

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E INDUSTRIAL

MAESTRÍA EN FÍSICA APLICADA, MENCIÓN FÍSICA COMPUTACIONAL

Tema:

“SIMULACIÓN DE UN COLECTOR SOLAR TÉRMICO DE
TUBOS DE VACÍO”

Trabajo de Titulación, previo a la obtención del Grado Académico de
Magister Física Aplicada, mención Física Computacional

Modalidad de titulación "Proyecto de desarrollo"

Autora Lic. Narcisa de Jesús Sánchez Salcán
Directora Ing. Cristina Isabel Reinoso Astudillo, PhD

Ambato-Ecuador

2022

APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial.

El Tribunal receptor de la defensa del Trabajo de Titulación presidido por la Ingeniera Elsa Pilar Urrutia Urrutia Magister, e integrado por los señores: Biofísico Cristian Isaac Vacacela Gómez PhD, Ingeniero José Luis Gavidia García Magister designados por la unidad académica de titulación de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial de la Universidad Técnica de Ambato, para recibir el trabajo de titulación con el tema: “SIMULACIÓN DE UN COLECTOR SOLAR TÉRMICO DE TUBOS DE VACÍO” elaborado y presentado por la señora, Licenciada Narcisca de Jesús Sánchez Salcán, para optar por el Grado Académico de Magister en Física Aplicada mención Física Computacional; una vez escuchada la defensa oral del Trabajo de Titulación el Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la Universidad Técnica de Ambato.

Ing. Elsa Pilar Urrutia Urrutia Mg.
Presidente y Miembro del Tribunal de Defensa

Biofísico Cristian Isaac Vacacela Gómez, PhD.
Miembro del Tribunal de Defensa

Ing. José Luis Gavidia García, Mg.
Miembro del Tribunal de Defensa

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el trabajo de titulación presentado con el tema: “SIMULACIÓN DE UN COLECTOR SOLAR TÉRMICO DE TUBOS DE VACÍO”, le corresponde exclusivamente a: Lic. Narcisa de Jesús Sánchez Salcán, autora bajo la dirección de la Ing. Cristina Isabel Reinoso Astudillo, PhD directora del trabajo de titulación; y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.

Lic. Narcisa de Jesús Sánchez Salcán

AUTORA



Firmado electrónicamente por:
**CRISTINA ISABEL
REINOSO
ASTUDILLO**

Ing. Cristina Isabel Reinoso Astudillo, PhD.

DIRECTORA

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que el Trabajo de Titulación, sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y proceso de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los derechos de mi trabajo de Titulación, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad Técnica de Ambato.

Lic. Narcisa de Jesús Sánchez Salcán

C.C. 0602924250

ÍNDICE GENERAL

Contenido

PORTADA	i
APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iii
DERECHOS DE AUTOR	iv
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
LISTA DE SÍMBOLOS	xiii
AGRADECIMIENTO	xiv
DEDICATORIA	xv
RESUMEN EJECUTIVO	xvi
EXECUTIVE SUMMARY	xviii
CAPÍTULO I	1
I El problema de investigación	1
1.1 Introducción	1
1.2 Justificación	3
1.3 Objetivos	5
1.3.1 Objetivo general	5

1.3.2	Objetivos específicos	5
CAPÍTULO II		6
II Antecedentes investigativos		6
2.1	Estado del arte	6
2.2	Marco teórico	10
2.2.1	Colector solar	10
2.2.2	Tipos de colectores solares térmicos	10
2.2.3	Sistemas solares térmicos de tubo de vacío	12
2.2.4	Principio de funcionamiento del sistema de colector de tubo de vacío (ETC):	14
2.2.5	Especificaciones de los tubos de vidrio evacuados	16
2.2.6	Principales ángulos solares y de los paneles solares	16
2.2.7	Energía térmica	21
2.2.8	Radiación Solar (La energía del sol)	23
2.2.9	Radiación del haz en superficies inclinadas	25
2.2.10	Radiación difusa en superficies inclinadas	25
2.2.11	Radiación reflejada en el suelo	27
2.2.12	Modelo completo para la radiación global en el plano inclinado	28
2.2.13	Irradiancia	28
2.2.14	Análisis termodinámico del colector con tubos de vacío	29
2.2.15	Factor de eficiencia del colector	33
2.2.16	Eficiencia instantánea del colector	34
2.2.17	Temperatura media del colector	37
2.2.18	Cálculo del área absorbente del colector	37
2.2.19	Diseños factoriales con dos factores	38
2.2.20	Replica de corrida	38
2.3	Modelo estadístico e hipótesis de interés	38
CAPÍTULO III		40
III Marco Metodológico		40
3.1	Ubicación	40

3.2	Equipos y materiales	41
3.3	Tipo de investigación	41
3.3.1	Según el enfoque	41
3.3.2	Según el tiempo	41
3.3.3	Según su profundidad de alcance	41
3.4	Prueba de hipótesis	42
3.4.1	Hipótesis de investigación o trabajo:	42
3.4.2	Hipótesis nula:	42
3.5	Población o muestra	43
3.6	Recolección de la información	43
3.7	Procesamiento de la información y análisis estadístico	44
3.7.1	Validados del modelo de simulación	45
3.8	Variable respuesta o resultados alcanzados	45
CAPÍTULO IV		47
IV Resultados y discusión		47
4.1	Especificaciones técnicas del colector de tubo de vacío	47
4.1.1	Propiedades del tubo de vidrio de borosilicato	48
4.1.2	Dimensiones del colector de tubos de vacío	48
4.2	Análisis descriptivo	49
4.2.1	Análisis descriptivo de las temperaturas de entrada	49
4.3	Proceso de simulación de la temperatura de agua en el colector solar .	53
4.3.1	Ángulo de inclinación	53
4.3.2	Ángulo de declinación del sol	54
4.3.3	Ángulo de hora solar	54
4.3.4	Ángulo de incidencia del sol	54
4.3.5	Ángulo cenital	55
4.3.6	Radiación solar	56
4.3.7	Factor de eficiencia del colector solar	57
4.3.8	Cálculo del área absorbente del colector	58
4.4	Simulación de la temperatura	59
4.4.1	Simulación de la temperatura 1 en el colector solar	59

4.4.2	Simulación de la temperatura 2 del colector solar	62
4.4.3	Simulación de la temperatura 3 del colector solar	64
4.5	Contraste de Hipótesis	67
4.5.1	Prueba de normalidad	67
4.5.2	Validados del modelo de simulación	69
4.5.3	Contraste de correlación	70
CAPÍTULO V		82
V Conclusiones y recomendaciones		82
5.1	Conclusiones	82
5.2	Recomendaciones	86
Referencias		87
Appendices		95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1:	Clasificación de los colectores solares según el grado de concentración	12
Tabla 2.2:	Especificaciones de los tubos de vidrio evacuados	16
Tabla 2.3:	Tipos de colectores planos y sus características.	37
Tabla 4.1:	Propiedades del tubo de vidrio de borosilicato	48
Tabla 4.2:	Dimensiones del colector de tubos de vacío	48
Tabla 4.3:	Estadísticos descriptivos de las tres temperaturas iniciales . . .	49
Tabla 4.4:	Estadísticos descriptivos de las tres temperaturas finales	50
Tabla 4.5:	Análisis descriptivos de la variable Temperatura ambiente y radiación	51
Tabla 4.6:	Ángulos de inclinación	53
Tabla 4.7:	Datos promedios de la temperatura final 1	60
Tabla 4.8:	Raíz del error cuadrático medio de la temperatura 1	61
Tabla 4.9:	Datos promedios de la temperatura final 2	62
Tabla 4.10:	Raíz del error cuadrático medio de la temperatura 2	64
Tabla 4.11:	Datos promedios de la temperatura final 3	64
Tabla 4.12:	Raíz del error cuadrático medio de la temperatura 3	66
Tabla 4.13:	Prueba de normalidad de la temperatura experimental	68
Tabla 4.14:	Temperatura de salida 1 con 0° de orientación	68
Tabla 4.15:	Coefficiente de eficiencia de la temperatura 1	69
Tabla 4.16:	Coefficiente de eficiencia de la temperatura 2	70
Tabla 4.17:	Coefficiente de eficiencia de la temperatura 3	70
Tabla 4.18:	Test de correlación de la temperatura 1	71
Tabla 4.19:	Test de correlación de la temperatura 2	72

Tabla 4.20:	Test de correlación de la temperatura 3	72
Tabla 4.21:	Análisis ANOVA de la Temperatura 1	74
Tabla 4.22:	Análisis ANOVA de la Temperatura 2	76
Tabla 4.23:	Análisis ANOVA temperatura 3	78
Tabla 4.24:	Supuestos del modelo factorial 6×4 en los residuos	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura. 2.1:	(a) muestra el tubo de vidrio interior de menor diámetro recubierto selectivamente para la absorción de la radiación solar dentro del tubo de vacío. (Gholami et al., 2020) y la Figura 2.1 (b) muestra el montaje experimental del calentador de agua solar de tubo de vacío de agua con tubo de vacío (Kyekyere et al., 2021)	13
Figura. 2.2:	Principio de funcionamiento del sistema de colector de tubo de vacío (Industries, 2020)	15
Figura. 2.3:	(a) muestra los ángulos horarios durante el día., (Pinho et al.,2008) y la Figura 2.3 (b) se muestran los ángulos que definen la posición del Sol con respecto a la Tierra y a la esfera celeste; la declinación δ y el ángulo horario ω (Widen y Munkhammar,2019)	19
Figura. 2.4:	Principales ángulos solares y del colector solar. (Al-Khazzar, 2015)	21
Figura. 2.5:	Variación de la radiación atmosférica solar (Alonso-Lorenzo, 2019)	24
Figura. 2.6:	Relación entre la radiación del haz en la superficie inclinada y en la superficie horizontal (Martínez-Gracia et al., 2019) .	25
Figura. 2.7:	(a) muestra el sistema típico de captación de energía solar, (Dasari, N. y Sridhar, K., 2017) y la Figura 2.7 (b) se muestran el balance de energía en el colector solar (Lozano,2019)	30

Figura. 2.8:	Eficiencia de los colectores solares con diferentes diferencias de temperatura e insolación solar (Shamshirgaran et al., 2020)	35
Figura. 3.1:	Ubicación de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH	40
Figura. 4.1:	Temperaturas de entrada	50
Figura. 4.2:	Temperaturas finales	51
Figura. 4.3:	Radiación solar	52
Figura. 4.4:	Temperatura ambiente	53
Figura. 4.5:	Simulación de la temperatura 1 en el colector solar	61
Figura. 4.6:	Simulación de la temperatura 2 del colector solar	63
Figura. 4.7:	Simulación de la temperatura 3 del colector solar	66
Figura. 4.8:	Interacción entre ángulos de inclinación y orientación de la T_1	75
Figura. 4.9:	Comparación de medias múltiples de Tukey de la temperatura 1	76
Figura. 4.10:	Interacción entre ángulos de inclinación y orientación de la T_2	77
Figura. 4.11:	Comparación de medias múltiples de Tukey de la temperatura 2	78
Figura. 4.12:	Interacción entre ángulos de inclinación y orientación de la T_3	79
Figura. 4.13:	Comparación de medias múltiples de Tukey de la temperatura 3	80

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descripción
ϕ	Latitud
δ	Ángulo de inclinación
n	Número del día en el año
θ_z	Ángulo cenital
α_s	Ángulo de altitud solar
ω	Ángulo horario
H_s	Tiempo solar aparente
γ	Ángulo de azimut de la superficie
γ_s	Ángulo de azimut solar
β	Pendiente
θ	Ángulo de incidencia
τ	Transmitancia del acristalamiento del colector
α	Coefficiente de absorción de la placa
η	Eficiencia del colector (%)
η_o	Rendimiento óptico del colector (%)
\dot{m}	Flujo masivo (kg/s)
μ	Media general
α_i	Efecto debido al i-ésimo nivel del factor A
β_j	Efecto del j-ésimo nivel del factor B
α_{ij}	Efecto de interacción en la combinación ij
ϵ_{ijk}	Error aleatorio
ρ^2	Varianza

AGRADECIMIENTO

A Dios por darme la sabiduría, la fuerza y la tenacidad para culminar con éxito ésta etapa académica.

A mi amada familia por todo el apoyo brindado durante mis estudios.

A mis padres, nunca podría haber hecho esto sin la fe, el apoyo y el ánimo constante. Gracias por enseñarme a creer en mí misma, en Dios y en mis sueños.

A mi directora de tesis por su orientación y apoyo a lo largo del proceso de investigación.

Al grupo de Energías Alternativas y Ambiente (GEAA) de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, por la información entregada para lograr los objetivos trazados en este proyecto.

DEDICATORIA

Este proyecto de investigación va dedicado a cuatro pilares fundamentales en mi vida, que me han ayudado a realizarme profesionalmente. Primero a Dios, por ser la fuente de todos mis logros y bendiciones. A mi difunto padre Víctor Rafael por enseñarme valores y fortalezas que me sirvieron para nunca rendirme. A mi esposo Fabián Patricio por su apoyo incondicional. A mis queridos y adorables hijos: Steven y Katherine a quienes les amo mucho y son el motor que me ha inspirado para alcanzar con éxito ésta meta propuesta.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA
E INDUSTRIAL
MAESTRÍA EN FÍSICA APLICADA, MENCIÓN FÍSICA
COMPUTACIONAL

TEMA:

SIMULACIÓN DE UN COLECTOR SOLAR TÉRMICO DE TUBOS
DE VACÍO

AUTORA: Lic. Narcisa de Jesús Sánchez Salcán, Dra

DIRECTORA: Ing. Cristina Isabel Reinoso Astudillo, PhD

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Energías Renovables y desarrollo
sostenible

FECHA: Marzo 21, 2022

RESUMEN EJECUTIVO

La energía solar es la más abundante, inagotable y limpia de todos los recursos energéticos renovables hasta la fecha, permite reducir tanto el consumo de combustibles fósiles como la emisión de contaminantes nocivos introducidos a la atmósfera. Actualmente las tecnologías solares son parte de la estrategia energética mundial, en virtud que no presentan riesgos ambientales o para la salud. La presente investigación permite determinar el posicionamiento óptimo del colector solar de tubos de vacío ubicado en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo para la obtención de energía térmica útil. El tipo de investigación es correlacional con un enfoque cuantitativo y un diseño experimental. Se re-

visan estudios que incluyen modelos experimentales y de simulación, lo que ayuda a comparar enfoques anteriores con el tratamiento actual del problema. El modelo matemático de simulación se realizó en el software estadístico Rstudio, con tres temperaturas iniciales (T_1, T_2, T_3) y con diferentes ángulos de inclinación empezando en 10° hasta los 60° y con 4 ángulos orientación ($0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ y 90°). Se concluye que la temperatura del agua en el sistema de colector solar se relaciona inversamente con el ángulo de inclinación, ya que al aumentar dicho ángulo de 10° hasta 60° se observó que la temperatura del agua descende, por lo tanto si se desea maximizar la temperatura del agua se debe colocar con un ángulo de inclinación de 10° y 0° de orientación.

Palabras clave: Collectores solares, Collectores de tubo de vacío, Ángulo de inclinación, Simulación

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA
E INDUSTRIAL
MAESTRÍA EN FÍSICA APLICADA, MENCIÓN FÍSICA
COMPUTACIONAL

THEME:

**SIMULATION OF A VACUUM TUBE SOLAR THERMAL
COLLECTOR**

AUTHOR: Lic. Narcisa de Jesús Sánchez Salcán, Dra

DIRECTED BY: Ing. Cristina Isabel Reinoso Astudillo, PhD

LINE OF RESEARCH: Renewable energy and sustainable development

DATE: March 21, 2022

EXECUTIVE SUMMARY

Solar energy is the most abundant, inexhaustible and clean of all renewable energy resources to date, it allows to reduce both the consumption of fossil fuels and the emission of harmful pollutants introduced into the atmosphere. Solar technologies are currently part of the global energy strategy, by virtue of which they do not present environmental or health risks. The present research allows to determine the optimal positioning of the vacuum tube solar collector located at the Escuela Politécnica Superior de Chimborazo for obtaining useful thermal energy. The type of research is correlational with a quantitative approach and an experimental design. Studies that include experimental and simulation models

are reviewed, which helps to compare previous approaches with the current treatment of the problem. The mathematical model simulation was performed in the statistical software Rstudio, with three temperatures initials (T_1, T_2, T_3) and with different angles of tilt starting at 10° to 60° and with 4 angles orientation ($0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ and 90°). It is concluded that the water temperature in the solar collector system is inversely related to the angle of inclination, since when increasing said angle from 10° to 60° it was observed that the water temperature decreases, therefore if you want to maximize the water temperature it should be placed with an angle of inclination of 10° and 0° orientation.

Key words: Solar collectors, Vacuum tube collectors, Tilt angle, Simulation

CAPÍTULO I

El problema de investigación

1.1 Introducción

El aumento de la población y los avances tecnológicos han contribuido a un importante aumento de la demanda de energía (Kannan, N. y Va-keesan, D., 2016). La demanda mundial de energía aumentó un 2,3% en 2018 con respecto al año anterior. Esto ha contribuido a la actual crisis energética existente, que es de considerable interés a nivel mundial (Kyekyere et al., 2021). Los colectores o paneles solares han sido el punto focal de la investigación en el campo de la energía solar, muchos estudios pretenden encontrar la inclinación óptima que maximice el nivel de insolación anual. Sin embargo, hasta ahora no se ha logrado un consenso generalizado, en parte debido a las diferentes hipótesis de los modelos aplicados (Schuster, 2020).

En la década de los 80 el Instituto Ecuatoriano de Electrificación (IN-ECEL) promueve investigaciones acerca de recursos energéticos que pueden ser generados a través del uso del viento, recursos hídricos, geotermia, energía solar etc. Esto surge tras la necesidad de mejorar el medio en que vivimos, ya que la explotación de combustibles fósiles

con el fin de cubrir las necesidades del hombre provoca daños que a largo plazo serán irreversibles (Poveda-Burgos et al., 2017). En diferentes cantones del Ecuador se ha realizado estudios e implementaciones de colectores solares de placa plana y de tubos de vacío, donde el objetivo principal es analizar el comportamiento de la temperatura del agua al momento de ingresar dentro del sistema, además analizan la eficiencia con la cual trabaja el dispositivo solar, a diferentes especificaciones climáticas, localización, inclinación de la placa plana o de los tubos especificados por los fabricantes del colector.

Ecuador es rico en recursos renovables, en el año 2016 se presentó el Plan Nacional de Eficiencia Energética 2016-2035 (PLANEE) que fue aprobado por la Asamblea Nacional en abril de 2019 para fomentar la sustitución de combustibles y fuentes de energía con alto impacto ambiental por otros con bajo o nulo contenido de carbono, incluyendo fuentes de energía renovable (Cárdenas, 2020).

El presente estudio surge de la necesidad de ahorrar recursos al momento de diseñar calentadores solares de tubos evacuados, busca determinar el ángulo de inclinación óptimo de un colector solar en una determinada región para obtener la eficiencia de energía máxima. Se centra en un diseño de investigación experimental, la metodología empleada para la determinación del ángulo óptimo se realiza de manera teórica y experimental, se analiza el modelo matemático a utilizar tomando en consideración la caracterización de las condiciones climáticas de la ciudad de Riobamba, según la literatura el ángulo de inclinación varía principalmente según la ubicación geográfica y el clima del lugar donde se realiza el estudio. Por último, se utiliza el modelo matemático para elaborar la

simulación.

El centro de Energías Alternativas y Ambiente (CEAA) de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) es un grupo de investigación, el cual se ha creado con la finalidad de explorar energías limpias y renovables que ayuden a mejorar la calidad de vida del hombre. Además que ayuden a reforzar y actualizar conocimientos referentes a energías alternativas y cambio climático.

La investigación se realizó en tres fases, la primera fase se enfoca en el problema de investigación, justificación del problema a investigar, posterior a esto se realiza una amplia búsqueda bibliográfica para la elaboración de los antecedentes investigativos; la segunda fase constituye la elaboración del marco metodológico y obtención de resultados; finalmente se presenta las conclusiones y recomendaciones.

1.2 Justificación

El calentamiento global se está convirtiendo en uno de los problemas más urgentes en el mundo de hoy, por lo que se necesita encontrar la manera de utilizar la energía para el beneficio de todos. El rápido crecimiento de la población ha llevado a un aumento de la demanda de energía a nivel mundial y el uso de recursos no renovables.

En Ecuador la idea de diseñar colectores solares más eficientes y baratos que los ya existentes se vuelve una necesidad, debido al gran incremento en el mercado. Además, la necesidad de optimizar sus diseños, permita tener un panorama del cual sería el adecuado en cuanto a materiales, dimensiones y posicionamiento de los colectores solares para alcanzar

su máxima efectividad.

Es en este sentido, donde el proceso de simulación se vuelve una opción viable, ya que ayuda a trabajar en la optimización de los diseños variando los parámetros que se considere pertinentes, así como pueden reducir los costos de la experimentación.

La preocupación de la contaminación tóxica, las fugas de combustible, la radiación nuclear, el calentamiento global y lo que sucederá si los precios de producción de energía aumenten, por todos estos problemas es necesario encontrar nuevas fuentes disponibles y sostenibles como es la energía renovable.

Los beneficiarios del presente estudio serán los profesionales técnicos, mecánicos, electromecánicos, eléctricos y empresas o industrias las que están dedicadas a realizar construcciones, instalaciones y montajes de los sistemas de colectores solares de tubos de vacío. Así también se beneficiarán los estudiantes y profesores de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo puesto que el procedimiento obtenido puede ser usado en clases para diseños y análisis de un sistema eficiente de consumo de energía en sistemas de colectores solares de tubos de vacío.

Para ello, se propone elaborar un modelo matemático para el cálculo del ángulo de instalación óptimo para paneles de células solares fijas, la cual es de gran utilidad porque reduciría los costos de implementación y ensayo experimental de las mejoras producidas.

Esto permitirá que al momento de tener el sistema y verificado con datos experimentales ya existentes, se puedan emplear cambios de geometría

(posiciones del colector) o de materiales, lo que representa la posibilidad de otros proyectos para optimizar este tipo de sistemas. Además del ahorro de tiempo implica el conocer el comportamiento del calentador en diversas condiciones meteorológicas a lo largo del tiempo, con lo que se pueden hacer diversas proyecciones y conocer las condiciones de operación mínimas y máximas para una región específica.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Determinar el posicionamiento óptimo del colector solar de tubos de vacío ubicado en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo para la obtención de energía térmica útil.

1.3.2 Objetivos específicos

Recolectar datos experimentales del dispositivo solar térmico ubicando a 0° y 30° .

Simular el colector solar térmico de tubos de vacío con 6 ángulos desde 10° a 60° con incrementos de 10° para determinar la eficiencia de la energía térmica recolectada.

Comparar los resultados obtenidos de la simulación con los del colector solar de tubos de vacío a diferentes ángulos de inclinación.

CAPÍTULO II

Antecedentes investigativos

El uso de energías limpias y renovables ha tomado relevancia durante las últimas décadas, por lo que diversos países de potencia mundial elaboran planes de contingencia ante la explotación de recursos fósiles no renovables, esto ha establecido diversas investigaciones que busquen mitigar la contaminación del medio ambiente y preservar la calidad de vida del hombre.

A continuación, se muestra un resumen de los trabajos seleccionados, en relación al tema de estudio.

2.1 Estado del arte

El acceso a energía confiable, asequible y sostenible es esencial para mejorar los niveles de vida, el desarrollo y el crecimiento económico (Franco et al., 2017), la gravedad de los problemas de contaminación atmosférica, clima y seguridad energética en todo el mundo requiere una transformación masiva y prácticamente inmediata de la infraestructura energética mundial hacia una energía 100% limpia y renovable que produzca cero emisiones (Jacobson et al., 2017). La energía solar como

fuentes renovables tienen el potencial de reducir la huella ecológica.

Los estudios de Ike et al. (2020), señalan que el consumo de energía renovable está directamente vinculado a la reducción de la contaminación en los países industrializados de Europa. Así mismo, Saidi y Omri (2020) afirman que la eficiencia energética de las energías renovables mitiga las emisiones de carbono y amplía el crecimiento económico a corto y largo plazo. De igual forma Ciulla et al. (2020) menciona que es necesario un diseño óptimo de un sistema solar térmico para minimizar el tiempo de recuperación y difundir el uso de energía renovable para la producción de agua caliente sanitaria en áreas residenciales.

Coetzee et al. (2017), desarrollaron e implementaron un modelo de rendimiento teórico del sistema que se resolvió numéricamente utilizando el Engineering Equation Solver, los resultados muestran el rendimiento térmico del sistema durante las estaciones secuenciales a diferentes ángulos de inclinación.

Se obtuvieron y presentaron los parámetros óptimos de rendimiento que influyen en el rendimiento global del colector, en función del consumo de agua de los ocupantes. En verano, un ángulo de inclinación de 25° produjo la mayor tasa de calor útil y en invierno, un ángulo de inclinación de 40° produjo la mayor.

Por último, un sistema de colectores de 20 tubos funcionó al máximo en septiembre, alcanzando una temperatura de salida de $103,98^\circ\text{C}$ y produciendo una tasa de calor útil de $1\,919,85\text{ W}$. En otoño y primavera, el colector produjo resultados similares durante los ángulos de pendiente con pequeñas diferencias. El ángulo de pendiente estacional óptimo para

un sistema solar water heating (SWH) se identificó como 30° .

Yadav y Saikhedkar (2017) realizó un modelo de simulación del rendimiento para un colector de tubos de vacío en el software MATLAB comparó los datos experimentales con los resultados teóricos, este modelo permitió evaluar la eficiencia térmica del colector de tubos de vacío, se comprobó que el rendimiento del colector depende en gran medida de la radiación térmica incidente en el colector, la eficiencia promedio del colector se determinó en el rango de 71,4 % a 75,6% que está en el rango permitido de eficiencia máxima y mínima de la configuración física del modelo de colector.

Mao et al. (2019) elaboran un modelo genérico a partir del modelo de cielo difuso isotrópico para evaluar los ángulos de inclinación óptimos de los colectores y los reflectores. La energía solar total máxima recolectada durante la temporada de calefacción puede variar de 118,877 MJ a 239,806 MJ. La máxima reducción posible de la radiación solar puede variar de 13.524 MJ a 16.234 MJ. Tanto para la calefacción como para la temporada de verano, los colectores deben estar inclinados en un ángulo de inclinación obtuso comprendidos desde 0° hasta los 180° y acoplados con reflectores inferiores en un ángulo de inclinación agudo en el intervalo $[0^\circ, 90^\circ]$.

Sassine (2016) desarrolla un estudio acerca de la posición óptima de los paneles solares, donde se considera constante el índice de cielo claro para la determinación de la irradiación solar de Beirut para diferentes paneles en cualquier momento del año (día y hora). Analiza tres configuraciones óptimas: un ángulo de inclinación constante, un ángulo de

inclinación ajustable mensualmente y un sistema de seguimiento solar. Los resultados muestran que el ángulo de inclinación óptimo para la ciudad de Beirut es cercano a los 30° ($27,9^\circ$). Al variar este ángulo mensualmente, se obtiene un aumento del 6% de la energía recogida en comparación con un ángulo óptimo constante; determinó la posición óptima de los colectores solares según el Algoritmo de Gradiente Reducido Generalizado (GRG2).

Por otra parte, los resultados experimentales del estudio: El efecto del ángulo de inclinación en el rendimiento del colector de aire solar de tubo de vacío, realizado por Dabra et al. (2013) revelaron que la diferencia de temperatura del aire y la eficiencia térmica del colector de aire solar de tubo evacuado a un ángulo de inclinación de 30° es mejor en comparación con el ángulo de inclinación de 45° . Los resultados también mostraron que el ángulo de inclinación de 30° con reflector tenía mas rendimiento térmico en comparación con el ángulo de 45° con y sin reflector. De acuerdo a estos resultados se concluye que si aumenta el ángulo de inclinación el rendimiento térmico del colector de aire solar disminuye.

Ndiaye (2015) propone un modelo de eficiencia térmica simplificado para panel solar utilizando colectores de tubos de vacío con tanque de almacenamiento estratificado, el modelado del colector lo realiza considerando 3 nodos de temperatura: los de la envoltura de vidrio, los del absolvedor y los del fluido.

Los resultados del estudio experimental del rendimiento térmico de un colector solar de tubería de calor de tubo de vacío en las condiciones

climáticas de Polonia realizado por Siuta-Ochoa et al. (2021), demuestran que el valor promedio de rendimiento energético en el colector solar se obtuvo en el nivel de $4,28 MJ/(m^2 \cdot d)$. Las eficiencias energéticas mensuales promedio del colector solar en julio y agosto fueron del 45,3% y 32,9%. El aumento de la velocidad del viento a 0,86 m/s disminuye la eficiencia térmica y la eficiencia de energía en un 67% y un 41%, respectivamente.

2.2 Marco teórico

2.2.1 Colector solar

Los colectores solares son dispositivos utilizado para convertir la radiación solar en calor (Das y Saha, 2019), son el componente clave de los sistemas de calefacción solar activa. Recogen la energía del sol, transforman su radiación en calor y lo transfieren a un fluido (normalmente agua o aire) (Struckmann, 2008). Los colectores solares capturan la energía electromagnética del sol y la convierten en energía térmica (Aisa, 2017).

2.2.2 Tipos de colectores solares térmicos

Existen dos tipos principales de colectores de energía solar: los paneles fotovoltaicos y los colectores solares térmicos.

Paneles fotovoltaicos

Un panel fotovoltaico es un dispositivo que convierte la energía electromagnética del sol en energía eléctrica, se compone de una combinación de módulos solares. Las células solares se conectan en paralelo y/o en

serie para proporcionar una tensión de salida deseada. Estas células solares están fabricadas con materiales semiconductores, de los cuales el silicio es el más utilizado. La absorción de la energía electromagnética (luz) del sol la realizan los electrones de valencia de los átomos que componen el semiconductor (Alhaidari, 2017).

Paneles solares térmicos

Un colector solar térmico es un dispositivo que convierte la energía electromagnética del sol en energía térmica de un fluido. El colector solar empleado va a depender de la utilización que se le entregue. Por ejemplo, si queremos calentar una piscina hasta una temperatura de 25-28 grados Celsius, en primavera, necesitamos un captador solar simple, ya que fácilmente la temperatura ambiente será de este orden o incluso superior. Por otra parte, si queremos calentar un fluido hasta temperaturas de 200°C necesitaremos colectores solares de concentración para que concentren la radiación solar y la transfieran a un volumen pequeño de fluido (Ver Tabla 2.3).

Actualmente, en el mercado de la energía solar podemos diferenciar los siguientes tipos de colectores solares térmicos:

- El colector solar térmico de placa plana o plano. Este tipo de panel solar capta la radiación solar recibida en una superficie para calentar un fluido. A menudo se utiliza el efecto invernadero para capturar el calor.
- El colector solar térmico de tubos de vacío. Este colector solar térmico consta de un conjunto de tubos cilíndricos, formados por un absorbedor selectivo, situado sobre un asentamiento reflector y

rodeado de un cilindro de vidrio transparente.

- El colector solar térmico de concentración de la radiación solar. Este tipo de colectores captan la radiación recibida en una superficie relativamente grande ya la concentran mediante espejos en una superficie más pequeña.

Tabla 2.1: Clasificación de los colectores solares según el grado de concentración

Categoría	Ejemplo	Temperatura,(°C)	Eficiencia,(%)
Sin concentración	Placa plana	hasta 75	30-50
	Tubo de vacío		
Concentración media	Cilindro parabólico	hasta 200	50-70
Alta concentración	Paraboloidal	1500 y más	60-75

Fuente: Jesco Z., (2008)

La principal diferencia en el rendimiento entre los colectores de placa plana y los de tubo de vacío es el hecho de que los colectores de tubos de vacío tienen menos pérdidas térmicas y, por tanto, pueden alcanzar temperaturas de salida más elevadas (Grahovac, 2010).

2.2.3 Sistemas solares térmicos de tubo de vacío

Akhtar y Alvarez (como se citó en Gond et al., 2016) asegura que los sistemas térmicos solares de tubos evacuados es uno de los sistemas térmicos solares más populares en funcionamiento. y funcionan mejor que los calentadores de agua solares de placa como resultado de su mayor superficie expuesta a la absorción de la luz solar (Kyekyere et al., 2021).

Un sistema solar evacuado es el medio más eficiente y común de generación de energía solar térmica con una tasa de eficiencia del 70%. Por

ejemplo, si el colector genera 3000 kilovatios-hora de energía en un año, se utilizarían 2100 kilovatios-hora en el sistema para calentar agua. La tasa de eficiencia se logra debido a la forma en que se construyen los sistemas de tubos de vacío, lo que significa que tienen un excelente aislamiento y prácticamente no se ven afectados por las temperaturas del aire.

Estos, captadores permiten calentar agua hasta temperaturas de 110 °C, hecho que posibilita la utilización de sistemas de distribución de calor convencionales en aplicaciones de calefacción con agua. En general, el rendimiento del captador de vacío es superior al del captador plano convencional, y se mantiene más constante ante variaciones en la temperatura ambiente o en la radiación solar incidente. Estos colectores solares constan de un tubo de calor dentro de un tubo sellado al vacío (Kalogirou, 2014), como se muestra en la Fig. II.1(a) y es el componente principal, que absorbe la energía solar. En una instalación real, muchos tubos están conectados al mismo colector, como se muestra en la figura II.1(b).



Figure 2.1: (a) muestra el tubo de vidrio interior de menor diámetro recubierto selectivamente para la absorción de la radiación solar dentro del tubo de vacío. (Gholami et al., 2020) y la Figura 2.1 (b) muestra el montaje experimental del calentador de agua solar de tubo de vacío de agua con tubo de vacío (Kyekyere et al., 2021)

Las grandes ventajas que presentan los colectores solares de tubos de vacío son su alto rendimiento. Por otro lado, en caso de que uno de los tubos se estropeará, no es necesario cambiar todo el panel por uno nuevo, sino que sólo hay que cambiar el tubo afectado. Por el contrario, como inconveniente tenemos que, en relación con los colectores solares de placa plana, estos resultan más caros.

2.2.4 Principio de funcionamiento del sistema de colector de tubo de vacío (ETC):

Los sistemas solares de calentamiento de agua que utilizan tubos de vacío hechos de vidrio de borosilicato con un revestimiento especial para absorber la energía solar se denominan sistema colector de tubo de vacío.

Se evacua el aire entre el espacio de dos tubos de vidrio. Da como resultado un alto nivel de vacío, que actúa como el mejor aislamiento para minimizar la pérdida de calor del tubo interior. El revestimiento negro de la cámara de aire absorbe la energía solar y la transfiere al agua. El agua en la parte superior del tubo de vacío se calienta y, por lo tanto, se vuelve más liviana, por lo que comienza a moverse hacia arriba en el tanque. Al mismo tiempo, el agua fría, que es pesada, desciende del tanque y se almacena en el fondo. El fenómeno se denomina circulación termosifónica natural, que se produce en todos los tubos.

Sistemas de termosifón: en este tipo el agua fluye a través del sistema y cuando el agua se calienta sube a medida que el agua más fría se hunde. El colector se instala debajo del tanque de almacenamiento para que el agua caliente suba al tanque. Estos sistemas no involucran ninguna

bomba y son más confiables.

El tubo de vacío, como se muestra en la Fig. 2.2 , es el componente principal, que absorbe la energía solar. El tubo de vacío es un conjunto de dos tubos de vidrio de borosilicato concéntricos.

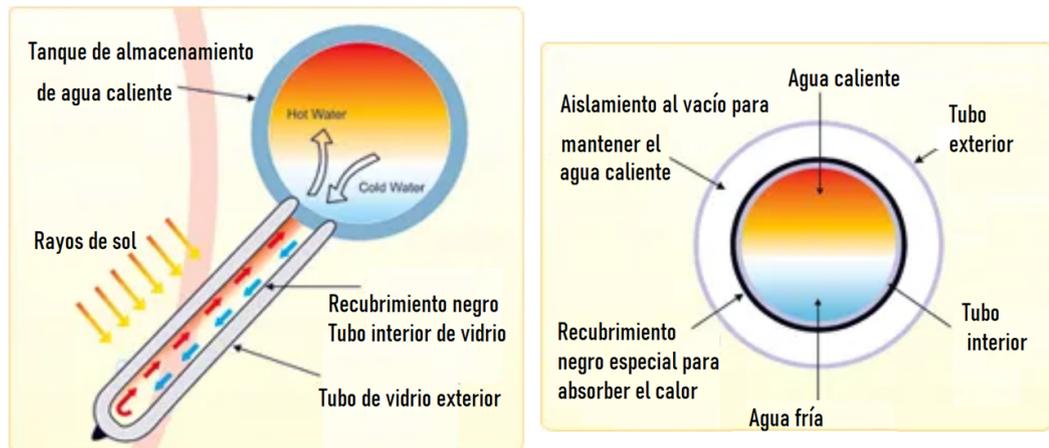


Figure 2.2: Principio de funcionamiento del sistema de colector de tubo de vacío (Industries, 2020)

En la tabla 2.2, se presenta las especificaciones de los tubos de vidrio evacuados.

2.2.5 Especificaciones de los tubos de vidrio evacuados

Tabla 2.2: Especificaciones de los tubos de vidrio evacuados

Material	Descripción
Material de vidrio	Vidrio de borosilicato
Largo	1800 mm y 2100 mm
Diámetro externo	58 mm
Diámetro interno	47 mm
Espesor del tubo de vidrio	Espesor del tubo exterior 1,8mm, grosor del tubo interior: 1,6mm
Tipo de revestimiento selectivo	AIN/AIN-SS/CU-Pulverización
Valor de absorción y emitancia del revestimiento negro	Absorción: $\alpha \geq 93,5\%$. Tasa de emisión: $\epsilon \leq 5\%$
Tasa de vacío	$P \leq 5,0 \times 10^{-4} Pa$
Presión operativa recomendada	$0,2 kg/sq.cm$
Parámetro de estancamiento	$Y \geq 290 M^2 \circ C / KW$
Coefficiente de expansión termal	$3,3 \times 10^{-6} / k$

Fuente: Industries, (2020)

2.2.6 Principales ángulos solares y de los paneles solares

A continuación, se presenta algunos ángulos importantes para el cálculo de la energía solar la cual describen la orientación del panel solar y la ubicación angular del sol en el cielo. Estos ángulos, sus nombres y el símbolo utilizado para representarlos se enumeran a continuación con una breve descripción de su significado.

Ángulos solares

- **Latitud** (ϕ), es la medida angular que tiene como origen la línea ecuatorial, es decir la medida desde Ecuador a cualquier punto del

planeta tierra y varía desde $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$.

- **Ángulo de declinación** (δ), varía estacionalmente debido a la inclinación de la Tierra sobre su eje de rotación y la rotación de la Tierra alrededor del sol. La Tierra está inclinada $23,45^\circ$. Solo en los equinoccios de primavera y otoño el ángulo de declinación es igual a 0° .

La declinación δ (en grados) se calcula a partir de la ecuación (2.1) aproximada de Cooper (1969) (Duffie y Beckman, 2013).

$$\delta = 23.54^\circ \cdot \sin \left[360 \cdot \left(\frac{284 + n}{365} \right) \right] \quad (2.1)$$

Donde n es el número del día en el año.

En esta ecuación se supone que la declinación permanece constante a lo largo de un mismo día. Así mismo, el criterio de signos supone considerar positivos los ángulos situados al norte del Ecuador terrestre (Perpiñan-Lamigueiro, 2018).

- **Ángulo cenital** (θ_z), El ángulo cenital es el ángulo entre el sol y la vertical, es similar al ángulo de elevación, pero se mide desde la vertical en lugar de la horizontal y está en función de los ángulos de declinación solar, hora solar y latitud, se calcula mediante la ecuación (2.2) (Al-Hilaly y Muhsin, 2018).

$$\cos(\theta_z) = \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\phi) \sin(\delta) \quad (2.2)$$

- **Ángulo de altitud solar** (α_s), es la altura angular del sol en el cielo medida desde la horizontal. La elevación es de 0° al amanecer y

de 90° cuando el sol está directamente arriba (lo que ocurre, por ejemplo, en el Ecuador en los equinoccios de primavera y otoño). El ángulo de elevación varía a lo largo del día. También depende de la latitud de un lugar en particular y del día del año. El ángulo de elevación máximo se produce al mediodía solar y depende de la latitud y el ángulo de declinación

- **Ángulo horario** (ω), nos informa sobre la ubicación del sol en el cielo y es el ángulo horario medido desde la línea cenital hasta el horizonte, tal como se muestra en la Fig. 2.3 (Al-Hilaly y Muhsin, 2018) y se puede estimar a partir de la ecuación (2.3)

$$\omega = 15 \cdot (H_s - 12) \quad (2.3)$$

Donde H_s es el tiempo solar aparente, que significa la posición del sol antes, después y al mediodía solar (cuando el sol está en el meridiano del observador). Así, el ángulo horario tiene un valor negativo antes del mediodía solar local, un valor positivo después del mediodía solar y cero en la hora solar local (cuando $H_s = 12:00$ del mediodía) (Hassan et al, 2017).

- **Ángulo de azimut solar** (γ_s), es el ángulo azimut de la posición del sol y es la distancia angular entre el azimut cero (hacia el Sur o hacia el Norte, dependiendo de lo que seleccione en la pantalla de entrada) y la proyección de la línea de visión del Sol sobre el suelo. Los desplazamientos al este del sur son negativos y al oeste del sur son positivos. El ángulo azimut se mide en el sentido de las agujas del reloj desde el azimut cero. Por ejemplo, si se encuentra

en el hemisferio norte y el azimut cero está fijado en el sur, el valor del ángulo azimut será negativo antes del mediodía solar y positivo después del mediodía solar, tal como se muestra en la Fig. 2.3 (b).

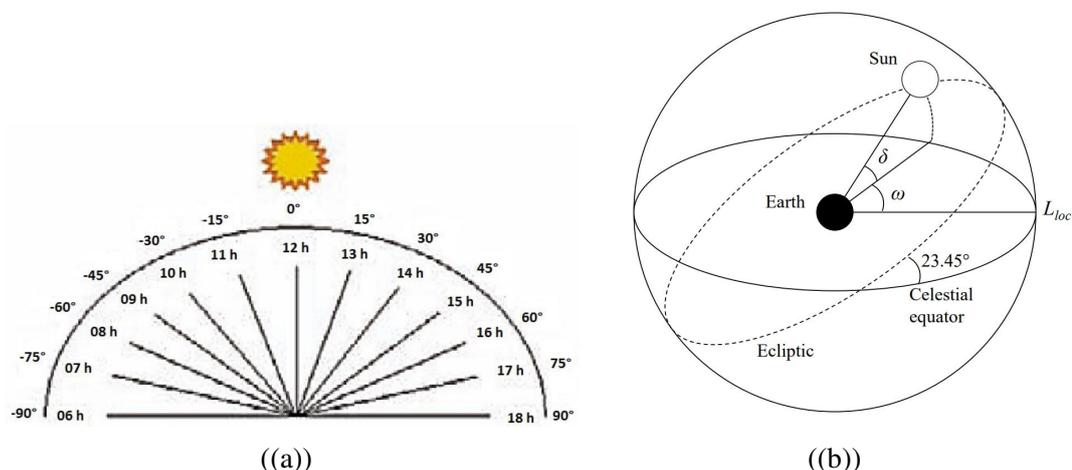


Figure 2.3: (a) muestra los ángulos horarios durante el día., (Pinho et al.,2008) y la Figura 2.3 (b) se muestran los ángulos que definen la posición del Sol con respecto a la Tierra y a la esfera celeste; la declinación δ y el ángulo horario ω (Widen y Munkhammar,2019)

Ángulos de los paneles solares

- **Pendiente** (β), es el ángulo entre el plano del colector (o apertura) y la horizontal, ($0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$, si $\beta > 90^\circ$ significa que la superficie tiene un componente orientado hacia abajo).
- **Ángulo de azimut de la superficie** (γ), es la dirección de la brújula desde la que proviene la luz del sol. Al mediodía solar, el sol siempre está directamente al sur en el hemisferio norte y directamente al norte en el hemisferio sur. El ángulo de acimut varía a lo largo del día. Los ángulos de acimut varían de 90° al amanecer y 270° al atardecer.
- **Ángulo de incidencia** (θ), es el ángulo entre los rayos del sol y la normal en una superficie. Para un plano horizontal, el ángulo de

incidencia (θ), y el ángulo cenital (θ_z), son iguales.

La modelización del ángulo de incidencia para un panel solar arbitrariamente inclinado y orientado se puede realizar a partir de las ecuaciones (2.4) y (2.5), donde relacionan el ángulo de incidencia de la radiación del rayo en una superficie (θ), con los otros ángulos (Duffie y Beckman, 2013).

$$\begin{aligned} \cos \theta = \sin \delta \sin \phi \cos \beta & - \sin \delta \cos \phi \cdot \sin \beta \cos \gamma \\ & + \cos \delta \cos \phi \cdot \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \phi \cdot \sin \beta \cos \gamma \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \beta \cdot \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos (\gamma_s - \gamma) \quad (2.5)$$

El ángulo θ puede exceder 90° , lo que significa que el sol está detrás de la superficie.

Las relaciones geométricas entre un plano de cualquier orientación particular con respecto a la tierra en cualquier momento y la posición del sol con respecto a ese plano, se describen en la Fig. 2.4

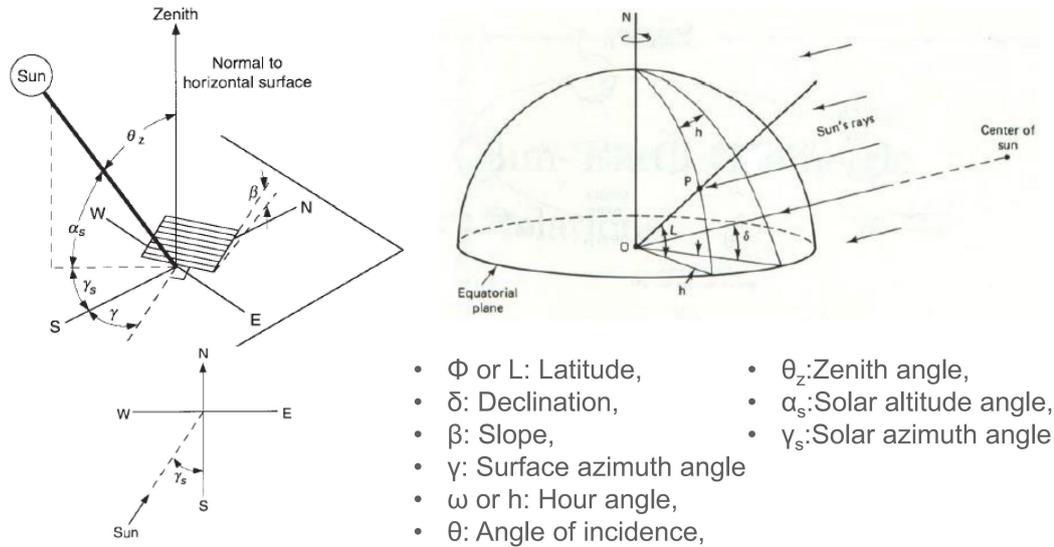


Figure 2.4: Principales ángulos solares y del colector solar. (Al-Khazzar, 2015)

2.2.7 Energía térmica

La energía térmica es un tipo de energía producida por el movimiento de partículas atómicas y moleculares dentro de una sustancia. Fue descubierto por primera vez en 1847 por el físico y matemático inglés James Prescott Joule, de quien se nombran la unidad de energía y la Ley de Joule (Just energy, 2022).

El calor es una forma de energía que se mide en julios. El calor y la temperatura no son lo mismo y se necesitan diferentes cantidades de energía térmica para causar un aumento igual en la temperatura de diferentes cantidades de la misma sustancia. La energía térmica que fluye hacia o desde una sustancia, mientras que la temperatura permanece constante, se denomina calor latente.

La energía térmica se puede almacenar y recuperar de manera efectiva mediante los principios del calor sensible y el calor latente. La otra forma de almacenar y liberar energía térmica se puede realizar a través de principios de reacción química (Kalaiselvam y Parameshwara, 2014).

La energía térmica se puede transferir como calor en una de tres formas, ellos son: conducción, convección y radiación.

¿Qué es la radiación en la energía térmica?

La radiación, el tercer tipo de transferencia de energía térmica, ocurre en ondas que viajan a la velocidad de la luz. No necesita material ni un objeto para viajar a través de él. El sol es el mejor ejemplo de esta radiación, la transferencia de energía mediante ondas electromagnéticas, viajando por el espacio como una onda de luz, o radiación electromagnética. Notas un cambio de temperatura cuando sales de la sombra a la luz del sol en un día soleado.

El calor del sol no puede llegar a la Tierra por convección o conducción; no hay forma de que las moléculas choquen porque ninguna superficie se toca.

El equilibrio térmico ocurre cuando los objetos a la misma temperatura dentro del mismo sistema no intercambian energía térmica precisamente porque están a la misma temperatura. No hay diferencia de temperatura entre los objetos.

¿Cómo hacemos uso de la energía térmica?

Hay varias formas de energía térmica, la más obvia es cuando calentamos el agua para nuestros baños, colocamos la tetera en la estufa para que hierva o usamos una plancha en nuestra ropa. Aquí, nos beneficiamos de la propiedad inherente de la energía térmica de ser transferida en forma de calor para nuestro uso.

Otras formas de energía térmica incluyen energía solar, energía geotérmica, energía oceánica y baterías de celdas de combustible. El uso de

energía térmica está recibiendo mucha atención como preferible a las fuentes típicas de energía que pueden contribuir a las emisiones de gases de efecto invernadero. Pero también puede presentar peligros para el medio ambiente.

¿Cómo utilizamos la energía solar térmica?

La energía solar térmica suele obtenerse mediante reflectores y receptores que recogen y concentran la energía del sol. Aumentan la energía del sol a muchas veces su fuerza normal, y algunos sistemas aumentan su intensidad a más de 100 veces lo normal.

Estas tecnologías generalmente enfocan la energía del sol en un tubo que contiene un fluido de transferencia de calor que se usa para activar una turbina de agua para producir electricidad. Algunos sistemas también tienen un sistema de almacenamiento que les permite almacenar energía durante la noche y otros momentos en los que no hay luz solar. Este sistema garantiza que la energía esté siempre disponible. (Tara energy, 2022).

¿Hay un lugar para la energía térmica en nuestro futuro?

Sin duda, el conocimiento de la energía térmica y sus aplicaciones ha recorrido un largo camino desde los días de James Prescott Joules. Ahora depende de los humanos aprovechar este conocimiento de una manera que pueda beneficiar a nuestro planeta.

2.2.8 Radiación Solar (La energía del sol)

El sol produce una cantidad de energía constante (1367 W/m^2) que, en el momento de incidir sobre la superficie terrestre pierde parte de su

potencia debido a distintos fenómenos ambientales. De hecho, tal como se muestra en la Fig. 2.5, debido a la órbita elíptica, la radiación que alcanza la atmósfera es mayor en los meses de invierno que en los meses de verano, pues, como decimos, debido a la órbita elíptica, la Tierra está más próxima a sol en esos meses.

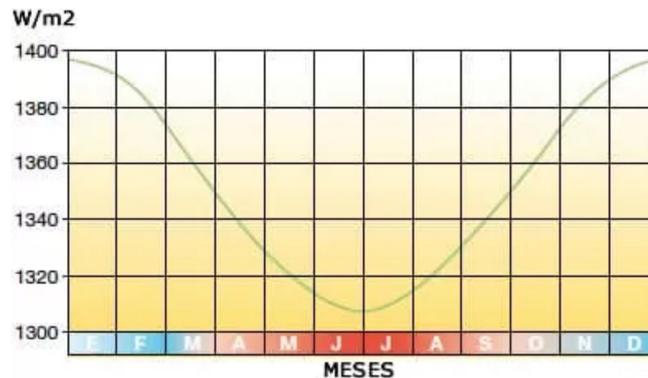


Figure 2.5: Variación de la radiación atmosférica solar (Alonso-Lorenzo, 2019)

La radiación solar que llega a la tierra se puede dividir en tres componentes:

Radiación Directa: Afectada por el fenómeno de absorción, es la que recibimos directamente del sol. Varía en función de la nubosidad del momento y también de la estación del año en que se mida.

Radiación Difusa: Se genera por los efectos de dispersión de las moléculas de aire y los aerosoles, afectada por el fenómeno de difusión, es la que recibimos debido al reflejo de la radiación solar sobre las nubes, partículas del aire en días nublados es la que más recibimos.

Radiación de albedo: Es básicamente la radiación reflejada, por ejemplo en superficies blancas y similar. Se aprovecha mucho en módulos bifaciales.

2.2.9 Radiación del haz en superficies inclinadas

Al convertir la radiación del rayo entre planos utilizamos el factor geométrico R_b que define la relación entre la radiación del haz en el plano inclinado y la radiación del haz en el plano horizontal: (Widén y Munkhammar, 2019), tal como se muestra en la ecuación (2.6) y en la Fig. 2.6

$$R_b = \frac{I_{b,T}}{I_b} = \frac{I_{b,n} \cdot \cos(\theta)}{I_{b,n} \cdot \cos(\theta_z)} = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} \quad (2.6)$$

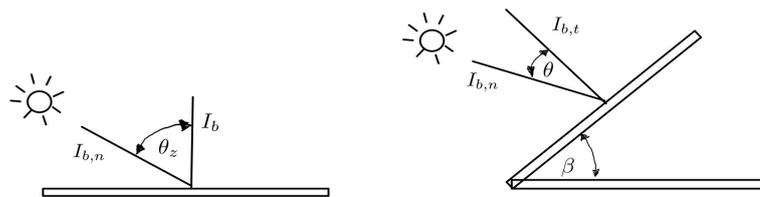


Figure 2.6: Relación entre la radiación del haz en la superficie inclinada y en la superficie horizontal (Martínez-Gracia et al., 2019)

Podemos entonces expresar la radiación del haz en el plano inclinado mediante la ecuación (2.7):

$$I_{bT} = R_b \cdot I_b = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} \cdot I_b \quad (2.7)$$

2.2.10 Radiación difusa en superficies inclinadas

Ahora que podemos manejar la radiación del haz, necesitamos una ponderación similar para la radiación difusa dispersa. Si suponemos que la radiación difusa del cielo es puramente isotrópica, este factor de pon-

deración se calcula mediante la ecuación 2.8:

$$R_{vista,cielo} = \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \quad (2.8)$$

que es el factor de visión del cielo de la superficie y describe qué parte del cielo es visible para la superficie. Es fácil ver que esta expresión tiene sentido, observando, por ejemplo, que $R_{vista,cielo} = 1$ cuando la superficie es horizontal, $R_{vista,cielo} = 1/2$ cuando está inclinada 90° y $R_{vista,cielo} = 0$ cuando está orientada hacia el suelo. De forma análoga, el factor de visión a la radiación isotrópica del suelo puede encontrarse mediante la ecuación 2.9:

$$R_{vista,suelo} = \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \quad (2.9)$$

Normalmente se considera que la componente de radiación difusa consta de tres partes: la difusa isotrópica, la difusa circunsolar y el brillo del horizonte, que difieren en su origen en el cielo. La parte difusa isotrópica es uniforme desde todas las direcciones, la parte difusa circunsolar se concentra alrededor de la posición del sol en el cielo y el brillo del horizonte se concentra cerca del horizonte. Se han formulado diferentes modelos para describir la radiación difusa en el plano inclinado. En el modelo de Hay y Davies, la radiación difusa en la superficie inclinada se expresada mediante la ecuación (2.10)

$$I_{dT} = I_d \left[(1 - A_i) \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) + A_i R_b \right] \quad (2.10)$$

Cuando no hay radiación del haz, A_i es cero, y la radiación difusa se

considera puramente isotr3pica:

$$I_{dT} = I_d \left[\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right] \quad (2.11)$$

donde I_d se modifica 3nicamente por el factor de visi3n hacia el cielo (Wid3n y Munkhammar, 2019).

2.2.11 Radiaci3n reflejada en el suelo

La tercera y 3ltima componente de la radiaci3n total en el plano inclinado es la radiaci3n reflejada por el suelo. En realidad, numerosos objetos como edificios, diferentes materiales del suelo, 3rboles, etc., reflejan la radiaci3n incidente en la superficie inclinada. Un enfoque simplificado pero est3ndar es suponer la radiaci3n reflejada de una fuente compuesta, un suelo horizontal, y difusamente reflectante. La radiaci3n reflejada en el suelo en el plano inclinado depende entonces s3lo de la reflectancia del suelo y del factor de visi3n hacia el suelo de la superficie inclinada: (Wid3n y Munkhammar, 2019).

$$I_{gT} = I \rho_g \left[\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right] \quad (2.12)$$

donde ρ_g es la reflectancia del suelo e $I = I_b + I_d$ es la radiaci3n global en el plano horizontal. La reflectancia del suelo ρ_g depende del entorno. En latitudes altas, es probable que haya una variaci3n estacional de la reflectancia del suelo debido a la cobertura de nieve en invierno.

2.2.12 Modelo completo para la radiación global en el plano inclinado

El modelo completo de radiación global en un plano inclinado esta dado por la ecuación (2.13) :

$$I_T = I_{bT} + I_{dT} + I_{gT} \quad (2.13)$$

Con las fórmulas para cada componente en las ecuaciones (2.7), (2.11) y (2.12) el modelo completo se obtiene con la ecuación (2.14):

$$I_T = I_b \cdot \left[\frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} \right] + I_d \cdot \left[\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right] + I \cdot \rho_g \cdot \left[\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right] \quad (2.14)$$

2.2.13 Irradiancia

- La irradiancia normal directa (I_b) es la cantidad de radiación solar recibida por unidad de área por una superficie que siempre se mantiene perpendicular (o normal) a los rayos que vienen en línea recta desde la dirección del sol en su posición actual en el cielo. . Normalmente, puede maximizar la cantidad de irradiancia que recibe anualmente una superficie manteniéndola normal a la radiación entrante. Esta cantidad es de especial interés para las instalaciones termosolares de concentración e instalaciones que rastrean la posición del sol.
- La irradiancia horizontal difusa (I_d) es la cantidad de radiación recibida por unidad de área por una superficie (no sujeta a ninguna sombra o sombra) que no llega en un camino directo desde el sol, sino que ha sido dispersada por moléculas y partículas en la atmós-

fera. y viene igualmente de todas las direcciones

- La irradiancia horizontal global (I_g) es la cantidad total de radiación de onda corta recibida desde arriba por una superficie horizontal al suelo.

La irradiancia horizontal global se calcula mediante la ecuación (2.15).

$$I_g = I_d + I_b \cdot \cos(\theta_z) \quad (2.15)$$

2.2.14 Análisis termodinámico del colector con tubos de vacío

Hay una serie de factores que hay que tener en cuenta para entender el funcionamiento de un colector solar tal como se muestra en la Fig. 2.7. La eficiencia del colector solar se considera uno de los factores esenciales. Así también, es necesario definir paso a paso las ecuaciones de flujo de calor singulares con el fin de encontrar las ecuaciones gobernantes del sistema de colector

Si G es la intensidad de la radiación solar, en W/m^2 que incide en el plano de apertura del colector solar con una superficie del colector (A_c), entonces la cantidad de radiación solar recibida por el colector esta dada por la ecuación (2.16):

$$Q_i = G \cdot A_c \quad (2.16)$$

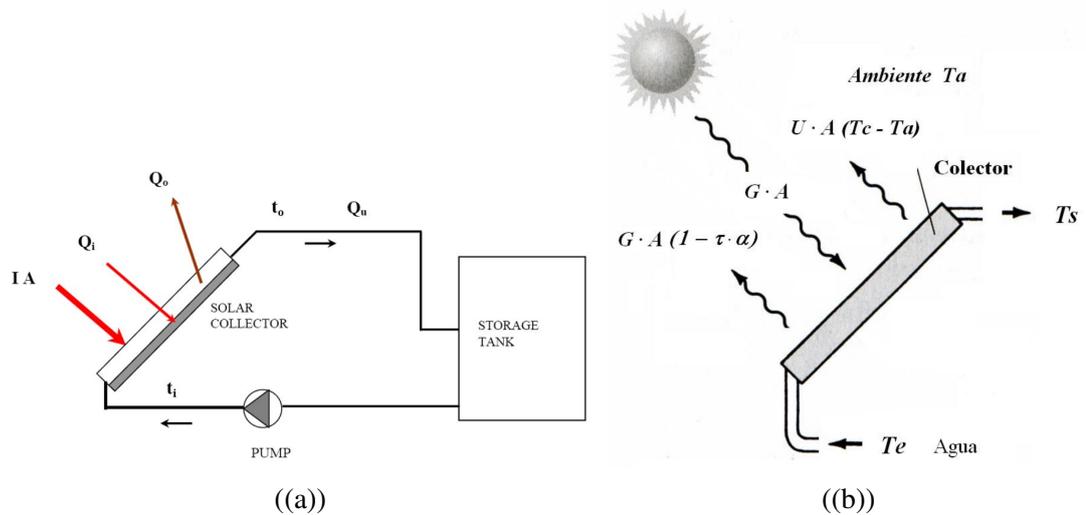


Figure 2.7: (a) muestra el sistema típico de captación de energía solar, (Dasari, N. y Sridhar, K., 2017) y la Figura 2.7 (b) se muestran el balance de energía en el colector solar (Lozano, 2019)

Un concepto fundamental para el análisis térmico de cualquier sistema térmico es la conservación de la energía, que puede analizarse mediante el cálculo del balance de energía en condiciones de estado estacionario. En estado estacionario, la producción de energía útil del colector es la diferencia entre la radiación solar absorbida y las pérdidas térmicas totales del colector (Lucas Witmer, 2020).

$$\text{Energía útil} = \text{Energía solar absorbida} - \text{Pérdidas térmicas}$$

Obviamente, cuanto mayor sea la producción de energía útil de un diseño en particular, mayor será la eficiencia esperada. La eficiencia térmica del colector es un parámetro importante a considerar en este tipo de análisis, ya que crea la base para la comparación de diferentes materiales y modificaciones de los sistemas de colectores.

Calor perdido por el colector

A medida que el colector absorbe el calor, su temperatura aumenta que la del entorno y el calor se pierde en la atmósfera por convección y ra-

diación. La tasa de pérdida de calor (Q_o) depende del coeficiente global de transferencia de calor del captador (U_L) y de la temperatura del colector

$$Q_o = U_L A_c (T_c - T_a) \quad (2.17)$$

En el caso de los colectores en estado estacionario, la energía útil extraída por el colector es la diferencia entre la radiación solar absorbida por el colector y las pérdidas térmicas, como se muestra en la ecuación (2.18) (Duffie y Beckman, 2013):

$$Q_u = Q_i - Q_o \quad (2.18)$$

Como se mencionó anteriormente, para encontrar cuánta energía queda disponible para el trabajo térmico útil, debemos comprender el balance de energía dentro del colector: energía absorbida - pérdidas. El balance de energía también se puede expresar a través de la ecuación (2.19)

$$Q_u = S A_c - U_L A_c (T_c - T_a) \quad (2.19)$$

donde S es la radiación solar absorbida, U_L son las pérdidas totales, T_c es la temperatura de la placa absorbente, T_a es la temperatura del aire y A_c es el área de la superficie del colector.

Se necesita entender cómo se pueden obtener las cantidades S y U_L . En un caso general, cuando se dispone de medidas de radiación solar incidente, la aproximación conveniente para la energía absorbida viene dada por: $S = (\tau\alpha)_{av} I_T$, donde $(\tau\alpha)_{av}$ es el producto de la transmitancia de la cubierta del colector y la absorbancia de la placa promediada sobre diferentes tipos de radiación. De hecho, $(\tau\alpha)_{av} \approx 0.96(\tau\alpha)_{rayo}$

basado en estimaciones prácticas (Lucas Witmer, 2017). Realizando el reemplazo respectivo se obtiene la ecuación (2.20)

$$Q_u = A_c [(\tau\alpha)I_T - U_L(T_c - T_a)] \quad (2.20)$$

Siendo, Q_u la energía útil producida por el colector, A_c es la superficie del colector, I es la irradiancia global sobre el colector, τ coeficiente de transmisión de la cubierta, α coeficiente de la absorbancia de la placa colectora, U_L es el coeficiente global de transferencia de calor, T_c es la temperatura del fluido térmico a la entrada del colector, T_a es la temperatura ambiente.

La ecuación (2.20) es una relación ampliamente utilizada para medir ganancia de energía del colector y se conoce generalmente como la “ecuación de Hottel-Whillier-Bliss”.

También se sabe que la tasa de extracción de calor del colector puede medirse por medio de la cantidad de calor transportada en el fluido que lo atraviesa a través de él, esto es a través de la ecuación (2.21)

$$\dot{Q}_u = \dot{m}c_p(T_s - T_e) \quad (2.21)$$

donde \dot{Q}_u es el flujo de calor útil (que se transfiere al fluido que se calienta) la ganancia de calor diaria [W], \dot{m} flujo masivo del fluido que se calienta [kg/s], c_p es el calor específico del fluido que se calienta [$J/(kg \cdot K)$] (lo suponemos constante), T_e es la temperatura inicial del agua en el depósito [$^{\circ}C$] y T_s es la temperatura del agua a la salida del depósito [$^{\circ}C$] (Kyekyere, 2021).

También la energía útil producida por el colector se puede calcular con la ecuación 2.22

$$Q_u = F_R [I_T A_{abs} \tau \alpha - U_L (T_i - T_a) - U_{L/T} (T_i - T_a)^2] \quad (2.22)$$

2.2.15 Factor de eficiencia del colector

La ecuación (2.20) resulta un tanto inconveniente debido a la dificultad para definir la temperatura media del colector. Es conveniente definir una cantidad que relacione la ganancia de energía útil de un colector con la ganancia útil si toda la superficie del colector estuviera a la temperatura de entrada del fluido. Esta cantidad se denomina “factor de extracción de calor del colector (F_R)” y se deduce a partir de las ecuaciones (2.20) y (2.21), obteniéndose así la ecuación (2.23)

$$F_R = \frac{\dot{m} c_p (T_s - T_e)}{A_c [I_T (\tau \alpha) - U_L (T_c - T_a)]} \quad (2.23)$$

donde \dot{m} es el caudal másico del fluido de calor específico c_p . El numerador es la ganancia de energía útil en el fluido a medida que aumenta su temperatura, desde la entrada T_c a la temperatura de salida T_a . El denominador representa la ganancia útil de un colector a la temperatura de entrada del fluido (es decir, el caso límite para pérdidas mínimas) (Vieira da Rosa y Ordóñez, 2022).

En la forma alternativa el factor de eliminación del colector se puede reescribir de acuerdo a la ecuación (2.24)

$$F_R = \frac{\dot{m} c_p}{A_c U_L} \left[1 - \exp \left(- \frac{A_c U_L F'}{\dot{m} c_p} \right) \right] \quad (2.24)$$

donde F' es el factor de eficiencia del colector, un parámetro de diseño que tiene en cuenta los factores de diseño que influyen en la resistencia térmica entre el fluido y el ambiente, esta dado por la ecuación (2.25):

$$F' = \frac{1/U_L}{l \cdot \left[\frac{1}{U_L \cdot [D + (W - D) \cdot F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi \cdot D_i \cdot h_{fi}} \right]} \quad (2.25)$$

Siendo, l el espaciado del tubo, D es el diámetro exterior del tubo, F es la eficiencia estándar con perfil rectangular, C_b es la conductancia, D_i el diámetro del tubo interior, h_{fi} el coeficiente de transferencia de calor entre el fluido y la pared del tubo (Vieira da Rosa y Ordóñez, 2022).

2.2.16 Eficiencia instantánea del colector

La eficiencia de captación de energía solar (η), tanto de los colectores térmicos como de los fotovoltaicos, se define como la relación entre la tasa de energía térmica útil que sale del colector y la irradiancia solar utilizable que cae sobre el área de apertura. La eficiencia del colector se expresa mediante la ecuación (2.26), pero esta definición general de eficiencia del colector difiere según el tipo de colector.

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{Q_i} = \frac{\dot{Q}_u}{G_T \cdot A_c} \quad (2.26)$$

donde:

\dot{Q}_u = Es la salida de energía útil de un colector (W)

A_c = Área de apertura del colector (m^2)

G_T = Es el flujo de radiación solar incidente (irradiancia) (W/m^2)

Para los calentadores de agua solares, la fuente de energía que ingresa al

sistema es la energía solar. La irradiación solar recibida y absorbida por los tubos es la potencia de entrada. Esta energía luego se transfiere al agua en los tubos. Se produce un mecanismo de transferencia de calor de circulación natural que calienta el agua en el tanque de almacenamiento. Se pueden considerar dos eficiencias principales, la óptica y la térmica, para la conversión de energía en los colectores solares térmicos, como se muestra en la Fig. 2.8

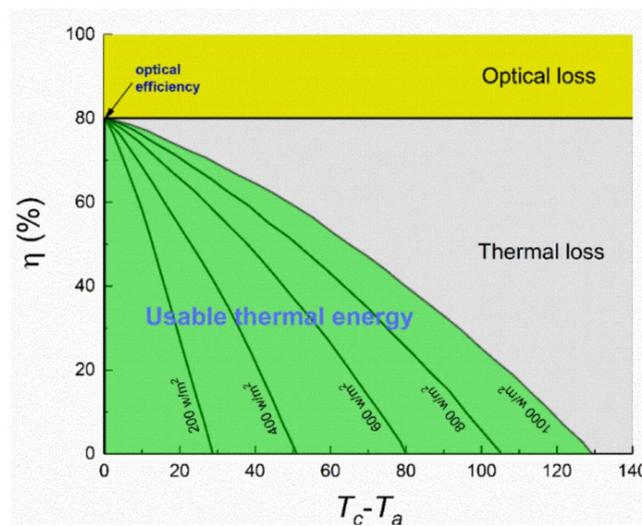


Figure 2.8: Eficiencia de los colectores solares con diferentes diferencias de temperatura e insolación solar (Shamshirgaran et al., 2020)

La eficiencia térmica se describe en base a la fracción de energía solar recibida, que se entrega como energía térmica utilizable. Las curvas de la Fig. 2.8 muestran que las pérdidas térmicas aumentan con el incremento de la diferencia de temperatura entre el colector y el aire ambiente. Mientras tanto la tasa de disminución de la eficiencia en las irradiaciones solares bajas es mayor (Shamshirgaran et al., 2020).

Usando la ecuación (2.20) de Hottel-Whillier-Bliss, se obtiene la ecuación general para la eficiencia instantánea del colector ecuación

(2.27) (Vieira da Rosa y Ordóñez, 2022)

$$\eta = F_R \cdot (\tau\alpha)_n - F_R \cdot U_L \cdot \frac{(T_i - T_a)}{I_T} - F_R \cdot U_{L/T} \cdot \frac{(T_i - T_a)^2}{I_T} \quad (2.27)$$

Así también la eficiencia energética del sistema está determinada por la ecuación 2.28 (Duffie et al, 1980). Los valores recomendados por el fabricante de los colectores, los coeficientes de correlación de la eficiencia, $\eta_o = 0.8$, $a = 1.2$ y $b = 0.007$ (Juantorea et al, 2017)

$$\eta = \eta_o - a \left[\frac{(T_i - T_a)}{G} \right] - b \left[\frac{(T_i - T_a)^2}{G} \right] \quad (2.28)$$

siendo η_o el rendimiento óptico del captador, a el coeficiente lineal de pérdidas térmicas y b el coeficiente cuadrático de pérdidas térmicas (Ríos, 2021)

A partir de lo expuesto resulta fácil entender que, aproximadamente, la eficiencia en servicio de los colectores depende de sus parámetros característicos η_o , a y b . En función de los valores típicos de estos parámetros para distintos tipos de colectores planos pueden deducirse las temperaturas de trabajo en que su utilización resulta más interesante. (Ibáñez et al, 2005) proporcionan los valores orientativos mostrados en la Tabla 2.3

Tabla 2.3: Tipos de colectores planos y sus características.

Diseño	η_o	$a_1[W/(m^2 \cdot K)]$	$t_m[^\circ C]$
Sin cubierta ni aislamiento	0,85 - 0,90	15 - 25	10- 40
Cubierta simple	0,75 - 0,85	7 - 9	10 - 60
Cubierta doble	0,65 - 0,80	4 - 6	10 - 80
Superficie selectiva	0,75 - 0,85	5 - 6	10 - 80
Tubos de vacio	0,65 - 0,75	2 - 3	10 - 130

Fuente: Lozano, (2019)

2.2.17 Temperatura media del colector

La tradición USA consistió en considerar $t_c = t_e$. Por el contrario, la tradición Europea ha considerado como mejor aproximación tomar la temperatura media del fluido a su paso por el colector (Lozano, 2019), es mediante la ecuación: (2.29):

$$t_m = \frac{T_e + T_s}{2} \quad (2.29)$$

Para evaluar la temperatura final del agua en el colector podemos calcular a partir de la ecuación (2.30).

$$T_o = T_e + \frac{Q_u}{m \cdot C_p} \quad (2.30)$$

2.2.18 Cálculo del área absorbente del colector

Para el cálculo del área absorbente del colector usamos la ecuación (2.31)

$$A_{abs} = \frac{d_e \cdot \pi \cdot L}{2} \quad (2.31)$$

Siendo, A_{abs} el área absorbente, d_e es el diámetro exterior del tubo y L la longitud útil.

2.2.19 Diseños factoriales con dos factores

Considere los factores A y B con a y b ($a, b \geq 2$) niveles de prueba, respectivamente. Con ellos se puede construir el arreglo o diseño factorial $a \times b$, el cual consiste en $a \times b$ tratamientos. Algunos casos particulares de uso frecuente son: el diseño factorial 2^2 , el diseño factorial 3^2 y el diseño factorial 3×2 .

2.2.20 Réplica de corrida

Se llama réplica a cada corrida completa del arreglo factorial. Los diseños factoriales que involucran menos de cuatro factores por lo regular se corren replicados para tener la potencia necesaria en las pruebas estadísticas sobre los efectos de interés. Si se hacen n réplicas, el número total de corridas experimentales es $n(a \times b)$.

2.3 Modelo estadístico e hipótesis de interés

El modelo estadístico de efectos para este tipo de diseño está dado por la ecuación 2.32:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk} \quad (2.32)$$

$$i = 1, \dots, a; \quad j = 1, \dots, b; \quad k = 1, \dots, n$$

Donde, μ es la media general, α_i es el efecto debido al i -ésimo nivel del factor A, β_j es el efecto del j -ésimo nivel del factor B, $(\alpha.\beta)_{ij}$ representa al efecto de interacción en la combinación ij , ϵ_{ijk} es el error aleatorio que se supone sigue una distribución normal con media cero y varianza constante σ^2 (Gutiérrez, H. y De la vara, R., 2008).

Se desea demostrar las siguientes hipótesis:

H_0 : Efecto del Factor $A = 0$

H_a : Efecto del Factor $A \neq 0$

H_0 : Efecto del Factor $B = 0$

H_a : Efecto del Factor $B \neq 0$

H_0 : Efecto del Factor A \cdot Efecto del Factor B = 0

H_a : Efecto del Factor A \cdot Efecto del Factor B $\neq 0$

CAPÍTULO III

Marco Metodológico

3.1 Ubicación

El equipo solar térmico de tubos de vacío utilizado para el presente trabajo de investigación se encuentra ubicado en la facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) ver Fig. 3.1, cuyas coordenadas geográficas son: latitud -1.655789° y longitud -78.678604° con una elevación de 2820 m.



Figure 3.1: Ubicación de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH

3.2 Equipos y materiales

Los equipos e instrumentos utilizados fueron: un dispositivo solar térmico, un sistema de recolección de datos, sensores de temperatura, un computador, servicio de internet, bases de datos digitales (WoS, Scopus, Google Académico), Software Open Source Rstudio.

3.3 Tipo de investigación

La tipología de la presente investigación se basa en Sanca, M. (2011), donde muestra criterios vinculados a aspectos significativos de la investigación.

3.3.1 Según el enfoque

La investigación es de carácter cuantitativo porque implica el uso de herramientas estadísticas y matemáticas para obtener resultados.

3.3.2 Según el tiempo

La investigación es de tipo longitudinal porque se realizan mediciones continuas o repetidas durante las estaciones de verano e invierno.

3.3.3 Según su profundidad de alcance

La investigación es correlacional porque se analiza la eficiencia del modelo respecto a las variables que actúen dentro del proceso de calentado de agua del dispositivo solar térmico.

El diseño de la investigación es experimental, porque se manipula la variable independiente, para conocer los efectos en la variable dependiente, es decir manipular la posición angular de los tubos del dispositivo solar térmico influye directamente en la variable respuesta de la eficiencia térmica.

3.4 Prueba de hipótesis

3.4.1 Hipótesis de investigación o trabajo:

El colector solar de tubos de vacío que se considera tanto para la experimentación como para la simulación numérica tiene un efecto positivo entre el ángulo de inclinación y la captación máxima de la energía térmica útil.

3.4.2 Hipótesis nula:

El colector solar de tubos de vacío que se considera tanto para la experimentación como para la simulación numérica no tiene un efecto positivo con el ángulo de inclinación para la captación máxima de la energía solar.

Así también para la comprobación de la hipótesis, se trabajó con un nivel de confianza del 98% y un nivel de significancia del 2%; para la selección de la prueba estadística se verificó previamente la normalidad de los datos con el test Shapiro-Wilks por ser aplicable a muestras menores de 50.

3.5 Población o muestra

La población representa la temperatura que se genera en el sistema de colector solar de tubos, durante las horas luz del día a diferentes ángulos de inclinación y dirección.

La muestra es tomada en el horario de 11h00 hasta las 12h00 con un intervalo de 3 minutos, con el fin de analizar la temperatura máxima generada, dentro del sistema de colector solar.

3.6 Recolección de la información

El procedimiento para la recolección de los datos se realizó de la siguiente manera:

- Ubicar los colectores solares con uno y dos tanques en un lugar donde los rayos solares inciden directamente y no se produzcan sombras sobre el instrumento o equipos durante la experimentación.
- Llenar con agua los colectores solares y tanques de almacenamiento.
- Instalar los sensores de temperatura en la parte superior de los tanques de almacenamiento de los colectores solares (al nivel de salida del agua caliente), dos sensores para cada colector solar. Luego conectar los sensores al recolector de datos.
- Monitorear los datos de temperatura del agua de los colectores y radiación solar en horizontal, en intervalos de 10 y 30 s, respectivamente.

- Realizar el registro de datos durante minuto, de acuerdo a los dos periodos climáticos existentes en nuestro país: Época húmeda o invierno (mes de enero hasta el mes de abril o mayo, dependiendo de las condiciones climáticas externas y generales). Época seca o verano (mes de mayo o junio y se extiende hasta el mes de diciembre).
- Concluidas las mediciones, descargar el agua de los colectores solares.

3.7 Procesamiento de la información y análisis estadístico

Para realizar el procesamiento de la información es imprescindible analizar el dispositivo solar térmico ya que las condiciones de esta influyen en el modelo matemático. El objetivo principal del estudio es determinar la posición óptima del colector solar, para ello se define un diseño experimental con dos factores de 6 y 4 niveles respectivamente, para ello se define un modelo matemático de la eficiencia del colector solar permita simular la temperatura del agua a diferentes ángulos de inclinación y dirección, y determinar la eficiencia del dispositivo a diferentes ángulos de inclinación. Para esto se considera como una ecuación inicial la curva característica.

Una vez determinado el modelo matemático se realiza ensayos o experimentos modificando el ángulo, referente a la posición de los tubos al vacío del dispositivo solar térmico. Los resultados son analizados respecto a la eficiencia térmica que genera en los diferentes ángulos de posición, mediante la raíz del error cuadrático medio (RECM), efi-

ciencia del modelo matemático y evaluar a que posición se obtiene una mayor temperatura.

La implementación del algoritmo de simulación matemática se realizó en el software R, con la codificación de los parámetros respectivos del modelo, los ángulos fueron transformados utilizando el sistema radian puesto que el software R trabaja bajo esta condición, las especificaciones del colector solar fueron tomadas como variables que se usaron para la simulación. Del total de datos de temperatura se separaron en observaciones que fueron realizadas por la mañana y tarde, esto para considerar temperatura inicial y final como parámetros necesarios en el modelo. Los resultados fueron procesados con la librería ggplot2 para los gráficos respectivos.

3.7.1 Validados del modelo de simulación

Coefficiente de eficiencia del modelo de simulación: El coeficiente de eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe (C_{ef}) se utiliza para cuantificar lo bien que una simulación del modelo puede predecir la variable de resultado, para ello se aplica la ecuación (3.1) (Shein y Mady, 2016).

$$C_{ef} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |(T_{sim})_i - (T_{exp})_i|^2}{\sum_{i=1}^n |(T_{sim})_i - (\bar{T}_{exp})_i|^2} \quad (3.1)$$

3.8 Variable respuesta o resultados alcanzados

Como variable dependiente se tiene la eficiencia térmica y la variable independiente la posición angular de los tubos del dispositivo solar tér-

mico.

La variable cuantitativa dependiente corresponde a la eficiencia térmica y se toma como variables cuantitativas independientes a las magnitudes de: radiación solar incidente, temperatura del agua entrante y saliente, coeficiente de pérdidas de los tubos, esto se lo realizó durante las horas existentes de luz solar.

CAPÍTULO IV

Resultados y discusión

4.1 Especificaciones técnicas del colector de tubo de vacío

El tubo de vacío está formado por dos tubos de vidrio fabricados con vidrio de borosilicato extremadamente resistente. El tubo exterior es transparente para permitir el paso de los rayos de luz con una mínima reflexión y el tubo interior está recubierto con un revestimiento selectivo especial (Al-Níquel/Al) que presenta una excelente absorción de la radiación solar y unas características de reflexión mínimas. absorción de la radiación solar y unas características de reflexión mínimas. Este vacío desempeña un papel importante en el rendimiento de los tubos evacuados de flujo directo (Yadav y Saikhedkar, 2017).

En las Tablas 4.1 y 4.2 se describe las propiedades del tubo de vidrio de borosilicato y las dimensiones del colector de tubos de vacío.

4.1.1 Propiedades del tubo de vidrio de borosilicato

Tabla 4.1: Propiedades del tubo de vidrio de borosilicato

Descripción	Especificación
Conductividad térmica (k)	0,038 W/(m°C)
Transmitancia solar (τ_g)	0,74
Absorción solar α_g	0,99
Reflectancia solar ρ_g	0.23 (incidencia normal)

Fuente: GEAA-ESPOCH

4.1.2 Dimensiones del colector de tubos de vacío

Tabla 4.2: Dimensiones del colector de tubos de vacío

Descripción	Especificaciones
Cantidad de tubos	20
Longitud del tubo	1764 mm
Diámetro exterior de la cubierta de vidrio	60 mm
Diámetro interior del tubo	49 mm
Distancia entre tubos	20 mm

Fuente: GEAA-ESPOCH

Se considera la longitud de los tubos de 1764 mm ya que es la media que está expuesta a la luz solar diaria, el diámetro exterior del tubo es de 60 mm es una cubierta de vidrio, el diámetro interior está cubierta con una capa de borosilicato y cada tubo es colocado a una cierta distancia lo que representa 20 mm entre tubos.

4.2 Análisis descriptivo

4.2.1 Análisis descriptivo de las temperaturas de entrada

El análisis descriptivo se realiza con el fin de conocer las características de cada una de las variables en estudio. La Tabla 4.3 muestra las estadísticas descriptivas de las tres temperaturas iniciales.

Tabla 4.3: Estadísticos descriptivos de las tres temperaturas iniciales

Estadísticos	$T_1(^{\circ}\text{C})$	$T_2(^{\circ}\text{C})$	$T_3(^{\circ}\text{C})$
Media	30,29	40,49	49,36
Mediana	29,50	40,25	49,10
Desviación típica	3,37	7,39	6,05
Varianza	11,35	54,54	36,62
Mínimo	25,90	29,70	40,60
Máximo	36,90	52,90	59,80

Fuente: Sánchez, (2022) a partir de los datos recolectados

En la Fig. 4.1 la temperatura inicial con fecha 21 de mayo del 2014, durante las horas de estudio se encuentra en promedio de $30,29^{\circ}\text{C}$ en el punto 1; $40,49^{\circ}\text{C}$ en el punto 2 y en el punto tres de $49,36^{\circ}\text{C}$, con una temperatura mínima de $25,9^{\circ}\text{C}$; $29,7^{\circ}\text{C}$ y $40,6^{\circ}\text{C}$ y un máximo de $36,9^{\circ}\text{C}$; $52,9^{\circ}\text{C}$ y $59,8^{\circ}\text{C}$. Las desviaciones estándar de las temperaturas se encuentran alrededor de su media aritmética en $3,37^{\circ}\text{C}$; $7,39^{\circ}\text{C}$ y $6,05^{\circ}\text{C}$ en cada uno de los puntos respectivamente.

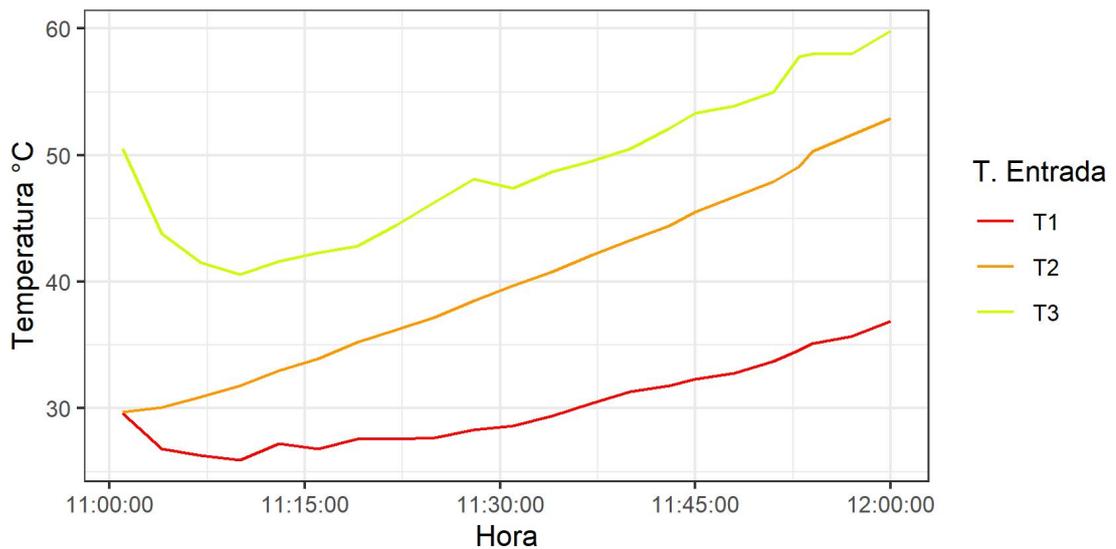


Figure 4.1: Temperaturas de entrada

La Tabla 4.4 muestra las estadísticas descriptivas de las tres temperaturas finales experimentales, las cuales serán utilizadas para inferir en la validez del modelo simulación.

Tabla 4.4: Estadísticos descriptivos de las tres temperaturas finales

Estadísticos	T_1 (°C)	T_2 (°C)	T_3 (°C)
Media	47,02	68,05	72,98
Mediana	47,05	68,05	72,70
Desviación típica	6,01	8,76	7,59
Varianza	36,16	76,7	57,62
Mínimo	37,80	54,20	61,90
Máximo	57,10	82,20	85,80

Fuente: Sánchez, (2022) a partir de los datos recolectados

Como se muestra en la Fig. 4.2 la temperatura que alcanza una vez finalizada el tiempo del experimento con fecha 21 de mayo del 2014, corresponde a un promedio de 47,02°C; 68,05°C y 72,98°C para el punto 1, 2 y 3 respectivamente, con una temperatura mínima de 37,8°C; 54,20°C; y 61,90°C alcanzando un máximo de 57,10°C; 82,20°C y

85,80°C. Con una desviación respecto al valor promedio de su temperatura de 6,01°C; 8,76°C y 7,59°C.

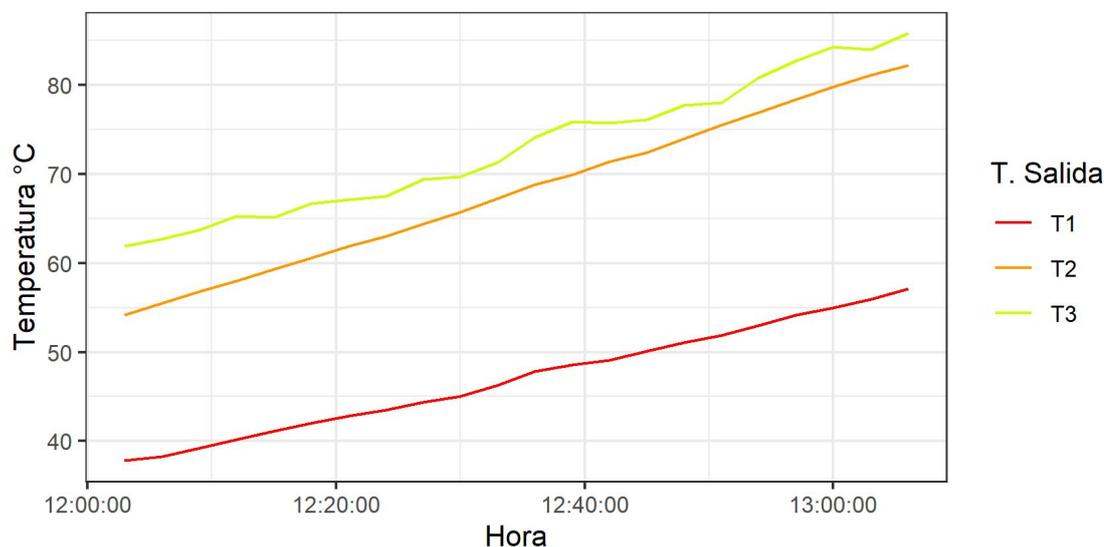


Figure 4.2: Temperaturas finales

La Tabla 4.5 muestra el análisis descriptivo de la variable temperatura ambiente, radiación solar global, radiación solar difusa y la radiación solar directa.

Tabla 4.5: Análisis descriptivos de la variable Temperatura ambiente y radiación

Estadísticos	T. ambiente (°C)	R. Difusa	R. Global	R. Directa
Media	19,50	154,60	1005,60	923,30
Mediana	19,29	148,69	994,12	922,18
Desviación típica	0,85	13,83	40,16	23,80
Varianza	0,72	191,35	1612,81	566,24
Mínimo	18,19	145,41	951,40	890,61
Máximo	21,08	194,22	1088,39	963,01

Fuente: Sánchez, (2022) a partir de los datos recolectados

La temperatura ambiente con fecha 21 de mayo del 2014, tuvo un promedio de 19,50°C; la superficie terrestre tuvo en promedio una ra-

radiación solar difusa de $154,60 \text{ w/m}^2$, un promedio de radiación solar global de $1005,60 \text{ w/m}^2$. Con un mínimo de $18,19^\circ\text{C}$; $145,41$ y $951,40 \text{ w/m}^2$ y un máximo de $21,08^\circ\text{C}$; $194,22$ y $1088,39 \text{ w/m}^2$ para la temperatura ambiente, radiación difusa y radiación global respectivamente.

En la Fig. 4.3 se observa las diferentes radiaciones en función del tiempo con su respectiva intensidad, donde la radiación solar global es la sumatoria de las difusa y directa.

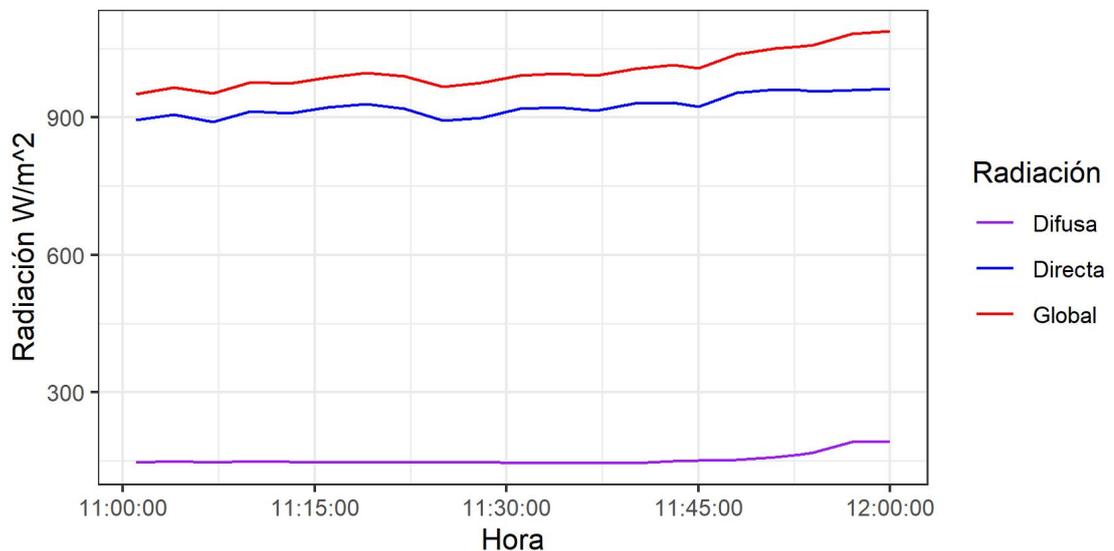


Figure 4.3: Radiación solar

En la Fig. 4.4 indica la temperatura ambiente desde las 11h00 hasta las 12h00 con fecha 21 de mayo del 2014, donde se observa una temperatura baja cerca de los 18°C y alcanza un máximo de 21°C aproximadamente.



Figure 4.4: Temperatura ambiente

4.3 Proceso de simulación de la temperatura de agua en el colector solar

Para la realización de la simulación se tomó en cuenta el balance de energía que interviene en el proceso, a diferentes ángulos de inclinación de los tubos captadores de energía.

4.3.1 Ángulo de inclinación

Para analizar la eficiencia del sistema de colector solar se realiza una simulación empezando con una inclinación de 10° hasta los 60° con una diferencia de 10°, en total se tiene 6 ángulos de inclinación.

Tabla 4.6: Ángulos de inclinación

Ángulos	10°	20°	30°	40°	50°	60°
---------	-----	-----	-----	-----	-----	-----

4.3.2 Ángulo de declinación del sol

Para el cálculo del ángulo de la declinación solar se tiene como referencia la fecha del 21 de mayo del 2014, que corresponde al día 141 del año, éste dato es el valor de n , el mismo que se reemplaza en la ecuación (2.1), obteniéndose un ángulo de declinación del sol de $20,138^\circ$.

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left[360 \cdot \left(\frac{284 + 141}{365} \right) \right]$$
$$\delta = 20,138^\circ$$

4.3.3 Ángulo de hora solar

El ángulo del sol varia de -180° a 180° y esta variación se calcula respecto al periodo de estudio, para el cálculo se aplica la ecuación (2.3), con H_s de 11h31 que corresponde a la hora del día, obteniéndose un ángulo de hora sol de $-7,25^\circ$ y este valor se puede visualizar en la Fig. 2.3 (a) Se detalla que $31/60$ es la conversión de minutos a horas.

$$\omega = 15 \cdot (H_s - 12)$$
$$\omega = 15 \cdot \left[\left(11 + \frac{31}{60} \right) - 12 \right]$$
$$\omega = -7,25^\circ$$

4.3.4 Ángulo de incidencia del sol

Para el cálculo de la incidencia del sol se aplica la ecuación (2.4), para ello se requiere el valor de la latitud a la cual se encuentra la facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) siendo un valor de latitud (ϕ) igual a -1.655789 , ángulo de declinación

del sol (δ) de $20,138^\circ$, ángulo de inclinación de la superficie captadora (β) de 20° y un ángulo acimut o de orientación de (γ) de 90° , obteniéndose un ángulo de incidencia del sol (θ) de $34,416^\circ$.

$$\begin{aligned}\cos(\theta) &= \sin(20,138) \sin(-1,655789) \cos(20) \\ &\quad - \sin(20,138) \cos(20) \sin(-1,655789) \cos(90) \\ &\quad + \cos(20,138) \cos(-1,655789) \cos(20) \cos(-7,25) \\ &\quad + \cos(20,138) \sin(-1,655789) \sin(20) \cos(90) \cos(-7,25) \\ &\quad + \cos(20,138) \sin(20) \sin 90 \sin(-7,25)\end{aligned}$$

$$\cos(\theta) = 0,825$$

$$\theta = \cos^{-1}(0,825)$$

$$\theta = 34,416^\circ$$

4.3.5 Ángulo cenital

Tomando datos del cálculo anterior, y empleando la ecuación (2.2) se tiene un ángulo cenital (θ_z) de $22,92^\circ$

$$\begin{aligned}\cos(\theta_z) &= \cos(-1,655789) \cdot \cos(20,138) \cdot \cos(-7,25) \\ &\quad + \sin(-1,655789) \cdot \sin(20,138)\end{aligned}$$

$$\cos(\theta_z) = 0,9210$$

$$\theta_z = \cos^{-1}(0,9210)$$

$$\theta_z = 22,92^\circ$$

4.3.6 Radiación solar

Para el calculo de la irradiación normal directa (I_b) se realiza mediante la ecuación (2.15), cabe mencionar que los datos de la irradiancia solar global (I_g) y la irradiancia difusa (I_d) fueron proporcionados por el GEAA, del mismo modo se realiza a manera de ejemplo con la información planteada en ejemplos anteriores.

$$I_g = I_b \cdot \cos(\theta_z) + I_d$$

$$I_b = \frac{I_g - I_d}{\cos(\theta_z)}$$

$$I_b = \frac{(992,08 - 145,822)W/m^2}{\cos(22,92^\circ)}$$

$$I_b = 918,83 W/m^2$$

La radiación solar reflejada se calcula de acuerdo a la superficie donde está implementado el colector solar y mediante la ecuación (2.12), se toma en consideración el coeficiente de reflexión o albedo de $\rho_g = 0,23$ por ser una superficie de hormigón.

Una vez determinado los parámetros necesarios se calcula el modelo difuso isotrópico donde intervienen tres tipos de radiación solar: radiación directa, difusa y reflejada definido por la ecuación (2.14)

$$I_T = I_b \left[\frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} \right] + I_d \left[\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right] + I\rho_g \left[\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right]$$

$$I_T = (918,73) \left[\frac{\cos(34,416)}{\cos(22,92)} \right] + (145,822) \left[\frac{1 + \cos(20)}{2} \right] +$$

$$(992,08)(0,23) \left[\frac{1 - \cos(20)}{2} \right]$$

$$I_T = 971,47 W/m^2$$

La irradiancia solar que recibe la superficie terrestre a un ángulo de inclinación de los tubos del colector solar a 20° y con una orientación de 90° , determina aproximadamente un total de $971,47 \text{ W/m}^2$.

4.3.7 Factor de eficiencia del colector solar

Para el calculo del factor de eficiencia del colector solar, se requiere de la temperatura media del colector, para esto se aplica la ecuación (2.29), obteniéndose para la temperatura 1 un promedio de $37,45^\circ\text{C}$.

$$t_m = \frac{T_e + T_s}{2}$$

$$t_m = \frac{46,3^\circ + 28,6^\circ}{2}$$

$$t_m = 37,45^\circ\text{C}$$

Para determinar el factor de eficiencia con la cual trabaja el colector solar de tubos, se aplica la ecuación (2.27)

$$\eta = F_R \cdot (\tau\alpha)_n - F_R \cdot U_L \left[\frac{(T_i - T_a)}{I_T} \right] - F_R \cdot U_{L/T} \left[\frac{(T_i - T_a)^2}{I_T} \right]$$

$$\eta = 0,8 - 2,5 \left[\frac{(37,45 - 19,153)}{971,47} \right] - 0,007 \left[\frac{(37,45 - 19,153)^2}{971,47} \right]$$

$$\eta = 0,7528$$

el modelo indica que la eficiencia del colector solar es de $75,28\%$.

Ahora se calcula la energía útil producida por el colector mediante la

ecuación 2.22

$$Q_u = F_R [I_T A_{abs} \tau \alpha - U_L (T_i - T_a) - U_{L/T} (T_i - T_a)^2]$$

$$Q_u = (F_R \tau \alpha) I_T A_{abs} - (F_R U_L) (T_m - T_a) - (F_R U_{L/T}) (T_m - T_a)^2$$

$$Q_u = (0,8)(971,3709)(3,3250) - (2,5)(37,45 - 19,153) \\ - (0,007)(37,45 - 19,153)^2$$

$$Q_u = 2536,02 \text{ W}$$

Y finalmente para calcular la temperatura de salida, se calcula con la ecuación (2.30)

$$T_o = 29,6 + \frac{2558,02}{(0,03)(4180)}$$

$$T_o = 49,82^\circ$$

Si en el sistema de colector solar con un ángulo de inclinación de 20° y con un ángulo de orientación de 90° se tiene una temperatura de salida de $49,82^\circ$, esta temperatura se obtiene con una eficiencia de 0,7528 lo que implica que el colector funciona al 75,28%.

4.3.8 Cálculo del área absorbente del colector

Se calcula el área absorbente del colector mediante la ecuación (2.31).

$$A_{abs} = \frac{(0,060)(\pi)(1,764)}{2}$$

$$A_{abs} = 0,166 \text{ m}^2$$

Se obtiene que el área absorbente es de $0,166 \text{ m}^2$ determinado para cada tubo, dentro del estudio se trabaja con un total de 20 tubos por lo tanto se tiene un área total absorbente de aproximadamente 3.3250 m^2 .

4.4 Simulación de la temperatura

El algoritmo de simulación del modelo matemático se realizó en el software estadístico Rstudio, con tres temperaturas iniciales (T_1, T_2, T_3) . El colector solar utilizado se encuentra ubicado en las instalaciones de GEAA-ESPOCH, las dimensiones y características están detalladas en la Tablas 4.1 y 4.2. El cálculo de la temperatura de agua a diferentes ángulos de inclinación β ($10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$) empezando en 10° hasta los 60° esto respecto a la superficie con los tubos de vacío y con 4 ángulos orientación γ ($0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$) en relación a giro de este a oeste. El ángulo solar fue calculado considerando la hora y el día de la obtención de los datos de manera experimental. Estas y otras consideraciones se detallan paso a paso para una de las iteraciones de la simulación en el apartado 4.3, donde se puntualiza los cálculos empleados para un caso puntual.

4.4.1 Simulación de la temperatura 1 en el colector solar

Para comenzar se realiza una simulación con la información existente con los diferentes ángulos de inclinación. La Tabla 4.7 muestra los promedios de temperatura final en cada uno de los ángulos de inclinación y su respectivo ángulo de orientación.

Tabla 4.7: Datos promedios de la temperatura final 1

Orientación	Inclinación					
	10°	20°	30°	40°	50°	60°
0°	52,88	51,93	50,45	48,48	46,09	43,34
30°	52,65	51,51	49,85	47,72	45,19	42,32
60°	52,45	51,20	49,43	47,20	44,59	41,65
90°	52,34	51,08	49,30	47,07	44,45	41,51

Fuente: Sánchez, (2022) a partir de los datos recolectados

El análisis del promedio de temperatura final 1, a los 10° y 20° de inclinación se observa que se mantiene alrededor de los 52 y 51°C respectivamente, mientras los ángulos de inclinación de 30° hasta 60° existen cambios alrededor de 7°C.

Observando la Fig. 4.5 se afirma que, sin importar el ángulo de orientación de los tubos, se obtiene mayor temperatura del agua con una inclinación de 10° con respecto a la superficie, además esta temperatura disminuye según aumente el ángulo de inclinación. Respecto a los datos experimentales de la temperatura 1 va de forma ascendente y próxima a un ángulo de inclinación de 40°.

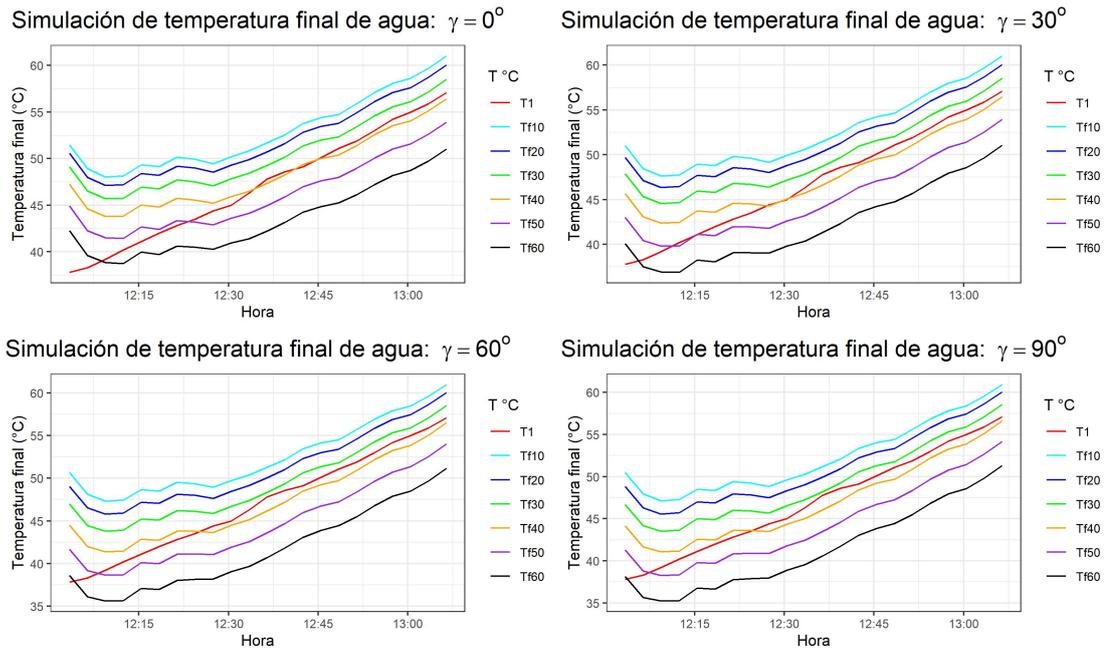


Figure 4.5: Simulación de la temperatura 1 en el colector solar

La Tabla 4.8 muestra los resultados del cálculo del error cuadrático medio para la simulación de la temperatura 1.

Tabla 4.8: Raíz del error cuadrático medio de la temperatura 1

Orientación	Inclinación					
	10°	20°	30°	40°	50°	60°
0°	6,41	5,57	4,33	3,05	2,86	4,60
30°	6,15	5,09	3,65	2,35	2,86	5,17
60°	5,94	4,73	3,18	1,95	3,05	5,65
90°	5,82	4,60	3,03	1,84	3,10	5,74

Fuente: Sánchez, (2022) a partir de los datos recolectados

El error que existe entre los datos simulados y con los datos experimentales de la temperatura 1 del colector solar se llega a la misma conclusión realizada mediante los gráficos y con una RECM = 1,84 como el valor mínimo que se aproxima más a realidad de la temperatura del agua en el colector solar.

4.4.2 Simulación de la temperatura 2 del colector solar

La Tabla 4.9 muestra los datos promedios de la temperatura final 2 , en cada uno de los ángulos de inclinación y su respectivo ángulo de orientación.

Tabla 4.9: Datos promedios de la temperatura final 2

Ángulo Orientación	Inclinación					
	10°	20°	30°	40°	50°	60°
0°	62,97	62,02	60,54	58,58	56,18	53,44
30°	52,54	51,40	49,74	47,62	45,08	42,22
60°	52,35	51,09	49,32	47,10	44,48	41,55
90°	62,54	61,28	59,51	57,28	54,65	51,72

Fuente: Sánchez, (2022) a partir de los datos recolectados

El análisis del promedio de la temperatura final 2, indica que se obtiene una mayor eficiencia con una inclinación de 10° y una orientación de 0° alcanzando un promedio de 62,97°C; por otro lado, la temperatura promedio más baja fue de 41,55°C con un ángulo de inclinación y orientación de 60°.

Estos resultados coinciden con los obtenidos por Kyekyere et al. (2021), las temperaturas finales en la salida del calentador de agua solar estaban por encima de 55°C dada una temperatura inicial de 25°C para una colección de calor de todo el día con un rango de eficiencia del sistema diario de 0.58 - 0.65.

Observando la Fig. 4.6 se identifica que el modelo se aproxima más al comportamiento del colector solar, a un ángulo de inclinación de 10° y un ángulo de orientación de 0°. Cuando se tiene un ángulo de ori-

entación de 30° y 60° no se obtiene la temperatura máxima experimental.

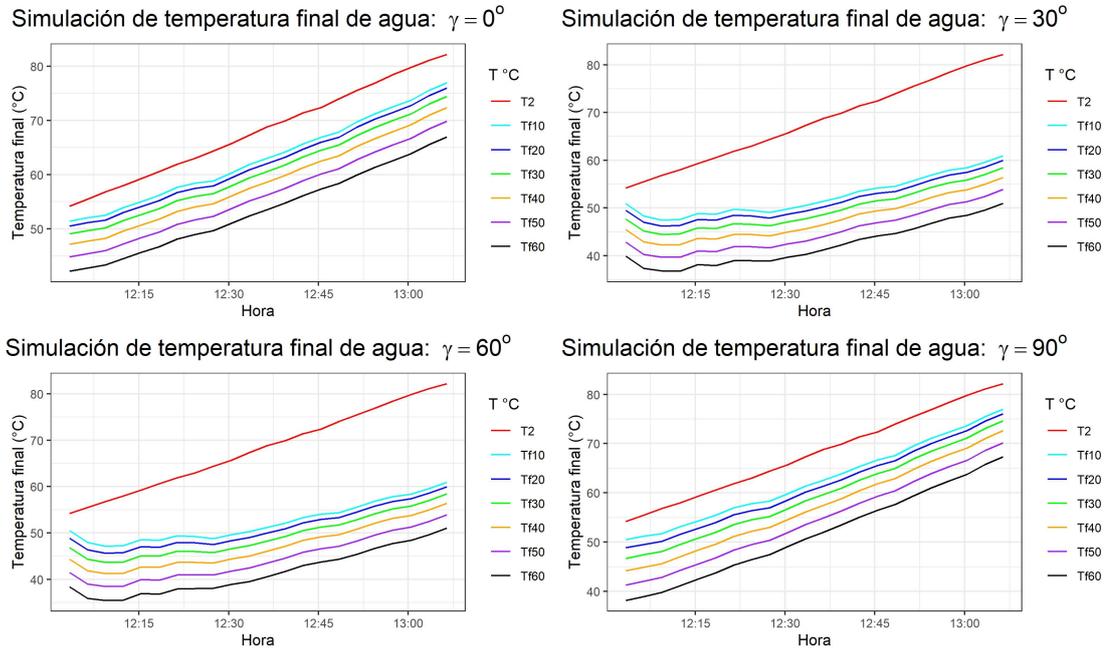


Figure 4.6: Simulación de la temperatura 2 del colector solar

Los resultados experimentales del estudio realizado por Dabra et al. (2013) revelaron que la diferencia de temperatura del aire y la eficiencia térmica del colector de aire solar de tubo evacuado a un ángulo de inclinación de 30° es mejor en comparación con el ángulo de inclinación de 45° . Los resultados también mostraron que el ángulo de inclinación de 30° con reflector tenía más rendimiento térmico en comparación con el ángulo de 45° con y sin reflector. Estos indicaron que el ángulo de inclinación del colector empinado (45°) disminuye el rendimiento térmico del colector de aire solar de tubo evacuado.

La Tabla 4.10 presenta los resultados del cálculo del error cuadrático medio para la simulación de la temperatura 2.

Tabla 4.10: Raíz del error cuadrático medio de la temperatura 2

Ángulo		Inclinación				
Orientación	10°	20°	30°	40°	50°	60°
0°	5,16	6,09	7,56	9,52	11,91	14,65
30°	16,28	17,34	18,91	20,97	23,43	26,24
60°	16,44	17,59	19,26	21,40	23,95	26,82
90°	5,55	6,79	8,55	10,78	13,40	16,34

Fuente: Sánchez, (2022) a partir de los datos recolectados

Al calcular el error que existe entre los datos simulados y con los datos experimentales de la temperatura 2 del colector solar se llega a la misma conclusión realizada mediante los gráficos y con una RECM = 5,16 como el valor mínimo que se aproxima más a realidad del colector solar, lo cual corresponde a un 0° y 10° de orientación e inclinación respectivamente.

4.4.3 Simulación de la temperatura 3 del colector solar

La Tabla 4.11 muestra los datos promedios de la temperatura final 3 , en cada uno de los ángulos de inclinación y su respectivo ángulo de orientación.

Tabla 4.11: Datos promedios de la temperatura final 3

Ángulo		Inclinación				
Orientación	10°	20°	30°	40°	50°	60°
0°	71.88	70,93	69.45	67.49	65.09	62.35
30°	71,65	70.51	68,85	66,72	64.19	61.32
60°	71.45	70.20	68.43	66.20	63,59	60,66
90°	71.43	70.17	68.40	66.17	63.54	60,61

Fuente: Sánchez, (2022) a partir de los datos recolectados

El análisis del promedio de temperatura final 3, alcanza una temperatura máxima promedio de $71,88^{\circ}\text{C}$ a una inclinación de 10° y ángulo de orientación de 0° , por otro lado, la temperatura promedio mínima fue de $60,61^{\circ}\text{C}$ a un ángulo de inclinación de 60° y de orientación de 90° .

Estos resultados experimentales coinciden con los obtenidos por Gond et al. (2016) donde el rendimiento del calentador solar de agua utilizando todos los materiales produjo la máxima eficiencia de alrededor del 40% al 47 % respectivamente. La temperatura máxima del agua de salida alcanzada es por debajo de 70° respectivamente. El orden de prioridad de los materiales para una mejor eficiencia es el cobre, el aluminio, que el acero inoxidable.

Observando la Fig. 4.7 se identifica que las temperaturas al inicio del periodo de estudio están por encima y por debajo de la temperatura experimental, sin embargo, las temperaturas finales del periodo de estudio se encuentran por debajo de la temperatura experimental. Y del mismo modo la temperatura más eficiente se logra con un ángulo de inclinación de 10° .

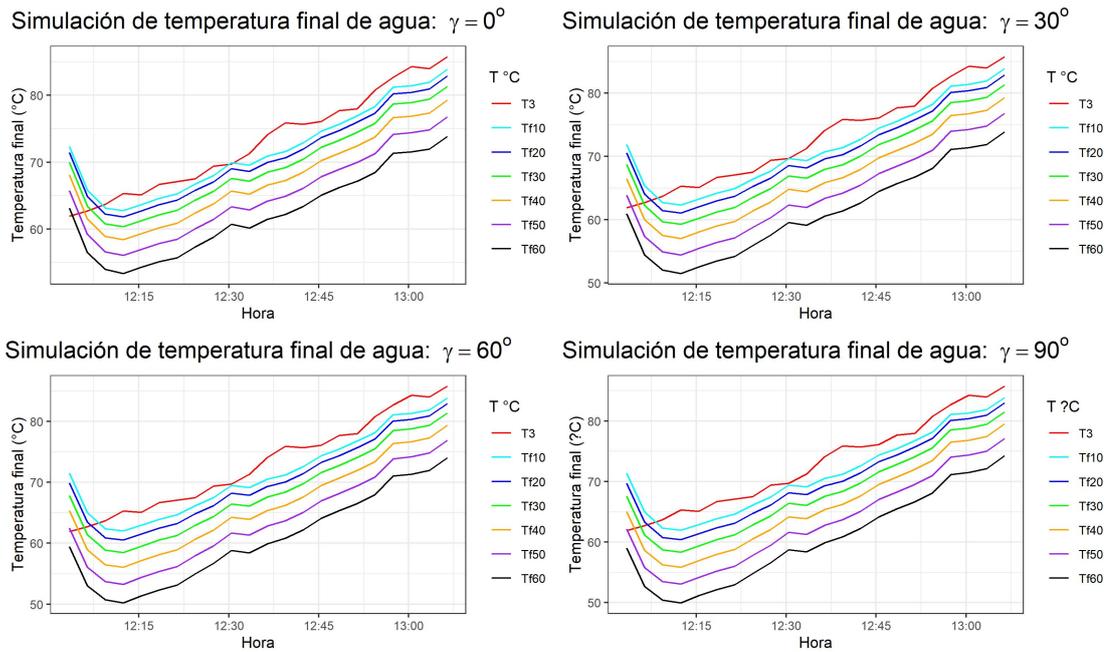


Figure 4.7: Simulación de la temperatura 3 del colector solar

La Tabla 4.12 muestra los resultados del cálculo del error cuadrático medio para la simulación de la temperatura 3.

Tabla 4.12: Raíz del error cuadrático medio de la temperatura 3

Orientación	Ángulo					
	10°	20°	30°	40°	50°	60°
0°	3,08	3,54	4,57	6,22	8,42	11,04
30°	3,11	3,70	4,94	6,81	9,18	11,95
60°	3,16	3,86	5,24	7,24	9,72	12,57
90°	3,15	3,85	5,25	7,26	9,75	12,61

Fuente: Sánchez, (2022) a partir de los datos recolectados

El error que existe entre los datos simulados y con los datos experimentales de la temperatura 3 del colector solar se llega a la misma conclusión realizada mediante los gráficos y con una RECM = 3,08 como el valor mínimo que se aproxima más a realidad de la temperatura del agua en

el colector solar, corresponde a 0° y 10° de orientación e inclinación respectivamente.

La tendencia de usar un dispositivo eficiente de energía crecerá rápidamente en las próximas décadas.

4.5 Contraste de Hipótesis

Antes de realizar la prueba de hipótesis se realiza un análisis estadístico sobre la prueba de normalidad de los datos.

4.5.1 Prueba de normalidad

1. Planteamiento de hipótesis

H_0 : Los datos de temperatura de agua provienen de una distribución normal

H_1 : Los datos de temperatura de agua no provienen de una distribución normal

2. Nivel de significancia

Se aplica el nivel de significancia $\alpha = 0,02$

3. Cálculos estadísticos

Para analizar la normalidad de los datos se aplica el test de Shapiro-Wilks. Como se muestra en la Tabla 4.13, para las tres temperaturas experimentales de entrada o iniciales y de salida o finales no se rechaza la hipótesis nula, porque el p-valor es mayor que el nivel de significancia es decir que 0,02; por lo tanto, se

considera que los datos se aproximan a una distribución normal.

Tabla 4.13: Prueba de normalidad de la temperatura experimental

	Temperatura	Variable	Estadístico	p.valor	Decisión
W	Inicial experimental	T_1	0,926	0,101	NO rechazo H_0
W_1		T_2	0,950	0,320	NO rechazo H_0
W_2		T_3	0,944	0,238	NO rechazo H_0
W	Salida experimental	T_1	0,956	0,416	NO rechazo H_0
W_1		T_2	0,956	0,418	NO rechazo H_0
W_2		T_3	0,940	0,201	NO rechazo H_0

Fuente: Sánchez, (2022) a partir de los datos recolectados

Normalidad en datos simulados

Para las tres temperaturas simuladas con 0° de dirección y a diferentes ángulos de inclinación de los tubos no se rechaza la hipótesis nula, porque el p-valor es mayor que el nivel de significancia (0,02) por lo tanto, se considera que las informaciones se aproximan a una distribución normal.

Tabla 4.14: Temperatura de salida 1 con 0° de orientación

Método	Variable	Estadístico	p.valor	Decisión
Shapiro-Wilk normality test	Tf10	0,910	0,047	NO rechazo H_0
Shapiro-Wilk normality test	Tf20	0,910	0,047	NO rechazo H_0
Shapiro-Wilk normality test	Tf30	0,911	0,049	NO rechazo H_0
Shapiro-Wilk normality test	Tf40	0,911	0,050	NO rechazo H_0
Shapiro-Wilk normality test	Tf50	0,913	0,054	NO rechazo H_0
Shapiro-Wilk normality test	Tf60	0,915	0,059	NO rechazo H_0

Fuente: Sánchez, (2022) a partir de los datos recolectados

Nota: Este contraste se realiza para cada una de las temperaturas simuladas a los diferentes ángulos de inclinación y ángulo de dirección. Y como cumplen con los supuestos de normalidad se aplica pruebas de hipótesis paramétricas.

4.5.2 Validados del modelo de simulación

En la Tabla 4.15 se aprecia el cálculo del coeficiente de eficiencia como uno de los parámetros indicativos de la validez del modelo de simulación se obtuvo mediante la ecuación 3.1, se afirma que la temperatura 1 experimental se ajusta de mejor manera con la temperatura simulada con un ángulo de inclinación de 40° y un ángulo de dirección de 90°. Sin embargo, la temperatura 1 se logró maximizar mediante la simulación, lo que permitió obtener mayor resultado a un ángulo de inclinación de 10° y dirección de 0°.

Tabla 4.15: Coeficiente de eficiencia de la temperatura 1

Orientación	Inclinación					
	10°	20°	30°	40°	50°	60°
0°	0,172	0,211	0,299	0,445	0,453	0,219
30°	0,212	0,307	0,484	0,706	0,627	0,342
60°	0,244	0,380	0,610	0,821	0,668	0,381
90°	0,258	0,408	0,650	0,849	0,684	0,398

Fuente: Sánchez, (2022) a partir de los datos recolectados

Como se muestra en la Tabla 4.16 el análisis de la eficiencia con el modelo de simulación para la temperatura 2 se tiene en claro que la mayor eficiencia se logra un ángulo de inclinación de 10° y un ángulo de dirección de 0° lo que implica un 69,5% de eficiencia.

Tabla 4.16: Coeficiente de eficiencia de la temperatura 2

Ángulo	Inclinación						
	Orientación	10°	20°	30°	40°	50°	60°
0°		0,695	0,618	0,510	0,394	0,290	0,209
30°		0,221	0,319	0,500	0,717	0,621	0,337
60°		0,253	0,393	0,627	0,826	0,660	0,375
90°		0,197	0,232	0,287	0,374	0,508	0,690

Fuente: Sánchez, (2022) a partir de los datos recolectados

La Tabla 4.17 muestra el modelo de simulación para la temperatura 3 se puede afirmar que la mayor eficiencia se logra un ángulo de inclinación de 10 ° y un ángulo de dirección de 0° lo que implica un 78,1% de eficiencia.

Tabla 4.17: Coeficiente de eficiencia de la temperatura 3

Ángulo	Inclinación						
	Orientación	10°	20°	30°	40°	50°	60°
0°		0,781	0,727	0,613	0,456	0,309	0,200
30°		0,057	0,064	0,075	0,092	0,118	0,161
60°		0,059	0,069	0,084	0,106	0,139	0,194
90°		0,060	0,071	0,086	0,109	0,145	0,202

Fuente: Sánchez, (2022) a partir de los datos recolectados

4.5.3 Contraste de correlación

1. Planteamiento de hipótesis

H_1 : El colector solar de tubos de vacío que se considera tanto para la experimentación como para la simulación numérica tiene

un efecto positivo con el ángulo de inclinación para la captación máxima de la energía solar.

H_o : El colector solar de tubos de vacío que se considera tanto para la experimentación como para la simulación numérica no tiene un efecto positivo con el ángulo de inclinación para la captación máxima de la energía solar.

2. Nivel de significancia

Se trabaja con un nivel de significancia del $\alpha = 0.02$

3. Cálculos estadísticos

Test de correlación

Para un nivel de significancia del 2% se rechaza la hipótesis nula y se afirma la existencia de correlación entre la temperatura 1 de agua y el ángulo de inclinación colector solar. Mientras el ángulo de inclinación aumenta la temperatura del agua disminuye. La correlación es máxima negativa - 0,647 (Ver Tabla 4.18).

Tabla 4.18: Test de correlación de la temperatura 1

Test de correlación de la temperatura 1			
Método	Estadístico	p.valor	Correlación
Pearson's correlation	-9.665	0	-0.647
Pearson's correlation	-9.514	0	-0.641
Pearson's correlation	-9.311	0	-0.633
Pearson's correlation	-9.111	0	-0.624

Fuente: Sánchez, (2022) a partir de los datos recolectados

Para un nivel de significancia del 2% se rechaza la hipótesis nula y se afirma la existencia de correlación entre la temperatura 2 de agua y el

ángulo de inclinación colector solar. Mientras el ángulo de inclinación aumenta la temperatura del agua disminuye. La correlación máxima negativa es de -0.64 (Ver Tabla 4.19).

Tabla 4.19: Test de correlación de la temperatura 2

Método	Estadístico	p.valor	Correlación
Pearson's correlation	-4.815	0	-0.389
Pearson's correlation	-9.488	0	-0.64
Pearson's correlation	-9.287	0	-0.632
Pearson's correlation	-4.925	0	-0.397

Fuente: Sánchez, (2022) a partir de los datos recolectados

Para un nivel de significancia del 2% se rechaza la hipótesis nula y se afirma la existencia de correlación entre la temperatura 3 de agua y el ángulo de inclinación colector solar. Mientras el ángulo de inclinación aumenta la temperatura del agua disminuye. La correlación máxima negativa es de -0.463 (Ver Tabla 4.20).

Tabla 4.20: Test de correlación de la temperatura 3

Método	Estadístico	p.valor	Correlación
Pearson's correlation	-5.805	0	-0.454
Pearson's correlation	-5.934	0	-0.462
Pearson's correlation	-5.957	0	-0.463
Pearson's correlation	-5.879	0	-0.458

Fuente: Sánchez, (2022) a partir de los datos recolectados

Test de comparación de medias de los datos simulados

Se plantea el proceso de la simulación como un diseño factorial con 2 factores ya que se considera como factores a: Ángulo de inclinación y Ángulo de orientación, con sus niveles de (10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60°) y (0°, 30°, 60°, 90°)

Por tanto, el diseño factorial será de 6×4 , ($a \times b$).

El modelo estadístico aplicado se realiza en función de la ecuación 2.32, para lo cual se desea demostrar las hipótesis específicas:

- Hipótesis específica 1

H_o : Efecto del ángulo de inclinación es igual a cero

H_a : Efecto del ángulo de inclinación es diferente a cero

- Hipótesis específica 2

H_o : Efecto del ángulo de dirección es igual a cero

H_a : Efecto del ángulo de dirección es diferente a 0

- Hipótesis específica 3

H_o : Inclinación · orientación es igual a cero

H_a : Inclinación · orientación es diferente a 0

Análisis ANOVA de la temperatura 1

Para el análisis ANOVA de la temperatura 1 se aprecia que el ángulo de inclinación si tiene efecto sobre la variable respuesta el p-valor (2×10^{-16}) es menor al nivel de significancia (0,02); sin embargo, el efecto del ángulo de orientación no tiene efecto significativo el p-valor (0,0966) es mayor al nivel de significancia (0,02); lo mismo ocurre con la combinación de los dos factores (Ver Tabla 4.21).

Tabla 4.21: Análisis ANOVA de la Temperatura 1

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Inclinación	5	6859	1371,8	70,617	<2e-16
orientación	3	124	41,2	2,121	0,0966
Inclinación : orientación	15	17	1,1	0,059	1,00
Residuals	504	9791	19,4		

Fuente: Sánchez, (2022) a partir de los datos recolectados

La temperatura según el ángulo de inclinación muestra diferencias significativas para los diferentes pares de variables esto significa que los resultados obtenidos a diferentes ángulos de inclinación varían, sin embargo, esto no indica que todos los pares de variables sean diferentes el rechazar la Hipótesis nula indica que existe algún o algunos pares de variables con diferencias significativas en sus resultados. El p valor del ángulo de orientación y la combinación de inclinación-orientación resultó no significativos, y se concluye que la temperatura de agua no tiene diferencia significativa.

En la Fig. 4.8 se observa que mientras más se aumente el ángulo de inclinación de los tubos la temperatura del agua desciende, esto es corroborado con la correlación negativa encontrada en el test de correlación. Por otro lado, si se cambia los ángulos de orientación se observa un descenso leve de la temperatura del agua. Además se observa que los resultados máximos muestran con un ángulo de inclinación y orientación de 10° y 0° respectivamente.

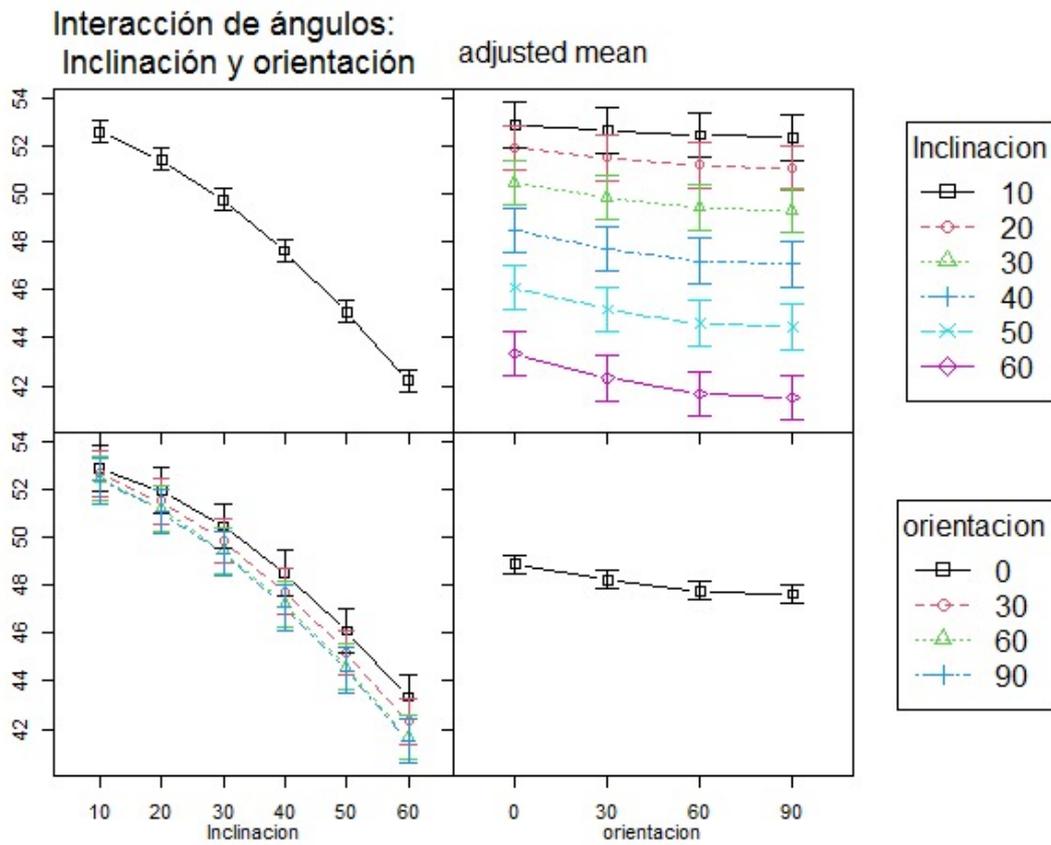


Figure 4.8: Interacción entre ángulos de inclinación y orientación de la T_1

Comparación de medias múltiples de Tukey de la temperatura 1

Las diferencias entre medias en las que el intervalo de confianza que engloba los límites inferior y superior no contienen el valor 0, son estadísticamente significativas, en el caso del ángulo de inclinación no son estadísticamente significativas para tres pares de medias (20-10; 30-20 y 40-30), y de igual forma para el ángulo de orientación en todos los pares de medias también no son estadísticamente significativas, tal como se muestra en la Fig. 4.9

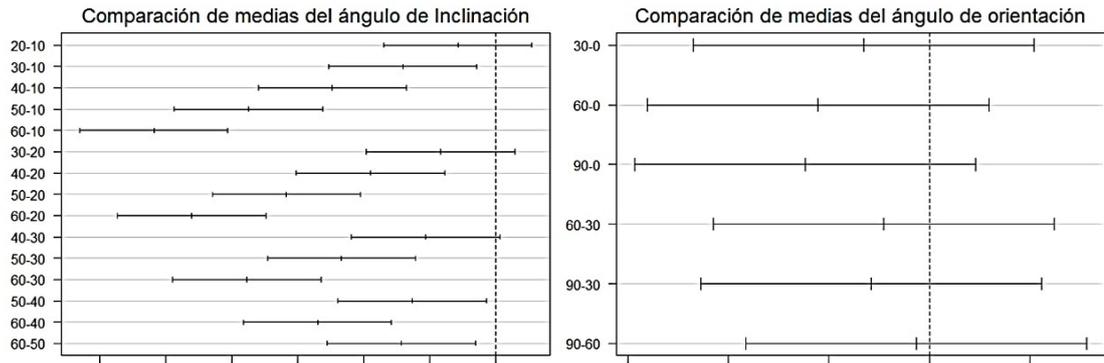


Figure 4.9: Comparación de medias múltiples de Tukey de la temperatura 1

Análisis ANOVA de la temperatura 2

Para el análisis ANOVA de la temperatura 2 se aprecia que el ángulo de inclinación si tiene efecto sobre la variable respuesta, del mismo modo que existe efecto para el ángulo de orientación. Por otro lado, la combinación de las dos no es significativo (Ver Tabla 4.22).

Tabla 4.22: Análisis ANOVA de la Temperatura 2

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Inclinación	5	6859	1372	30,430	<2e-16
orientación	3	14702	4901	108,712	<2e-16
Inclinación : orientación	15	17	1	0,025	1
Residuals	504	22720	45		

Fuente: Sánchez, (2022) a partir de los datos recolectados

La temperatura según el ángulo de inclinación muestra diferencias significativas para los diferentes pares de variables esto significa que los resultados obtenidos a diferentes ángulos de inclinación varían. El p valor de la combinación de inclinación y orientación resultó no significativos, y se concluye que la temperatura de agua no tiene diferencia significativa.

En la Fig. 4.10 se observa que mientras más se aumente el ángulo de inclinación de los tubos la temperatura del agua descende, por otro lado, si se cambia los ángulos de orientación se observa un descenso hasta lo 30°, no varía mucho hasta los 60° y para 90° asciende nuevamente la temperatura del agua.

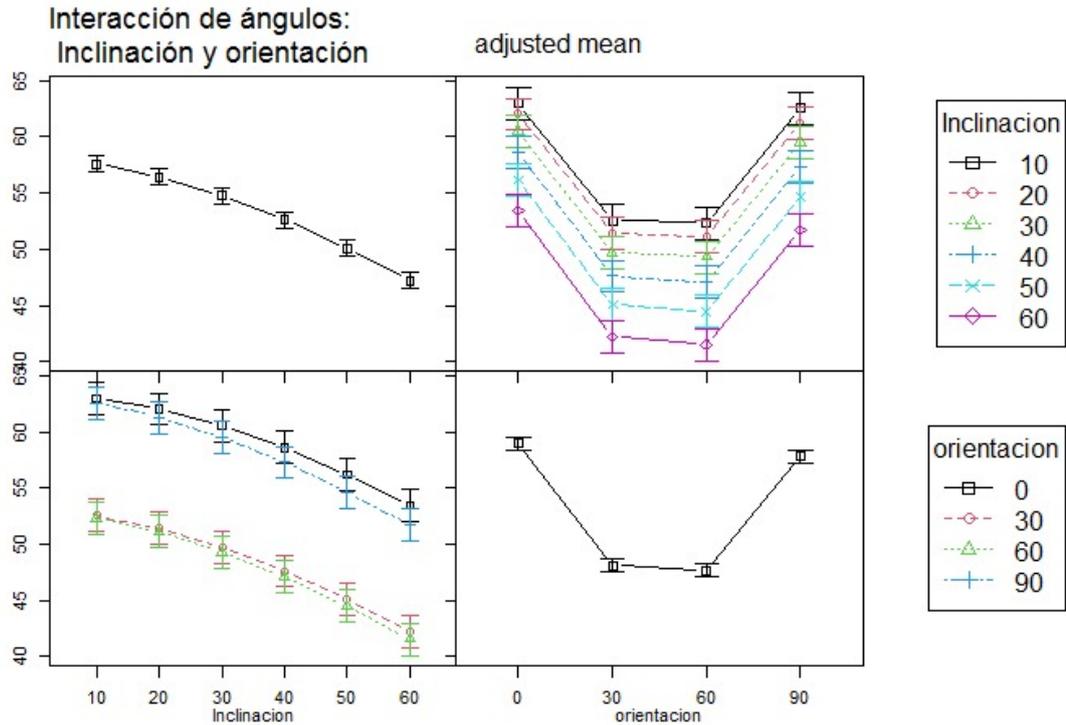


Figure 4.10: Interacción entre ángulos de inclinación y orientación de la T_2

Comparación de medias múltiples de Tukey de la temperatura 2

La comparación de medias pareadas para cada uno de los factores muestra que para el ángulo de inclinación se rechazan la hipótesis nula para seis pares de medias (20-10; 30-10 y 30-20; 40-30; 50-40; 50-60), mientras que para el ángulo de orientación se rechazan la hipótesis nula para dos pares de medias (90-0, 60-30), esto se corrobora del gráfico de efectos, esto se muestra en la Fig. 4.11

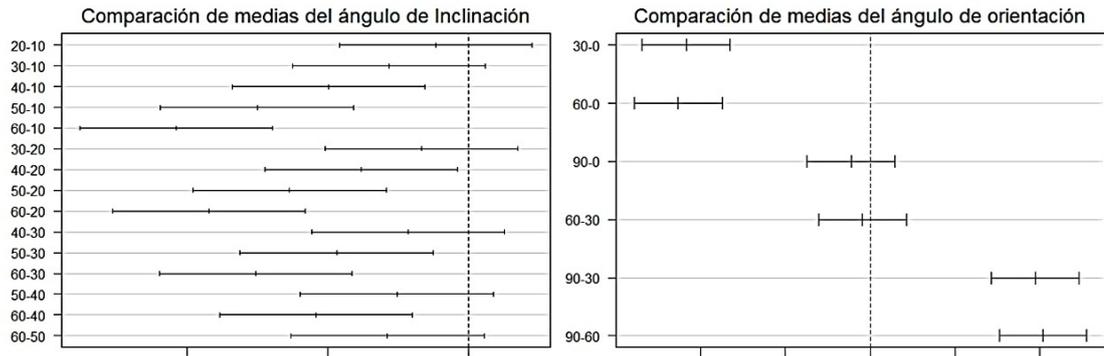


Figure 4.11: Comparación de medias múltiples de Tukey de la temperatura 2

Análisis ANOVA de la temperatura 3

Para el análisis ANOVA de la temperatura 3 se aprecia que el ángulo de inclinación si tiene efecto sobre la variable respuesta, no existe efecto para el ángulo de orientación. Y la combinación de las dos no es significativo (Ver Tabla 4.23).

Tabla 4.23: Análisis ANOVA temperatura 3

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Inclinación	5	6859	1371,8	27.683	<2e-16
orientación	3	112	37,5	0,756	0,519
Inclinación : orientación	15	17	1,1	0,023	1.000
Residuals	504	24975	49,6		

Fuente: Sánchez, (2022) a partir de los datos recolectados

La temperatura según el ángulo de inclinación muestra diferencias significativas para los diferentes pares de análisis. El p valor del ángulo de orientación y la combinación de inclinación y orientación resultaron no significativos, y se concluye que la temperatura de agua no diferencia significativa.

Comparación de medias múltiples de Tukey de la temperatura 3

En la Fig. 4.12 se aprecia que mientras más se aumente el ángulo de inclinación de los tubos la temperatura del agua descende, por otro lado, si se cambia los ángulos de orientación se observa un descenso no tan pronunciado.

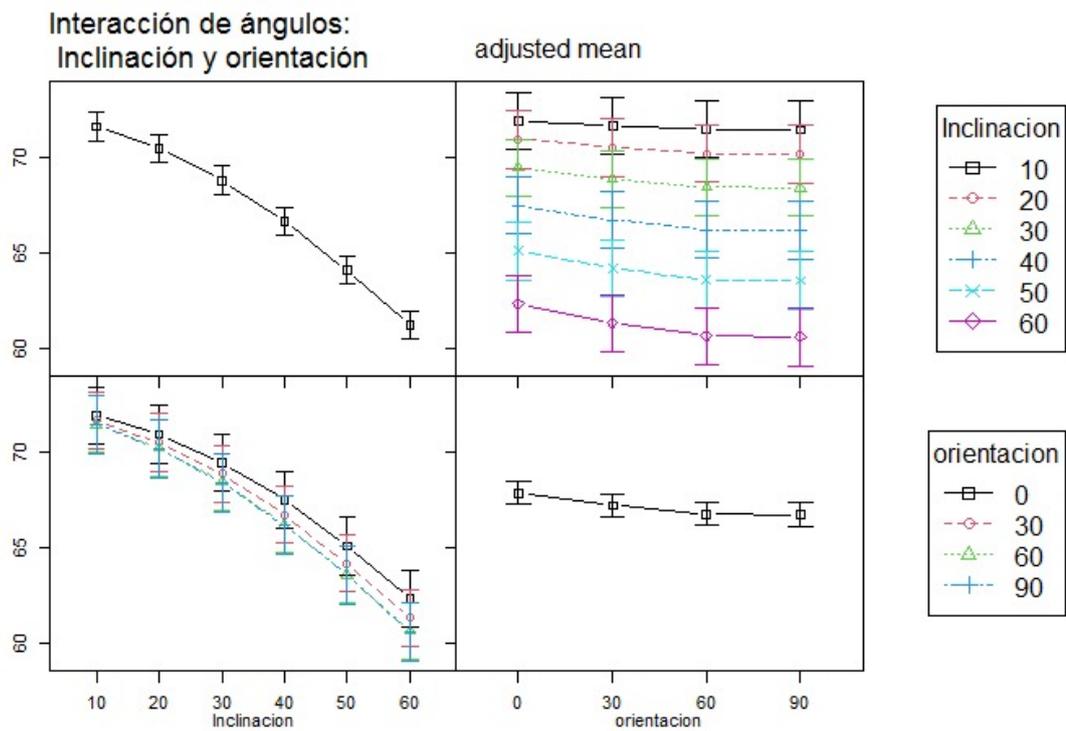


Figure 4.12: Interacción entre ángulos de inclinación y orientación de la T_3

Comparación de medias múltiples de Tukey de la temperatura 3

La comparación de medias pareadas para cada uno de los factores muestra que para el ángulo de inclinación se rechazan la hipótesis nula para seis pares de medias (20-10; 30-10 y 30-20; 40-30; 50-40; 50-60), mientras que para el ángulo de orientación se rechazan la hipótesis nula para todas las medias pareadas, esto se evidencia en la Fig. 4.13

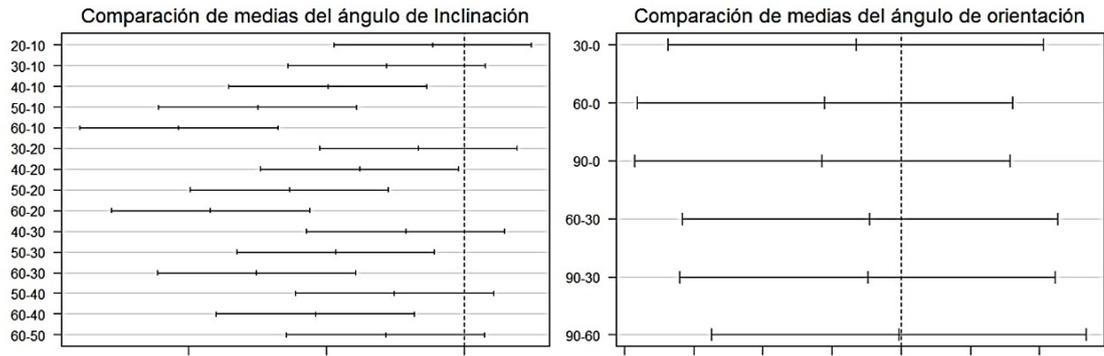


Figure 4.13: Comparación de medias múltiples de Tukey de la temperatura 3

Supuestos del modelo factorial 6 x 4 en los residuos

Los supuestos del modelo factorial 6×4 indican que no cumplen con el supuesto de normalidad en los residuos, mientras que homocedasticidad cumple la T_1 y T_2 a un nivel de significancia del 1%. Casos que ocurre con experimentos aproximados a la realidad de estudio (Ver Tabla 4.24).

Tabla 4.24: Supuestos del modelo factorial 6×4 en los residuos

Temperatura	Normalidad	Homocedasticidad
T_1	W = 0,92077; p-value = 4,91e-16	Chisquare = 1,70721; Df = 1; p = 0,19135
T_2	W = 0,98045; p-value = 1,606e-06	Chisquare = 48,02717; Df = 1; p = 4,2035e-12
T_3	W = 0,94187; p-value = 1,633e-13	Chisquare = 0,6390586; Df = 1; p = 0,42405

Fuente: Sánchez, (2022) a partir de los datos recolectados

El análisis de los residuos del modelo factorial muestra un valor p menor al nivel de significancia y por ende se rechaza H_0 y se asume que estos no provienen de una distribución normal para la Temperatura 1, Temperatura 2 y Temperatura 3. los residuos tienen varianzas iguales para la

temperatura 1 y temperatura 3, con los residuos de la temperatura 2 se tiene heterocedasticidad (Varianzas diferentes).

La temperatura del agua varia dependiendo de la incidencia de la radiación solar durante el día, además la latitud juega un punto clave cuando se considera utilizar los ángulos de posicionamiento de los tubos ya sea en su inclinación como en su ángulo de orientación en este caso el estudio fue centrado en la facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, donde los resultados muestran diferencias claves respecto al ángulo de inclinación y al ángulo de orientación

Esto se corrobora con el estudio realizado por Skerlic et al. (2018) donde afirma que la orientación de un colector puede describirse con la ayuda de sus ángulos de inclinación y acimut. Estos dos parámetros pueden variar en códigos informáticos para encontrar la orientación óptima.

CAPÍTULO V

Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

El modelo de la eficiencia del colector solar empleado para simular la temperatura final de agua (Anexo 5) dentro del sistema del colector solar de tubos, analizando tres muestras tomadas de manera experimental de 11h00 a 12h00, estas son comparadas con datos simulado con 4 ángulos de dirección (0° , 30° , 60° , 90°) y 6 ángulos de inclinación (10° , 20° , 30° , 40° , 50° , 60°), además se toma en cuenta en ángulo horario de 15° por cada hora transcurrido.

Los datos obtenidos mediante la simulación se reflejan en la Fig. 4.5, Fig. 4.6 y Fig. 4.7 que representan la (T_1 , T_2 y T_3) temperatura final o de salida de agua, donde la eficiencia del colector solar se maximiza con un ángulo de inclinación de 10° y a un ángulo de orientación de 0° con respecto al movimiento del sol (de este a oeste), además se pudo notar que el aumento del ángulo de inclinación y de orientación la temperatura del agua comienza a descender. Por lo tanto, para obtener mayor temperatura del agua es necesario utilizarlo a un ángulo de inclinación de 10° , esto se recalca con la latitud ubicado de la Facultad de Ciencias

de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Para T_1, T_2, T_3 , se obtuvo un total de 24 curvas en cada caso, y mediante el cálculo de la raíz del error cuadrático medio (RECM) se pudo especificar el error de ajuste del modelo respecto a los datos experimentales, para T_1 el mejor ajuste fue para 40° de inclinación y 90° de dirección (Tabla 4.8), sin embargo esto denotó que la mayor eficiencia del modelo debe ser a un 10° de inclinación y 0° de dirección, para T_2 y T_3 el ajuste con una RECM mínimo fue a un ángulo de inclinación de 10° y con un ángulo de dirección de 0° (Tabla 4.10 y 4.12). Los pronósticos realizados mediante el modelo de simulación, obtiene una RECM mínimo de 1,84 a un ángulo de orientación de 90° y un ángulo de inclinación de 40° para la temperatura 1; de 5,16 y 3,08 a un ángulo de orientación de 0° y de inclinación a 10° para la temperatura 2 y 3 respectivamente.

La validación del modelo se realiza mediante la RECM la cual con valores mínimos indica la factibilidad del uso del modelo de simulación, además el cálculo del coeficiente de eficiencia indica, la eficiencia con la que trabaja el modelo donde para la temperatura 1, temperatura 2, temperatura 3, se tiene 0,849; 0,695; 0,781 respectivamente, del mismo modo estos valores maximizan la realidad de los datos simulados. Sin embargo, para la temperatura 1 se tiene una eficiencia de 0,849 pues se asemeja al comportamiento del colector solar con un ángulo de inclinación de 40° y orientación de 90° , a pesar de ello se logró mejores resultados en cada uno de los modelos de simulación con un ángulo de inclinación de 10° y 0° de orientación.

La temperatura del agua en el sistema de colector solar se relaciona in-

versamente con el ángulo de inclinación, ya que al aumentar dicho ángulo de 10° hasta 60° se observó que la temperatura del agua descende, por lo tanto, si se desea maximizar la temperatura del agua se debe colocar con un ángulo de inclinación de 10° y 0° de orientación.

El ángulo de inclinación tiene efecto para cada una de las variables en estudio mientras que el ángulo de orientación es significativo en la T_2 , lo que indica que hay variación en los resultados obtenidos, por lo que se realiza una comparación de medias por el método de Tukey, donde se concluye que la temperatura del agua 1 y 3 son diferentes para cada ángulo de orientación, mientras que en T_2 existe medias significativamente iguales cuando se trabaja con un ángulo de 0° - 90° y 30° - 60° . Para el ángulo de inclinación se encontró que las medias eran distintas cuando se trabaja a un ángulo de 20° - 10° para las tres temperaturas. Corroborando con el análisis de correlación se concluye que a mayor ángulo de inclinación existe menos aprovechamiento de la radiación solar la cual actúa como potencia clave en el calentamiento del agua en el colector solar.

Al comparar los datos de temperaturas obtenidos de manera experimental con los obtenidos mediante la simulación, para T_1 los datos simulados contienen una RECM mínimo, sin embargo, el modelo matemático mostró una mayor eficiencia a un ángulo de inclinación de 10° y de dirección a 0° ; para T_2 y T_3 el dato experimental se mantiene por encima de los datos simulados, del mismo modo se obtuvo curvas más próximas simuladas a 10° de inclinación y 0° de dirección. Estos datos fueron sometidos a una comparación de medias (promedios) mediante el test de comparación de Tukey (Fig. 4.8 – Fig. 4.12) donde existen diferencias entre los promedios de ángulos de inclinación y dirección.

Cabe mencionar que el siguiente trabajo de investigación se realizó con la información recolectada en el año 2014, por motivo que el centro de investigación GEAA no monitoriza la recolección de información de estos dispositivos, por tanto, la reactivación de estos equipos fue cancelado por la crisis sanitaria que se vive actualmente. Es necesario recalcar la importancia del estudio primero por la metodología que se implementó para realizar este trabajo, lo que conlleva a ocupar este estudio en describir la matemática implicada en estos tipos de procesos, y por otra parte para el centro de energías alternativas y ambiente ESPOCH les servirá al momento de instalar o diseñar un sistema de colector solar de tubos de vacío pues podrán utilizar esta información para colocar el sistema de colector solar en la posición óptima con el fin de que recolecte la mayor cantidad de energía útil y que la temperatura del agua sea máximo, además el estudio aporta a la reutilización del modelo de predicción de temperatura de agua en futuros trabajos en distintas partes del país y si de ser posible del mundo.

Otra de las aportaciones de esta investigación es para el grupo GEAA quienes realizan diversas investigaciones a modo de ayudar al planeta y a mejorar la calidad de vida de los habitantes en la zona central Andina, el apoyo principal del estudio es en la "Aplicación de la energía solar para el diseño y adaptación tecnológica de dispositivos solares para la eficiencia energética en edificaciones en la zona central Andina", esto será aporte a la reducción del consumo eléctrico y el consumo de gas en calefones.

5.2 Recomendaciones

Según la latitud de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), se recomienda utilizar los tubos del colector solar a una inclinación de 10° y mantener una orientación de los mismos a 0° , para obtener mayor eficiencia el momento de calentar el agua.

Existen diversos modelos para analizar el ingreso de la radiación solar, sin embargo es recomendable utilizar un modelo que se ajuste a las condiciones del lugar de estudio, con el fin de obtener resultados más próximos a la realidad estudiada.

Se recomienda usar el diseño experimental de acuerdo al número de factores con sus respectivos niveles, en este trabajo se realiza un diseño experimental de dos factores con niveles mayores a dos y diferentes.

Es recomendable analizar el modelo de simulación y analizar los fenómenos que actúan dentro del sistema del colector solar, así como la radiación solar, temperatura ambiente, flujo del agua y entre otras.

El modelo matemático de la eficiencia del colector solar parte del balance de energías que entra en el sistema, pérdidas dentro del sistema y la salida del sistema y algunos de los parámetros fueron tomados a referencia bibliográfica.

Referencias

- [1] Aisa, A. M. (2017). *Modeling and simulation of solar water heating system with thermal storage* (Tesis de maestría). Faculty of Engineering and Applied Science Memorial University of Newfoundland, St. John's, Newfoundland, Canada. [CrossRef]
- [2] Al-Hilaly, E. y Muhsin, I. J. (2018). Gaussian equation to describe the percent of shadow length in satellite imagen. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 11. [CrossRef]
- [3] Al-Khazzar, A. (2015). A comprehensive solar angles simulation and calculation using matlab. *International Journal of Energy and environment*, 6, 367–376 [CrossRef]
- [4] Alhaidari, S. (2017). *A look at the optimum tilt angle of a fixed solar panel for maximum energy collection for a one year time frame* (Tesis de maestría). Wright State University, B.Sc., University of Babylon, Iraq, 2008. [CrossRef]
- [5] Alonso-Lorenzo, J. A. (2019). Radiación, Geometría, Recorrido óptico, Irradiancia y HSP. departamento técnico de SunFields Europe - Proveedor de Equipos Energía Solar, C/Lope Gomez de Marzoa S/N, Feuga, 15706 Santiago de Compostela (España). [CrossRef]

- [6] Cardenas, N. (2020). ¿cuáles son los retos energéticos para ecuador en 2020?. [mensaje en un blog]. [CrossRef]
- [7] Ciulla, G., D'Amico, A., Brano, V. L., y A. Buscemi (2020). Regression analysis to design a solar thermal collector for occasional use. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 37, 100638 [CrossRef]
- [8] Coetzee, R. A. M., Mwesigye, A., and Huan, Z. (2017). Optimal slope angle selection of an evacuated tube collector for domestic solar water heating. *Journal of Energy in Southern Africa*, 28, 104 – 119 [CrossRef]
- [9] Dabra, V., Yadav, L., y Yadav, A. (2013). The effect of tilt angle on the performance of evacuated tube solar air collector: experimental analysis . *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 5, 100 –110 [CrossRef]
- [10] Das, A. y Saha, A. (2019). Study of Influence of Tilt Angle and Flow Rate on the Performance of Evacuated Tube Solar Collector. *International Journal of Engineering Research Technology (IJERT)*, 8(8), 60–63 [CrossRef]
- [11] Dasari, N., y Sridhar, K. (2017). Thermal Analysis of a Solar Flat-Plate Collector. *International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences*, 5(4), 472–475. [CrossRef]
- [12] Duffie, J. A. y Beckman, W. A. (2013). Solar Engineering of Thermal Processes. *John Wiley*, Hoboken, New Jersey, fourth edition [CrossRef]

- [13] Franco, A., Shaker, M., Kalubi, D., y Hostettler, S. (2017). A review of sustainable energy access and technologies for healthcare facilities in the global south. *Journal Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 22, 92–105 [CrossRef]
- [14] Grahovac, M.1, Liedl, P., Frisch, J., Tzscheuschler. Condicion for multi-Energy Optimization. *Conference: 41st International Congress and Exhibition on Heating, Refrigeration and Air ConditioningAt: Belgrade, Serbia.* [CrossRef]
- [15] Gholami, Z., Rahmati, M. H., y Gharzi, M. (2020). Investigation of absorber tubes types in the solar thermal collectors. *VII Congreso Nacional de Investigación Aplicada en Ciencias Agrícolas, En: Universidad Shahid Beheshti, Teherán, Irán* [CrossRef]
- [16] Gond, B. K., Mittal, S., Prajapati, P., and Khare, R. (2016). Analysis of solar flat plate collector. *International Journal of Research and Scientific Innovation (IJRSI)*, 3, 105–110 [CrossRef]
- [17] Gutiérrez, H. and De la vara, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. McGRAW-HILL/Interamericana editores, S.A. de C.V [CrossRef]
- [18] Hassan, J. M., Abdul-Ghafour, Q. J., y Mohammed, M. F. (2017). Cfd simulation of enhancement techniques in flat plate solar water collectors. *Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences*, 20(3):751– 761 [CrossRef]
- [19] Ike, G. N., Usman, O., Alola, A. A., y Sarkodie, S. A. (2020). Environmental quality effects of income, energy prices and trade:

The role of renewable energy consumption in g-7 countries. *Science of The Total Environment*, 721, 137-813 [CrossRef]

[20] Ibañez M, Rosell JR, Rosell JI. (2005). *Tecnología solar*. Ediciones Mundi-Prensa. Recuperado de [CrossRef]

[21] Industries, R. S. (2020). Calentadores de agua solares de colector de tubo de vacío. [CrossRef]

[22] Jacobson, M. Z., Delucchi, M. A., Bauer, Z. A., Wang, J., Weiner, E., and Yachanin, A. S. (2017). 100 % clean and renewable wind, water, and sunlight all-sector energy roadmaps for 139 countries of the world. *Joule*, 1, 108–120 [CrossRef]

[23] Jesko, Z. (2008). Classification of solar collectors. *Engineering for rural development*. Recueprado de [CrossRef]

[24] Juantorea-Ugás J., Godínez-Mena, A., Hernandez-Galvez, A.C. (2017). Evaluación experimental de un calentador solar de agua de tubos evacuados. *Revista de Aplicación Científica y Técnica*. 3(8), 24-34. [CrossRef]

[25] Just Energy (2022). Energía térmica: qué es, cómo funciona y su impacto ambiental. [Mensaje en un blog], Recuperado de [Cross-Ref]

[26] Kalogirou, S. A. (2014). Chapter 3 - solar energy collectors. *Solar Energy Engineering (Second Edition)*, 125–220. Academic Press, Boston [CrossRef]

[27] Kalaiselvam, S. y Parameshwaran, R. (2014). Chapter 6 - Thermochemical Energy Storage. *Thermal Energy Storage Technologies for*

Sustainability, 127-144. [CrossRef]

- [28] Kannan, N. and Vakeesan, D. (2016). Solar energy for future world: - areview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1092–1105. [CrossRef]
- [29] Kyekyere, E., Ndiritu, H., Hawi, M., y Mwambe, P. (2021). Performance of water in glass evacuated tube solar water heater under kenya climatic condition. *Computational Water, Energy, and Environmental Engineering*, 10, 37–48 [CrossRef]
- [30] Lozano, M. (2019). Colectores solares térmicos. *Departamento de Ingeniería Mecánica - Universidad de Zaragoza*. Recuperado de [CrossRef]
- [31] Lucas Witmer. (2017). Energy Balance in Flat-Plate Collectorsy. *Department of Energy and Environmental Engineering, College of Earth and Mineral Sciences, The Pennsylvania State Universit*. Recuperado de [CrossRef]
- [32] Martinez-Gracia, A., Arauzo, I., Uche, U. (2019). Capítulo 5 - Disponibilidad de energía solar. *Producción de hidrógeno solar Procesos, Sistemas y Tecnologías*, 113-149 [CrossRef]
- [33] Mao, C., Li, M., Li, N., Shan, M., y Yanga, X. (2019). Mathematical model development and optimal design of the horizontal all-glass evacuated tube solar collectors integrated with bottom mirror reflectors for solar energy harvesting. *Applied Energy*, 238, 54–68 [CrossRef]
- [34] Ndiaye, D. (2015). Simplified model for dynamic simulation of solar systems with evacuated tube collector. *Procedia Engineering*,

11, 1250–1257. [CrossRef]

- [35] Perpiñan-Lamigueiro, O. (2018). Energía solar fotovoltaica. Recuperado de [CrossRef]
- [36] Pinho, João Tavares et al. (2008). Sistemas híbridos. Soluções energéticas para a Amazônia. Ministerio de Minas e Energía, Brasília. Recuperado de [CrossRef]
- [37] Poveda-Burgos, G., Ruiz-Molina, K., y González-Ruiz, J. (2017). Desarrollo de energías renovables en el ecuador del siglo xxi, optimización de recursos económicos y conservación del medio ambiente. *Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana*, 12. [CrossRef]
- [38] Rios, J. (2021). Evaluación de la eficiencia de un colector solar con tubos al vacío para el precalentamiento de agua para la cocción de alimentos. Tesis de maestría. Universidad Internacional SEK. [CrossRef]
- [39] Saidi, K. and Omri, A. (2020). The impact of renewable energy on carbon emissions and economic growth in 15 major renewable energy-consuming countries. *Environmental Research*, 186, 10956 [CrossRef]
- [40] Sanca, M. (2011). Tipos de investigación científica. *Rev. Act. Clin. Med [online]*, 12, 621–624 [CrossRef]
- [41] Sassine, E. (2016). Posicionamiento óptimo de los paneles solares para Beirut. *In 7th International Renewable Energy Congress (IREC)*, 1-5 [CrossRef]

- [42] Schuster, C. S. (2020). The quest for the optimum angular-tilt of terrestrial solar panels or their angle-resolved annual insolation. *Renewable Energy*, 152, 1186–1191 [CrossRef]
- [43] Shamshirgaran, S. R., Al-Kayiem, H. H., Sharma, K. V., y Ghasemi, M. (2020). State of the Art of Techno-Economics of Nanofluid-Laden Flat-Plate Solar Collectors for Sustainable Accomplishment. *Sustainability*, 12(21), 9119. [CrossRef]
- [44] Shein, EV y Mady, AY (2016). Evaluación de los parámetros térmicos del suelo por método directo y modelos matemáticos. *Revista de Ciencias del Suelo y Gestión Ambiental*, 7(10), 166-172.[CrossRef]
- [45] Skerlic, J., Nikolic, D., Cvetkovic, D., y Miškovic, A. (2018). Optimal position of solar collectors: A review. *Applied Engineering Letters*, 3(4), 129–134. [CrossRef]
- [46] Struckmann, F. (2008). Analysis of a flat-plate solar collector. *Project report, Dept. of Energy Sciences, Faculty of Engineering, Lund University, Box 118, 22100 Lund, Sweden. 2008 MVK160 Heat and Mass Transport* [CrossRef]
- [47] Siuta-Ochoa, A., Cholewa, T., y Dopieralska-Howoruszko, K. (2021). Experimental studies of thermal performance of an evacuated tube heat pipe solar collector in polish climatic conditions. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 14319–14328. [CrossRef]
- [48] Tara Energy (2022). ¿Qué es la energía térmica y cómo la aprovechamos?. [Mensaje en un blog], Recuperado de [CrossRef]

- [49] Vieira da Rosa, A. y Ordóñez, J. (2022). Capítulo 12 - Radiación solar. *Fundamentos de Procesos de Energías Renovables (Cuarta edición)*, 519-576. [CrossRef]
- [50] Widén, J. y Munkhammar, J. (2019). Solar Radiation Theory. *Publicaciones de la Universidad de Uppsala, 1*, 50 [CrossRef]
- [51] Yadav, M. y Saikhedkar, N. (2017). Simulation Modelling For the Performance of Evacuated Tube Solar Collector. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 6(4), 5634–5642. [CrossRef]

Appendices

Anexo 1: Prueba de normalidad de las temperaturas de salida 1 con los ángulos de orientación

Temperatura de salida 1 con 30° de orientación

Método	Variable	Estadístico	p.valor	Decisión
Shapiro-Wilk normality test	Tf10	0,912	0,051	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf20	0,913	0,054	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf30	0,914	0,058	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf40	0,916	0,061	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf50	0,917	0,065	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf60	0,919	0,072	NO rechazo Ho

Temperatura de salida 1 con 60° de orientación

Método	Variable	Estadístico	p.valor	Decisión
Shapiro-Wilk normality test	Tf10	0,912	0,052	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf20	0,914	0,058	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf30	0,916	0,063	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf40	0,917	0,067	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf50	0,919	0,073	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf60	0,920	0,078	NO rechazo Ho

Temperatura de salida 1 con 90° de orientación

Método	Variable	Estadístico	p.valor	Decisión
Shapiro-Wilk normality test	Tf10	0,913	0,054	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf20	0,915	0,060	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf30	0,917	0,065	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf40	0,918	0,070	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf50	0,920	0,076	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf60	0,921	0,080	NO rechazo Ho

Anexo 2: Prueba de normalidad de las temperaturas de salida 2 con los ángulos de orientación

Temperatura de salida 2 con 0° de orientación

Método	Variable	Estadístico	p.valor	Decisión
Shapiro-Wilk normality test	Tf10	0,952	0,342	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf20	0,952	0,343	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf30	0,952	0,343	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf40	0,952	0,344	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf50	0,952	0,346	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf60	0,952	0,349	NO rechazo Ho

Anexo 3: Prueba de normalidad de las temperaturas de salida 2 con los ángulos de orientación

Temperatura de salida 2 con 30° de orientación

Método	Variable	Estadístico	p.valor	Decisión
Shapiro-Wilk normality test	Tf10	0,912	0,052	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf20	0,913	0,055	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf30	0,915	0,059	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf40	0,916	0,062	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf50	0,917	0,066	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf60	0,919	0,072	NO rechazo Ho

Temperatura de salida 2 con 60° de orientación

Método	Variable	Estadístico	p.valor	Decisión
Shapiro-Wilk normality test	Tf10	0,912	0,053	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf20	0,914	0,058	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf30	0,916	0,064	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf40	0,917	0,067	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf50	0,919	0,074	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf60	0,921	0,078	NO rechazo Ho

Temperatura de salida 2 con 90° de orientación

Método	Variable	Estadístico	p.valor	Decisión
Shapiro-Wilk normality test	Tf10	0,952	0,348	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf20	0,953	0,355	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf30	0,953	0,361	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf40	0,953	0,367	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf50	0,954	0,370	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf60	0,954	0,373	NO rechazo Ho

Anexo 4: Prueba de normalidad de las temperaturas de salida 3 con los ángulos de orientación

Temperatura de salida 3 con 0° de orientación

Método	Variable	Estadístico	p.valor	Decisión
Shapiro-Wilk normality test	Tf10	0,942	0,221	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf20	0,942	0,223	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf30	0,943	0,226	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf40	0,943	0,231	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf50	0,944	0,236	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf60	0,944	0,242	NO rechazo Ho

Temperatura de salida 3 con 30° de orientación

Método	Variable	Estadístico	p.valor	Decisión
Shapiro-Wilk normality test	Tf10	0,942	0,218	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf20	0,942	0,215	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf30	0,942	0,214	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf40	0,942	0,216	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf50	0,942	0,219	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf60	0,942	0,223	NO rechazo Ho

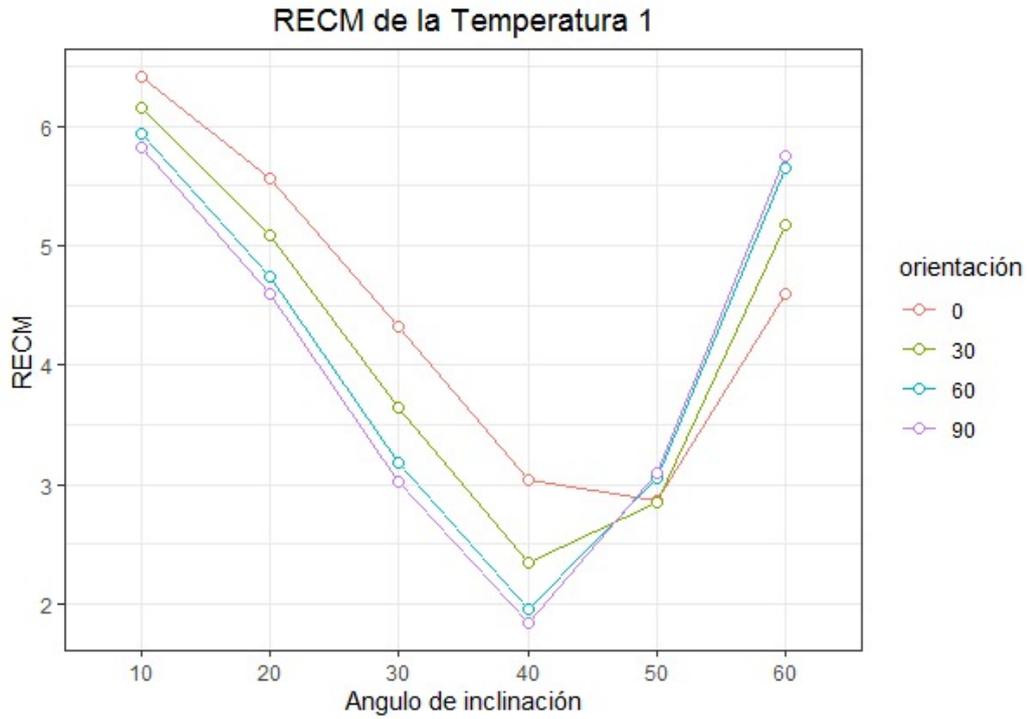
Temperatura de salida 3 con 60° de orientación

Método	Variable	Estadístico	p.valor	Decisión
Shapiro-Wilk normality test	Tf10	0,942	0,213	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf20	0,941	0,209	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf30	0,941	0,207	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf40	0,941	0,206	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf50	0,941	0,211	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf60	0,941	0,211	NO rechazo Ho

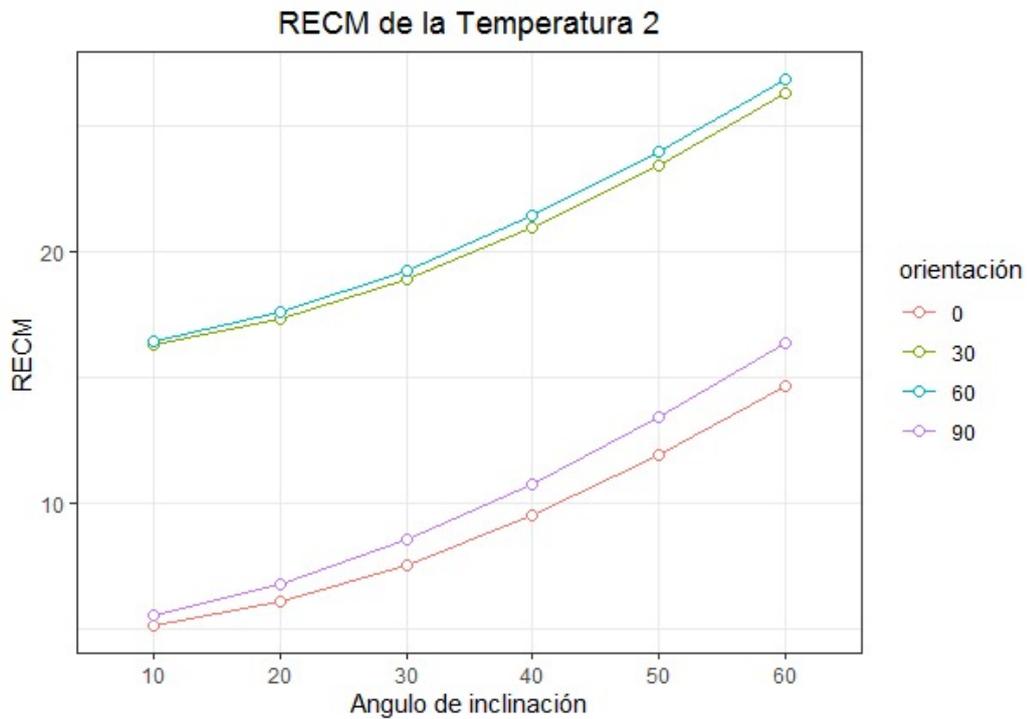
Temperatura de salida 3 con 90° de orientación

Método	Variable	Estadístico	p.valor	Decisión
Shapiro-Wilk normality test	Tf10	0,941	0,211	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf20	0,941	0,206	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf30	0,940	0,202	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf40	0,941	0,205	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf50	0,941	0,207	NO rechazo Ho
Shapiro-Wilk normality test	Tf60	0,941	0,207	NO rechazo Ho

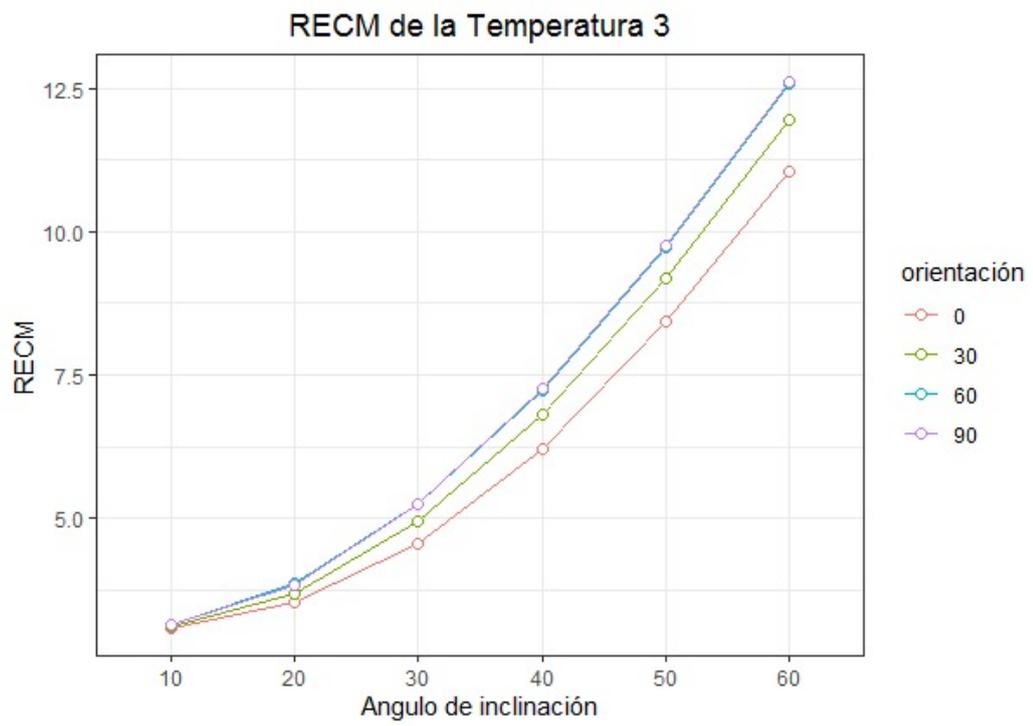
Anexo 5: Raíz del error cuadrático medio (RECM) de la Temperatura



Raíz del error cuadrático medio (RECM) de la Temperatura 1



Raíz del error cuadrático medio (RECM) de la Temperatura 2



Raíz del error cuadrático medio (RECM) de la Temperatura 3

Anexo 6: Código de la simulación numérica

```
1 #directorio
2
3 setwd("C:/Users/LENOVO/OneDrive - Universidad Nacional de Chimborazo
4     /Estudios/Tesis/resultados en R")
5 source('funciones_auxiliares.R')
6
7 # Datos de entrada-----
8 dtemperatura <- read.xlsx("Copia de TEMPERATURA SPER.xlsx ",
9     sheetName = 'Temperatura')
10
11 tentrada <- dtemperatura[1:22,] %>% mutate(HORA = hour(Time),
12     MINUTO = minute(Time)) %>% data.frame()
13 tsalida <- dtemperatura[23:44,] %>% data.frame
14 drad <- read.xlsx('Copia de TEMPERATURA SPER.xlsx',
15     sheetName = 'RADIACIÓN', startRow = 2)
16 dbase <- merge(tentrada, drad,
17     by = c('HORA', 'MINUTO'), all.x = T) %>% arrange(Time)
18
19 #Datos del colector solar-----
20 Ntubos <- 20 #Numero de tubos
21 Ltubos <- 1.764 #Longitud de tubos rior del tubo en m
22 D <- 0.06 #Diametro externo de tubo
23 Di <- 0.049 # Diametro interno del tubo
24 mt <- 0.03 # Kg/s
25 Cp <- 4180 # J/Kg°C
26
27
28 #####
29 #transformador a radianes
30 rad <- pi/180
31
32 #transformador de grados
33 gra <- 180/pi
34
35 # Angulos de colector salar de tubos
36 B <- c(10, 20, 30, 40, 50, 60) # grados
37
38 # Temperatura ambiente
39 Ta <- select(dbase, temperatura.ambiente)
40
41 # Temperatura de inicial o de entrada al modelo
42
43 Tin <- select(tentrada, T1)
44
45 #Temperatura de salida
46
47 ts1 <- select(tsalida, T1)
48
49 # Tiempo de analisis en minutos
50
51 hm <- hms(hours = dbase$HORA, minutes = dbase$MINUTO)
52 hmf <- hms(hours = hour(tsalida$Time),
53     minutes = minute(tsalida$Time))
```

```

54 # Radiacion difusa
55 Idif <- select(dbase, DIFUSA)
56
57 # Angulo de declinacion del sol el 21 de mayo del 2014
58 da <- 141 # Numero de dia del estudio
59 del <- (23.45 * sin((360*rad)*((284+da)/365)))
60
61 # Angulo de hora solar
62 w <- angulo_solar(hm)
63 cbind.data.frame(hm,w)
64 #Angulo de incidencia del
65 teta <- angulo_incidenciasol(w, B, del,
66     fi = -1.655789, ga = 90)
67 gra * acos(sin(del*rad)*sin(-1.655789*rad)*
68     cos(20*rad)-sin(del*rad)*sin(-1.655789*rad)
69     *cos(90*rad)+cos(del*rad)*cos(-1.655789*rad)
70     *cos(20*rad) *cos(-7.25*rad)+cos(del*rad)
71     *sin(-1.655789*rad) *sin(20*rad) *cos(90*rad)
72     *cos(-7.25*rad)+cos(del*rad)*sin(20*rad)
73     *sin(90*rad)*sin(-7.25*rad))
74
75 # Angulo cenital
76 tetaz <- angulo_cenital(w, del, fi = -1.655789)
77 gra * acos(cos(-1.655789*rad)*cos(del*rad)*cos(-7.25*rad)
78     +sin(-1.655789*rad)*sin(del*rad))
79 # Radiacion directa
80 Idir <- (select(dbase, Directa = GLOBAL)
81     - select(dbase, DIFUSA))/cos(tetaz*rad)

```



```

83 # Irradiancia global
84 Ig <- select(dbase, GLOBAL)
85
86 # Radiacion reflejada donde p es la reflectancia
87 p <- 0.23
88 Iref <- p * Ig
89
90 # modelo difuso Isotropico
91
92 Rb <- radb(teta, tetaz)
93
94 Rd <- radD(B)
95
96 Rr <- radr(B)
97
98 Itb <- ITang(Idir, Rb)
99
100 #      1*64 64*4  1*64 1*4  1*64  1*4
101 IT <- as.matrix(Itb) + as.matrix(Idif)%*%as.matrix(Rd)
102     + as.matrix(Iref)%*%as.matrix(Rr)

```

```

104 # Area total absorvente de tubos
105 A_s <- (D*pi*Ltubos/2) * Ntubos
106 A_s
107
108 # Temperatura media
109 Ti <- data.frame(Tin + ts1)/2
110
111 # Factor de eficiencia n
112 ni <- eficiencia(IT, FrTA = 0.8, FrUL = 2.5,
113               FrULt = 0.007, Ti, Ta)
114
115 # Calor util
116 Qu <- calor_util(A_s, IT, tint = Tin, Ti, FrTA = 0.8,
117               FrUL = 2.5, FrULt = 0.007)

119 # Temperatura del fluido saliente
120 tol <- tempout(Qu, Tin, mt, Cp)
121
122 e90 <- error(Texp = tol, Tobs = ts1)
123
124 ##### Gráfico de temperatura de salida
125
126 pcolor <- c('red', 'cyan', 'blue', 'green', 'orange',
127            'purple', 'black')
128
129 tan1 <- data.frame(Texp = ts1, tol) %>%
130   gather(key = 'T °C', value = 'Temp') %>%
131   cbind.data.frame(h = rep(tsalida$Time,
132   time = ncol(ts1) + ncol(tol)))
133
134 a90 <- ggplot(tan1, aes(x = h, y = Temp)) +
135   geom_line(aes(color = `T °C`)) +
136   scale_color_manual(values = pcolor)+
137   theme_bw() + ggtitle(TeX("Simulación de temperatura
138   final de agua:  $\gamma = 90^\circ$ ")) +
139   theme(plot.title = element_text(hjust = 0.5,
140   size = rel(1.5))) + xlab('Hora')
141   + ylab('Temperatura final (°C)')

```

Anexo 7: Datos de la temperatura 1 del agua obtenidos mediante la simulación

Temperatura 1

Ángulo	Inclinación					
Orientación	10°	20°	30°	40°	50°	60°
0°	51.485	50.568	49.124	47.224	44.906	42.259
0°	48.909	47.982	46.521	44.600	42.255	39.578
0°	48.035	47.124	45.688	43.798	41.493	38.861
0°	48.154	47.220	45.748	43.812	41.449	38.751
0°	49.338	48.409	46.945	45.019	42.669	39.986
0°	49.165	48.224	46.742	44.792	42.413	39.697
0°	50.154	49.205	47.710	45.744	43.345	40.607
0°	49.925	48.986	47.508	45.563	43.190	40.481
0°	49.446	48.534	47.096	45.205	42.898	40.264
0°	50.203	49.284	47.836	45.933	43.609	40.957
0°	50.842	49.906	48.431	46.491	44.124	41.402
0°	51.697	50.739	49.279	47.333	44.958	42.228
0°	52.572	51.620	50.170	48.238	45.880	43.169
0°	53.768	52.821	51.349	49.387	46.993	44.240
0°	54.410	53.459	51.980	50.010	47.605	44.840
0°	54.743	53.801	52.335	50.381	47.997	45.256
0°	55.909	54.937	53.425	51.411	48.952	46.125
0°	57.093	56.112	54.585	52.550	50.068	47.213
0°	58.059	57.077	55.551	53.517	51.035	48.181
0°	58.615	57.633	56.107	54.073	51.591	48.737

0°	59.721	58.730	57.187	55.130	52.620	49.734
0°	61.046	60.051	58.501	56.436	53.916	51.018
30°	51.029	49.695	47.871	45.629	43.007	40.095
30°	48.467	47.137	45.330	43.063	40.430	37.503
30°	47.620	46.349	44.573	42.382	39.812	36.934
30°	47.747	46.464	44.682	42.436	39.821	36.891
30°	48.972	47.715	45.942	43.746	41.146	38.251
30°	48.813	47.559	45.803	43.579	40.985	38.054
30°	49.818	48.574	46.822	44.600	42.003	39.067
30°	49.612	48.420	46.688	44.529	41.961	39.077
30°	49.162	48.022	46.376	44.277	41.799	39.014
30°	49.936	48.807	47.169	45.074	42.598	39.812
30°	50.608	49.457	47.826	45.711	43.188	40.369
30°	51.482	50.367	48.731	46.629	44.137	41.309
30°	52.378	51.290	49.685	47.617	45.162	42.354
30°	53.610	52.525	50.934	48.854	46.361	43.530
30°	54.271	53.202	51.624	49.554	47.071	44.246
30°	54.626	53.585	52.021	49.989	47.527	44.746
30°	55.808	54.755	53.162	51.087	48.567	45.700
30°	57.012	55.989	54.401	52.306	49.782	46.907
30°	57.998	56.976	55.409	53.334	50.832	47.957
30°	58.554	57.552	55.985	53.931	51.428	48.554
30°	59.700	58.689	57.126	55.069	52.559	49.673
30°	61.046	60.051	58.522	56.457	53.957	51.059
60°	50.668	49.049	46.978	44.490	41.659	38.595

60°	48.121	46.541	44.465	41.987	39.162	36.081
60°	47.298	45.783	43.779	41.380	38.622	35.612
60°	47.437	45.922	43.907	41.466	38.677	35.631
60°	48.663	47.194	45.228	42.840	40.104	37.074
60°	48.519	47.070	45.118	42.738	39.988	36.939
60°	49.542	48.120	46.191	43.810	41.076	38.041
60°	49.359	47.991	46.122	43.807	41.122	38.140
60°	48.935	47.644	45.865	43.633	41.061	38.180
60°	49.726	48.464	46.711	44.502	41.930	39.049
60°	50.393	49.146	47.378	45.165	42.584	39.668
60°	51.287	50.074	48.340	46.159	43.589	40.683
60°	52.203	51.038	49.355	47.209	44.677	41.830
60°	53.452	52.308	50.638	48.499	45.947	43.076
60°	54.133	53.024	51.386	49.257	46.734	43.870
60°	54.508	53.409	51.805	49.734	47.252	44.433
60°	55.707	54.613	53.000	50.904	48.365	45.477
60°	56.930	55.867	54.279	52.183	49.660	46.764
60°	57.916	56.894	55.327	53.253	50.730	47.876
60°	58.493	57.471	55.924	53.850	51.347	48.493
60°	59.639	58.648	57.105	55.069	52.559	49.694
60°	61.005	60.051	58.542	56.518	54.038	51.181
90°	50.497	48.821	46.674	44.129	41.260	38.139
90°	47.948	46.291	44.177	41.641	38.777	35.658
90°	47.128	45.556	43.515	41.059	38.263	35.234
90°	47.282	45.708	43.655	41.176	38.348	35.263

90°	48.509	47.001	44.997	42.570	39.795	36.746
90°	48.383	46.875	44.903	42.484	39.694	36.646
90°	49.404	47.942	45.993	43.593	40.819	37.765
90°	49.222	47.835	45.927	43.592	40.888	37.886
90°	48.821	47.492	45.694	43.463	40.871	37.972
90°	49.611	48.330	46.558	44.349	41.759	38.878
90°	50.277	49.029	47.261	45.029	42.428	39.531
90°	51.189	49.956	48.222	46.042	43.472	40.565
90°	52.106	50.941	49.258	47.132	44.599	41.753
90°	53.353	52.209	50.559	48.420	45.888	43.017
90°	54.054	52.944	51.307	49.218	46.694	43.850
90°	54.410	53.350	51.766	49.695	47.233	44.433
90	55.626	54.573	52.980	50.884	48.365	45.498
90°	56.848	55.826	54.258	52.204	49.680	46.825
90°	57.835	56.854	55.327	53.273	50.791	47.937
90°	58.411	57.451	55.924	53.890	51.428	48.574
90°	59.578	58.628	57.126	55.130	52.661	49.816
90°	60.944	60.051	58.583	56.600	54.161	51.324

Anexo 8: Datos de la temperatura 2 del agua obtenidos mediante la simulación

Temperatura 2

Ángulo	Inclinación					
Orientación	10°	20°	30°	40°	50°	60°
0°	51.422	50.506	49.061	47.162	44.844	42.197
0°	52.072	51.145	49.684	47.763	45.418	42.741
0°	52.508	51.597	50.160	48.271	45.966	43.334
0°	53.939	53.004	51.532	49.596	47.233	44.536
0°	55.017	54.088	52.624	50.698	48.348	45.665
0°	56.154	55.213	53.730	51.781	49.402	46.686
0°	57.642	56.694	55.199	53.233	50.834	48.095
0°	58.419	57.481	56.002	54.058	51.685	48.976
0°	58.845	57.933	56.495	54.605	52.297	49.663
0°	60.302	59.383	57.935	56.032	53.708	51.056
0°	61.847	60.911	59.436	57.496	55.129	52.408
0°	63.006	62.048	60.587	58.642	56.267	53.537
0°	64.180	63.228	61.779	59.847	57.489	54.778
0°	65.669	64.722	63.250	61.288	58.894	56.142
0°	66.917	65.966	64.488	62.517	60.112	57.347
0°	67.851	66.908	65.442	63.488	61.104	58.363
0°	69.717	68.744	67.233	65.218	62.759	59.933
0°	71.201	70.219	68.692	66.658	64.175	61.321
0°	72.466	71.485	69.959	67.925	65.443	62.589
0°	73.723	72.742	71.215	69.181	66.699	63.845

0°	75.532	74.541	72.998	70.941	68.431	65.545
0°	76.959	75.964	74.414	72.349	69.829	66.931
30°	50.866	49.532	47.708	45.467	42.845	39.932
30°	48.330	47.000	45.193	42.926	40.293	37.366
30°	47.492	46.222	44.445	42.254	39.684	36.807
30°	47.631	46.348	44.566	42.320	39.705	36.775
30°	48.851	47.594	45.821	43.625	41.025	38.130
30°	48.701	47.448	45.691	43.468	40.874	37.943
30°	49.707	48.462	46.711	44.488	41.892	38.956
30°	49.507	48.315	46.583	44.424	41.856	38.971
30°	49.061	47.922	46.275	44.176	41.699	38.913
30°	49.835	48.706	47.068	44.973	42.497	39.711
30°	50.513	49.363	47.732	45.617	43.094	40.275
30°	51.391	50.276	48.640	46.537	44.046	41.218
30°	52.286	51.198	49.593	47.525	45.071	42.263
30°	53.511	52.426	50.836	48.755	46.263	43.431
30°	54.179	53.109	51.531	49.462	46.978	44.154
30°	54.533	53.492	51.928	49.896	47.434	44.654
30°	55.715	54.662	53.069	50.994	48.475	45.607
30°	56.919	55.896	54.309	52.213	49.689	46.814
30°	57.905	56.883	55.316	53.242	50.739	47.865
30°	58.462	57.460	55.894	53.839	51.337	48.462
30°	59.612	58.600	57.037	54.980	52.470	49.584
30°	60.959	59.964	58.435	56.370	53.870	50.972
60°	50.506	48.887	46.816	44.327	41.496	38.432

60°	47.984	46.404	44.328	41.850	39.024	35.944
60°	47.171	45.655	43.652	41.253	38.494	35.484
60°	47.321	45.806	43.791	41.351	38.561	35.515
60°	48.542	47.073	45.107	42.719	39.983	36.953
60°	48.408	46.959	45.007	42.627	39.876	36.828
60°	49.431	48.008	46.079	43.699	40.965	37.930
60°	49.254	47.886	46.017	43.702	41.017	38.035
60°	48.834	47.543	45.764	43.532	40.960	38.080
60°	49.625	48.363	46.610	44.401	41.830	38.948
60°	50.299	49.051	47.283	45.071	42.489	39.573
60°	51.195	49.982	48.248	46.068	43.498	40.592
60°	52.111	50.946	49.263	47.118	44.586	41.739
60°	53.353	52.209	50.539	48.400	45.848	42.977
60°	54.040	52.931	51.294	49.165	46.641	43.777
60°	54.415	53.316	51.713	49.642	47.160	44.340
60°	55.614	54.521	52.907	50.812	48.272	45.385
60°	56.837	55.774	54.186	52.090	49.567	46.672
60°	57.824	56.802	55.235	53.160	50.637	47.783
60°	58.401	57.379	55.833	53.758	51.255	48.401
60°	59.551	58.559	57.016	54.980	52.470	49.605
60°	60.918	59.964	58.455	56.431	53.951	51.094
90°	50.532	48.857	46.710	44.164	41.295	38.174
90°	51.213	49.556	47.441	44.905	42.041	38.923
90°	51.704	50.132	48.091	45.635	42.838	39.810
90°	53.171	51.597	49.543	47.064	44.236	41.151

90°	54.293	52.785	50.781	48.354	45.579	42.530
90°	55.478	53.970	51.998	49.579	46.789	43.741
90°	56.999	55.537	53.588	51.188	48.414	45.360
90°	57.824	56.437	54.529	52.194	49.490	46.488
90°	58.329	57.000	55.202	52.970	50.379	47.480
90°	59.819	58.538	56.766	54.557	51.966	49.085
90°	61.392	60.144	58.377	56.144	53.544	50.647
90°	62.609	61.377	59.643	57.462	54.892	51.986
90°	63.825	62.660	60.977	58.851	56.319	53.472
90°	65.367	64.222	62.573	60.433	57.901	55.030
90°	66.673	65.563	63.926	61.837	59.313	56.469
90°	67.631	66.571	64.987	62.916	60.454	57.654
90°	69.548	68.495	66.902	64.806	62.287	59.420
90°	71.071	70.049	68.481	66.427	63.903	61.048
90°	72.359	71.378	69.852	67.797	65.315	62.461
90°	73.637	72.677	71.150	69.116	66.654	63.800
90°	75.507	74.557	73.054	71.059	68.590	65.745
90°	76.974	76.080	74.613	72.630	70.191	67.354

Anexo 9: Datos de la temperatura 3 del agua obtenidos mediante la simulación

Temperatura 3

Ángulo	Inclinación					
Orientación	10°	20°	30°	40°	50°	60°
0°	72.338	71.422	69.977	68.078	65.759	63.113
0°	65.830	64.903	63.442	61.521	59.176	56.499
0°	63.141	62.229	60.793	58.904	56.598	53.967
0°	62.750	61.816	60.344	58.408	56.045	53.347
0°	63.642	62.713	61.249	59.323	56.973	54.290
0°	64.573	63.632	62.150	60.200	57.821	55.105
0°	65.263	64.315	62.820	60.854	58.455	55.716
0°	66.753	65.815	64.336	62.391	60.018	57.310
0°	67.980	67.068	65.630	63.740	61.432	58.798
0°	69.950	69.032	67.584	65.680	63.357	60.705
0°	69.579	68.643	67.168	65.228	62.861	60.139
0°	70.927	69.968	68.508	66.562	64.188	61.458
0°	71.589	70.637	69.187	67.255	64.898	62.187
0°	72.893	71.946	70.473	68.512	66.118	63.365
0°	74.651	73.700	72.221	70.251	67.846	65.081
0°	75.685	74.742	73.276	71.323	68.939	66.198
0°	76.957	75.985	74.473	72.458	70.000	67.173
0°	78.326	77.344	75.818	73.783	71.301	68.446
0°	81.201	80.220	78.694	76.660	74.178	71.324
0°	81.447	80.466	78.940	76.906	74.423	71.569

0°	81.960	80.969	79.426	77.370	74.860	71.974
0°	83.885	82.889	81.340	79.275	76.755	73.857
30°	71.882	70.548	68.724	66.482	63.860	60.948
30°	65.388	64.058	62.251	59.984	57.351	54.424
30°	62.725	61.455	59.678	57.487	54.917	52.040
30°	62.343	61.060	59.278	57.032	54.417	51.487
30°	63.276	62.019	60.246	58.050	55.449	52.555
30°	64.221	62.967	61.211	58.988	56.393	53.462
30°	64.928	63.683	61.931	59.709	57.113	54.177
30°	66.441	65.249	63.516	61.357	58.789	55.905
30°	67.696	66.557	64.910	62.811	60.334	57.548
30°	69.683	68.555	66.916	64.822	62.346	59.560
30°	69.345	68.194	66.563	64.448	61.925	59.106
30°	70.711	69.596	67.960	65.858	63.366	60.538
30°	71.395	70.307	68.702	66.634	64.179	61.372
30°	72.735	71.650	70.059	67.979	65.486	62.655
30°	74.512	73.443	71.865	69.795	67.311	64.487
30°	75.567	74.527	72.963	70.931	68.468	65.688
30°	76.856	75.803	74.210	72.134	69.615	66.748
30°	78.244	77.222	75.634	73.538	71.015	68.140
30°	81.140	80.118	78.551	76.477	73.974	71.100
30°	81.386	80.385	78.818	76.763	74.261	71.386
30°	81.940	80.929	79.365	77.309	74.799	71.913
30°	83.885	82.889	81.360	79.295	76.795	73.897
60°	71.521	69.902	67.831	65.343	62.512	59.448

60°	65.042	63.462	61.386	58.908	56.083	53.002
60°	62.404	60.888	58.885	56.486	53.727	50.717
60°	62.033	60.518	58.503	56.062	53.273	50.227
60°	62.967	61.498	59.532	57.144	54.408	51.378
60°	63.927	62.478	60.526	58.146	55.396	52.347
60°	64.651	63.229	61.300	58.920	56.185	53.151
60°	66.187	64.820	62.951	60.635	57.950	54.968
60°	67.469	66.178	64.399	62.167	59.595	56.715
60°	69.474	68.212	66.459	64.250	61.678	58.797
60°	69.131	67.883	66.115	63.903	61.321	58.405
60°	70.516	69.303	67.569	65.388	62.818	59.912
60°	71.220	70.055	68.372	66.227	63.694	60.848
60°	72.577	71.433	69.763	67.624	65.072	62.201
60°	74.374	73.264	71.627	69.498	66.975	64.111
60°	75.450	74.350	72.747	70.676	68.194	65.374
60°	76.755	75.661	74.048	71.952	69.413	66.525
60°	78.163	77.100	75.512	73.416	70.892	67.997
60°	81.059	80.037	78.470	76.395	73.872	71.018
60°	81.325	80.303	78.757	76.682	74.179	71.325
60°	81.879	80.888	79.345	77.309	74.799	71.933
60°	83.844	82.889	81.381	79.357	76.877	74.020
90°	71.396	69.720	67.573	65.028	62.159	59.038
90°	64.945	63.288	61.173	58.637	55.774	52.655
90°	62.322	60.750	58.709	56.253	53.456	50.428
90°	61.977	60.403	58.349	55.870	53.042	49.957

90°	62.906	61.399	59.394	56.967	54.193	51.144
90°	63.888	62.380	60.408	57.989	55.200	52.151
90°	64.610	63.148	61.200	58.800	56.026	52.971
90°	66.142	64.755	62.847	60.512	57.808	54.806
90°	67.447	66.118	64.321	62.089	59.498	56.598
90°	69.445	68.164	66.392	64.183	61.593	58.711
90°	69.109	67.861	66.093	63.861	61.260	58.363
90°	70.519	69.287	67.553	65.372	62.802	59.896
90°	71.228	70.063	68.380	66.254	63.722	60.875
90°	72.579	71.434	69.785	67.645	65.113	62.242
90°	74.390	73.281	71.644	69.554	67.031	64.187
90°	75.449	74.389	72.805	70.734	68.271	65.472
90°	76.770	75.717	74.124	72.028	69.509	66.642
90°	78.184	77.162	75.594	73.539	71.016	68.161
90°	81.077	80.095	78.569	76.515	74.033	71.179
90°	81.349	80.388	78.862	76.828	74.366	71.511
90°	81.922	80.971	79.469	77.474	75.004	72.159
90°	83.886	82.993	81.525	79.542	77.103	74.267

Anexo 10: Base de datos de las temperaturas obtenidas del colector

Date	Time	T1	T2	T3
21/05/2014	11:01:25	29.6	29.7	50.5
21/05/2014	11:04:25	26.8	30.1	43.8
21/05/2014	11:07:25	26.3	30.9	41.5
21/05/2014	11:10:25	25.9	31.8	40.6
21/05/2014	11:13:25	27.2	33	41.6
21/05/2014	11:16:25	26.8	33.9	42.3
21/05/2014	11:19:25	27.6	35.2	42.8
21/05/2014	11:22:25	27.6	36.2	44.5
21/05/2014	11:25:25	27.7	37.2	46.3
21/05/2014	11:28:25	28.3	38.5	48.1
21/05/2014	11:31:25	28.6	39.7	47.4
21/05/2014	11:34:25	29.4	40.8	48.7
21/05/2014	11:37:25	30.4	42.1	49.5
21/05/2014	11:40:25	31.3	43.3	50.5
21/05/2014	11:43:25	31.8	44.4	52.1
21/05/2014	11:45:25	32.3	45.5	53.3
21/05/2014	11:48:25	32.8	46.7	53.9
21/05/2014	11:51:25	33.7	47.9	55
21/05/2014	11:53:25	34.6	49.1	57.8
21/05/2014	11:54:25	35.1	50.3	58
21/05/2014	11:57:25	35.7	51.6	58
21/05/2014	12:00:25	36.9	52.9	59.8
21/05/2014	12:03:25	37.8	54.2	61.9
21/05/2014	12:06:25	38.3	55.5	62.7
21/05/2014	12:09:25	39.2	56.8	63.7
21/05/2014	12:12:25	40.2	58	65.3
21/05/2014	12:15:25	41.1	59.3	65.1
21/05/2014	12:18:25	42	60.6	66.7
21/05/2014	12:21:25	42.8	61.9	67.1
21/05/2014	12:24:25	43.5	63	67.5
21/05/2014	12:27:25	44.4	64.4	69.4
21/05/2014	12:30:25	45	65.7	69.7
21/05/2014	12:33:25	46.3	67.3	71.3
21/05/2014	12:36:25	47.8	68.8	74.1
21/05/2014	12:39:25	48.6	69.9	75.9
21/05/2014	12:42:25	49.1	71.4	75.7
21/05/2014	12:45:25	50.1	72.4	76.1
21/05/2014	12:48:25	51.1	74	77.7
21/05/2014	12:51:25	51.9	75.5	78
21/05/2014	12:54:25	53	76.9	80.8
21/05/2014	12:57:25	54.2	78.4	82.7
21/05/2014	13:00:25	55	79.8	84.3
21/05/2014	13:03:25	55.9	81.1	84
21/05/2014	13:06:25	57.1	82.2	85.8

CELSO
 Certificado que la información entregada a la Srta. Nativia Sanchez
 Desde el GEAA de la ESPOCH
 GUILLERMO RECALDE
 MORENO
 Fecha: 2021.11.04
 17:02:28 -05'00'