of Research and Development (MIJRD)*, vol. 2, no. 06, pp. 31–51, 2023.
- [20] W. Liu, J. Davidson, and S. Mantell, “Thermal Analysis of Polymer Heat Exchangers for Solar Water Heating: A Case Study,” *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 122, no. 2, pp. 84–91, May 2000. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1115/1.1288027>
- [21] R. A. Osorio, J. F. V. Flores, and J. V. Torres, “Análisis de las características de termoplásticos para el desarrollo de intercambiadores de calor de tubo y coraza,” *Revista Multidisciplinaria de Avances de Investigación*, vol. 3, no. 2, pp. 25–30, Aug. 2017, number: 2. [Online]. Available: <https://www.remai.ipn.mx/index.php/REMAI/article/view/34>
- [22] X. Zheng, X. Zhang, L. Ma, W. Wang, and J. Yu, “Mechanical characterization of notched high density polyethylene (HDPE) pipe: Testing and prediction,” *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 173, pp. 11–19, Jun. 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308016119301322>
- [23] C. C. Uribe, “Análisis del desempeño térmico de una red de colectores solares de baja temperatura ante variaciones de las condiciones de operación y ambientales,” Ph.D. dissertation, Feb. 2022, accepted: 2022-02-01T14:33:48Z Publisher: Universidad de Guanajuato. [Online]. Available: <http://repositorio.ugto.mx/handle/20.500.12059/5548>
- [24] H. H. S. Mendoza *et al.*, “Modelado teórico de un colector solar de baja temperatura en estado transitorio,” 2018.
- [25] M. Dehghan, Y. Rahmani, D. Domiri Ganji, S. Saedodin, M. S. Valipour, and S. Rashidi, “Convection–radiation heat transfer in solar heat exchangers filled with a porous medium: Homotopy perturbation method versus numerical analysis,” *Renewable Energy*, vol. 74, pp. 448–455, Feb. 2015. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148114005035>
- [26] J. D. Chicaiza Catupamba, “Sistema fotovoltaico para proveer energía eléctrica al gad parroquial de curaray en la provincia de pastaza,” B.S. thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería en Sistemas . . . , 2016.
- [27] Y. Cengel, *Transferencia De Calor y Masa, 4ta ed. Cengel McGraw Hill*, 4th ed., McGRAW-HILL, 2011. [Online]. Available: https://www.academia.edu/38408494/Transferencia_De_Calor_y_Masa_4ta_ed_Cengel_McGraw_Hill
- [28] J. D. Garzón Romero and J. C. Ramírez Sapuy, “Determinación de la eficiencia térmica instantánea y la temperatura de salida del colector solar PSHC-1C, del sistema de entrenamiento en energía solar térmica, ubicado en la Fundación Universitaria Los Libertadores,” *instname:Fundación Universitaria Los Libertadores*, 2015, accepted: 2015-12-22T19:51:05Z. [Online]. Available: <https://repository.libertadores.edu.co/handle/11371/311>
- [29] “Global Solar Atlas.” [Online]. Available: <https://globalsolaratlas.info/map?c=-0.986524,-77.844359,7&m=site>
- [30] [Online]. Available: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- [31] [Online]. Available: https://www.plasticosrival.com/files/products/polyethylene/catalogue/PR_Polietileno_AltaDensidad.pdf
- [32] [Online]. Available: https://www.etapa.net.ec/Portals/0/Documentos/convocatoriasanjose2018/9.2.-Especificaciones%20T%C3%A9cnicas_Feb_2018_v01.pdf
- [33] M. Picón-Núñez, G. T. Polley, and J. M. Riesco-Ávila, “Design space for the sizing and selection of heat exchangers of the compact type,” *CHEMICAL ENGINEERING*, vol. 29, 2012.
- [34] Ó. Tinoco Gómez *et al.*, “Obtención de agua caliente sanitaria con energía solar en el cantón cuenca y análisis de la contaminación ambiental,” *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, no. 19, pp. 89–101, 2018.