

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

*Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniera
Ambiental e Ingeniero Ambiental*

TRABAJO EXPERIMENTAL:

**“MODELAMIENTO EN TRNSYS DE UN SISTEMA DE
COLECTORES SOLARES, DE PLACA PLANA Y TUBO AL
VACÍO, PARA LA OBTENCIÓN DE ACS EN LA CIUDAD DE
CUENCA, ECUADOR”**

AUTORES:

DOMÉNICA LARRIVA ARÉVALO
MARCO ANTONIO TORRES JARA

TUTOR:

ING. EDGAR ANTONIO BARRAGÁN ESCANDÓN, Ph.D

CUENCA - ECUADOR

2021

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Doménica Larriva Arévalo con documento de identificación N° 0105224018 y Marco Antonio Torres Jara con documento de identificación N° 0106391634, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: **“MODELAMIENTO EN TRNSYS DE UN SISTEMA DE COLECTORES SOLARES, DE PLACA PLANA Y TUBO AL VACÍO, PARA LA OBTENCIÓN DE ACS EN LA CIUDAD DE CUENCA, ECUADOR”**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniera Ambiental e Ingeniero Ambiental*, en la Universidad Politécnica Salesiana quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, noviembre de 2021.



Doménica Larriva Arévalo
C.I. 0105224018

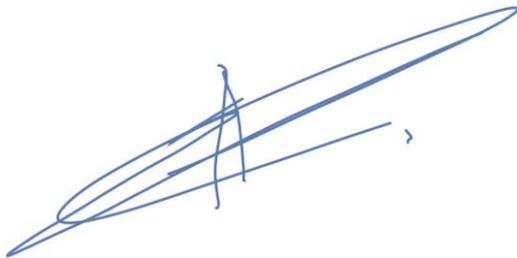


Marco Antonio Torres Jara
C.I. 0106391634

CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación:
“MODELAMIENTO EN TRNSYS DE UN SISTEMA DE COLECTORES SOLARES, DE PLACA PLANA Y TUBO AL VACÍO, PARA LA OBTENCIÓN DE ACS EN LA CIUDAD DE CUENCA, ECUADOR”, realizado por Doménica Larriva Arévalo y Marco Antonio Torres Jara, obteniendo el *Trabajo Experimental* que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, noviembre de 2021.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and lines, positioned diagonally across the page.

Ing. Edgar Antonio Barragán Escandón, PhD.

C.I. 0102516457

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Doménica Larriva Arévalo con documento de identificación N° 0105224018 y Marco Antonio Torres Jara con documento de identificación N° 0106391634, autores del trabajo de titulación: **“MODELAMIENTO EN TRNSYS DE UN SISTEMA DE COLECTORES SOLARES, DE PLACA PLANA Y TUBO AL VACÍO, PARA LA OBTENCIÓN DE ACS EN LA CIUDAD DE CUENCA, ECUADOR”**, certificamos que el total contenido del *Trabajo Experimental*, es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, noviembre de 2021.



Doménica Larriva Arévalo
C.I. 0105224018



Marco Antonio Torres Jara
C.I. 0106391634

DEDICATORIA

*Este logro les dedico a mis padres Marcelo y Anita;
a mis hermanos Marcelo, Analí y Gustavo;
a mis sobrinos Juan Mar, Emmanuel, Amirah y Tabata.*

Doménica Larriva Arévalo

A Dios, por darme la fortaleza y sabiduría para poder culminar con éxito este objetivo de vida.

A mi madre Patricia, que siempre ha estado a mi lado, dándome amor y apoyo incondicional para lograr cada uno de los objetivos en mi vida. El camino no ha sido fácil, la vida está llena de alegrías y tristezas, pero sin importar la distancia o en que parte del mundo estemos, siempre te llevaré en mi corazón.

A mis hermanos Gustavo, Mauricio y Gabriela por estar siempre pendientes de mí, apoyándome y brindándome sus consejos para superar las adversidades.

A mi sobrina Janis por ser la luz y alegría de la familia.

Marco Antonio Torres Jara

AGRADECIMIENTO

Terminar esta meta académica, ha tomado tiempo, esfuerzo y dedicación, pero gracias a personas muy importantes en mi vida, se ha vuelto más sencillo.

Primero le agradezco a Dios por regalarme la sabiduría y la inteligencia necesarias para cumplir este, uno de mis objetivos.

A mis padres, que con su esfuerzo han logrado hacer de mí una persona de bien, con debilidades y fortalezas, pero con objetivos y metas establecidas para continuar este camino; sobre todo les doy gracias por enseñarme que el pilar de mi vida siempre deberá ser Dios.

A mis hermanos, por su apoyo, ejemplo y amor que me han ayudado para alcanzar este logro, así mismo, a mis sobrinos por ser el impulso para culminar esta carrera universitaria y con el gran deseo de un día aplaudir también sus logros.

A Marco, por el apoyo, paciencia y amor que me ha brindado en este largo caminar de la vida universitaria.

Al Ing. Antonio Barragán, primero por la confianza al aceptar dirigir este trabajo, también, por el esfuerzo, ayuda y tiempo empleado, no solo en el desarrollo de este proyecto, sino también, en los conocimientos compartidos en las clases, de igual forma al Ing. Mateo Astudillo por los fundamentales y valiosos aportes a este trabajo.

Doménica Larriva Arévalo

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, por forjar este camino que empezó con mucho anhelo e ilusión, por ser el guía de este trayecto que ahora se ha convertido en un logro cumplido.

A mi madre Patricia, por ser el pilar fundamental de mi vida, que me ha inculcado valores para hacer de mí una mejor persona y capaz de cumplir todas las metas que me proponga. También a mis hermanos, no solamente por estar presentes aportando sus consejos y conocimientos a mi vida, sino por los innumerables momentos de felicidad que me han brindado.

Al Ingeniero Antonio Barragán, por confiar en nosotros desde el principio, con paciencia y dedicación para culminar con éxito este proyecto. Al Ing. Mateo Astudillo por brindarnos su ayuda y conocimiento que fueron un gran aporte en el desarrollo de esta tesis.

A Dome, por estar presente desde el principio, con amor y dedicación ahora culminamos el primero de varios logros. A mis amigos por compartir conmigo esta experiencia y estar siempre presentes.

Marco Antonio Torres Jara

RESUMEN

En este trabajo, se modeló un sistema de colectores solares, para la obtención de ACS, empleando TRNSYS (TraNsient SYstem Simulation), bajo las condiciones de operación en Cuenca, Ecuador. El tipo de investigación es cuantitativa y con un enfoque correlacional. Utilizando datos de una prueba en campo se elaboró una ficha técnica que permitió identificar las principales variables a aplicar en el modelo. Los datos de radiación difusa y directa se obtuvieron mediante la aplicación del modelo difuso isotrópico, al simular en el software los resultados muestran que, el sistema presenta una eficiencia del 56,54% al calentar agua en un rango de 30° a 45°C. Para la validación del modelo, se aplicó la prueba estadística de Ji Cuadrado, con lo que se determinó que los datos simulados siguen una misma distribución que los datos reales.

Palabras clave: TRNSYS, Colector de placa plana, colector de tubo al vacío, simulación de sistemas.

ABSTRACT

In this work, a solar collector system was modeled to obtain DHW, using TRNSYS (TraNsient SYstem Simulation), under the operating conditions in Cuenca, Ecuador. The type of research is quantitative and with a correlational approach. Using data from a experimental test, a technical sheet was prepared that will seek to identify the main variables to be applied in the model. The diffuse and direct radiation data were obtained by applying the isotropic diffuse model, when simulating in the software the results show that the system presents an efficiency of 56.54% when heating water in a range of 30° to 45° C. For the validation of the model, the Chi Square statistical test was applied, with which it was determined that the simulated data follow the same distribution as the real data.

Keywords: TRNSYS, Flat plate collector, vacuum tube collector, system simulation.

INDICE GENERAL

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR	I
CERTIFICACIÓN	II
DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD	III
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTO	V
AGRADECIMIENTO	VI
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VII
INDICE GENERAL	VIII
INDICE DE FIGURAS	X
INDICE DE TABLAS	XI
INDICE DE GRÁFICAS	XII
INDICE DE ECUACIONES	XIII
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	3
OBJETIVO GENERAL	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1. CAPITULO I: MARCO REFERENCIAL	4
1.1. La importancia de las energías renovables frente al cambio climático en el Ecuador	4
1.2. Tecnologías de aprovechamiento de la energía solar	6
1.3. Uso de la energía solar térmica	9
1.4. Simulación de sistemas de colectores solares	11

2.	CAPITULO II: METODOLOGÍA	13
2.1.	Levantamiento de información	14
2.2.	Obtención de datos.....	16
2.2.1.	Modelo matemático: Modelo de Liu and Jordan.....	16
2.3.	Modelamiento del sistema	17
2.3.1.	Cálculo de las eficiencias de los colectores solares.....	24
2.4.	Simulación del sistema	24
3.	CAPITULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
3.1.	Análisis de Resultados	27
3.1.	Discusión	31
4.	CAPITULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	34
4.1.	Conclusiones.....	34
4.2.	Recomendaciones	35
	BIBLIOGRAFÍA	36
4.	ANEXOS.....	42

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama de flujo de la metodología. (Autores, 2021).....	14
Figura 2 Delimitación del área de estudio. (Autores,2021).....	15
Figura 3 Sistema Instalado de colectores solares para ACS.....	16
Figura 4 Modelo general de los FPC y ETC generado en TRNSYS. Fuente: (Autores, 2021).....	25

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Situación de la Energía solar térmica de baja temperatura en diferentes países. Fuente:(Autores, 2021).....	9
Tabla 2 Estudios realizados con TRNSYS. (Autores ,2021).....	12
Tabla 3 Consideración para la correlación de Erbs.	22
Tabla 4 Error horario y Desviación estándar calculados del FPC01 (Autores,2021).....	27
Tabla 5 Cálculo de Ji Cuadrada para la simulación 1. Fuente: (Autores,2021).	28
Tabla 6 Error promedio general de las simulaciones. Fuente: (Autores, 2021).	29
Tabla 7 Eficiencias térmicas promedio. Fuente: (Autores,2021)	30
Tabla 8 Variación de la eficiencia según la orientación y ángulo de inclinación. Fuente: (Autores,2021).....	31

INDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Validación de los resultados FPC1. Fuente: (Autores,2021).....	28
Gráfica 2 Prueba de bondad de ajuste, simulación 1. Fuente: (Autores,2021).....	29

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Modelo difuso Isotrópico.....	17
Ecuación 2 Declinación Solar.....	18
Ecuación 3 Declinación Solar.....	19
Ecuación 4 Ángulo cenital.....	19
Ecuación 5 Factor de conversión de la radiación difusa.....	20
Ecuación 6 Declinación Solar.....	20
Ecuación 7 Radiación solar Extraterrestre.....	21
Ecuación 8 Índice de claridad.....	22
Ecuación 9 Calculo de la correlación <i>IdI</i>	22
Ecuación 10 Radiación solar difusa horaria.....	23
Ecuación 11 Radiación solar directa horaria.....	23
Ecuación 12 Cálculo de eficiencia.....	24
Ecuación 13 Cálculo del error porcentual.....	26

INTRODUCCIÓN

Para reducir las emisiones de CO₂ y la quema de combustibles fósiles provocadas por las actividades antrópicas, existen algunas fuentes de energía renovable o energía verde entre las que destaca la energía solar (Parreño et al., 2020). El interés por aprovechar la energía solar tiene ya algunos años y al ser: “Una fuente abundante, no secuestrable y no contaminante de energía que, puede ser colectada para producir energía calórica para: calentar agua, cocinar, deshidratar, destilar líquidos y producir electricidad” (Madriz & Nandwani, 2016), se busca que sea uno de los principales energéticos.

La aplicación de energías renovables no convencionales, como el caso de la energía solar térmica, según Barragán et. al. (2015), podría ser un aporte al desarrollo sustentable de las ciudades y contribuir a las necesidades energéticas, sin reducir la disponibilidad de energía en el futuro. Los colectores solares son una de las principales tecnologías que, pertenecen a la denominada energía solar térmica de baja temperatura, utilizada principalmente en el uso doméstico, para cocción de alimentos u obtención de ACS (Barragán, 2018).

Debido a que, los sistemas de colectores solares son sistemas transitorios, que cambian durante el tiempo, y cuya eficiencia varía con el cambio de las condiciones climatológicas, es necesario la aplicación de softwares de simulación, los cuales permiten establecer las condiciones de funcionamiento reduciendo el margen de error y evitando costos innecesarios en su instalación (Tiwari et al., 2020).

Según Calle et. al. (2018), se estima que, mediante la aplicación de este tipo de tecnologías, en la ciudad de Cuenca se puede obtener una disminución de CO₂ aproximadamente del 44%, con lo que se evita emanar al ambiente 108 535 toneladas de CO₂ al año. En el ámbito local, se necesita que se analice el comportamiento del recurso solar que es casi constante a lo largo del año, para que se potencia su uso, y se evidencie las ventajas frente a sistemas convencionales. En este sentido, el uso de modelos dinámicos permite establecer diferentes escenarios, que pueden ser simulados para verificar el comportamiento de los datos en diferentes situaciones planteadas (Sanchez, 2019).

El presente proyecto busca caracterizar un sistema de colectores solares para la obtención de ACS en la ciudad de Cuenca, empleando el software TRNSYS, bajo las condiciones de operación de un sistema de cuatro colectores solares térmicos dispuestos en la

Universidad de Cuenca. Se pretende obtener un modelo que refleje el comportamiento real del sistema, y permita evidenciar las eficiencias de los colectores, bajo las condiciones climáticas en la ciudad, para esto se ha aplicado el Modelo Difuso Isotrópico.

Los datos climatológicos para la aplicación de este modelo son tomados de la Estación Meteorológica de la Universidad de Cuenca.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Caracterizar un sistema de colectores solares, para la obtención de ACS empleando el modelo TRNSYS, bajo las condiciones de operación, en la ciudad de Cuenca.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Levantar la información de los colectores solares dispuestos en la Universidad de Cuenca.
- ✓ Identificar las variables operacionales, de los colectores solares térmicos de tubo al vacío y placa plana.
- ✓ Modelar en software el comportamiento de los sistemas analizados, con las variables identificadas.
- ✓ Establecer relaciones entre el modelo obtenido y el comportamiento práctico.

1. CAPITULO I: MARCO REFERENCIAL

1.1. La importancia de las energías renovables frente al cambio climático en el Ecuador.

Para determinar la importancia de las energías renovables se analiza la matriz energética internacional y local. Una matriz energética es una radiografía de cómo está balanceado el consumo de energía, entre las distintas fuentes, en determinado período de tiempo.

Según International Energy Agency (2018), las proyecciones realizadas para la matriz energética mundial indican un incremento de 11.5 millones de barriles de petróleo por día entre 2017 y 2040 esto debido principalmente a las economías en desarrollo. De la misma manera, las cifras actuales posicionan a China como el principal consumidor de petróleo en el mundo, y las proyecciones para el 2040 lo colocarían como el mayor importador de todos los tiempos.

Entre 2017 y 2018, el suministro energético total aumentó en 331 Mtep (2.4%), alcanzando un total de 14282 Mtep. Este suministro creció principalmente en los países de Europa y Eurasia no pertenecientes a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) (4.5%). También aumentó en los países de la OCDE y Oriente Medio en menor proporción (1.0 y 0.7% respectivamente). Las Américas no pertenecientes a la OCDE es la única región del mundo donde disminuyó, por cuarto año consecutivo (2.7%) (MERNNR, 2019).

Para el año 2018 se observa que Ecuador presenta un consumo final total de energía de 13.38 millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep), de este valor 1.72 Mtep es de consumo residencial el cual representa el 12.85% (OLADE, 2019)

Mientras que, para el año 2019 en la matriz energética de Ecuador se aprecia que el consumo final total de energía es 13.79 Mtep, de este valor 1.81 Mtep corresponde al consumo residencial que representa el 13.13% del total (MERNNR, 2019). Como resultado, existe una variación porcentual de aproximadamente 2.4% de incremento entre los consumos de 2018 y 2019.

En el Balance Energético Nacional en 2019 se definen los consumos energéticos de cada sector. Siendo el transporte el principal consumidor con un 49.16%, seguido del sector industrial con 14.03%, y, por último, el sector residencial con 13.43%. La demanda energética se satisface utilizando principalmente combustibles fósiles como; diésel

(52.7%), gasolinas (45.6%), para el sector de transporte y para el sector residencial GLP (52.1%), electricidad (37.4%) (MERNNR, 2019).

El uso de estos combustibles fósiles ha traído consigo la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), entre ellos el CO₂. A nivel mundial para el año 2017 las emisiones de este gas fueron 32580 millones de toneladas (Mt), producidas por tres fuentes: carbón, petróleo y gas natural. El carbón representó el 44.34% (14448 Mt), petróleo 34.80% (11339 Mt), gas natural 20.85% (6794 Mt) (IEA (International Energy Agency), 2018).

Las emisiones en el año 2018 fueron de 33882 Mt de las cuales el principal contribuyente es Asia y Australasia con 49.42% del total, le sigue América del Norte con 16.81%, Europa con 12.54%, Medio Oriente con 6.25%, Comunidad de Estados Independientes 6.20%, América Latina y El Caribe 5.14% y por último, África con 3.64% (OLADE, 2019). En Ecuador, para el mismo año las emisiones totales de CO₂ registradas fueron aproximadamente 41.8 Mt lo que representa un incremento de 5.26% con respecto a las emisiones registradas en el 2017 que fueron 39600 Mt (OLADE, 2019). El uso de las tecnologías convencionales como los calentadores mediante GLP, para obtener agua caliente sanitaria, generan cantidades importantes de emisiones de CO₂ que aportan a la contaminación atmosférica. En Cuenca para el año 2018 se generaron emisiones de aproximadamente 245 337 t CO₂ eq (Tinoco, 2018).

Con estos antecedentes se establece la necesidad de la implementación de nuevas tecnologías que permitan reducir el uso de dichos combustibles dentro de la matriz energética. La sustitución de combustibles fósiles se ha vuelto el principal objetivo a nivel internacional y local (Aguirre, 2018). Actualmente existen tecnologías que permite una producción eficiente, y que recurren a otras fuentes de energía que posibilitan una reducción de emisión de gases de efecto invernadero (Alonso, 2021). Con el fin de motivar el uso de energías menos contaminantes se han ido implementado políticas como: las regulaciones legales, la reducción de costos, y la educación para promover la reducción de gases de efecto invernadero, incrementado el uso de energías renovables.

Uno de los inconvenientes para evitar la expansión de las tecnologías renovables ha sido sus costos, pero en la actualidad bajo ciertas condiciones la inversión ya es recuperable. Además, debido a su baja huella ambiental comparada con los procesos convencionales estas tecnologías son ambientalmente amigables (Shah & Ali, 2019). Por otro lado, se ha establecido que su uso entre otros, puede incrementar el empleo, el turismo, o favorecer

al sector rural, lo que permite que, se tenga una amplia aceptación pública. En definitiva, las energías renovables se convierten en una solución anhelada para la aparición de un nuevo modelo de desarrollo sostenible (Blaga et al., 2019), pues se sustentan en tres principios económico, social y calidad medioambiental (Correa et al., 2016).

1.2. Tecnologías de aprovechamiento de la energía solar

La energía solar puede ser aprovechada en cualquier parte del mundo; pero no con la misma eficiencia que en las zonas tropicales, y más todavía en la línea ecuatorial. La eficiencia y la capacidad para aprovechar la captación solar, dependen de factores como: latitud, altitud y condiciones de transparencia de la atmósfera (Albarracin Vélez, 2016). Por esta razón se menciona a Ecuador, como uno de los países con capacidad para el desarrollo de la energía solar debido a su ubicación geográfica, en donde la incidencia de la radiación solar es mucho mayor que en otros países (Calle & Tinoco, 2018).

La energía solar puede ser captada y aprovechada con diferentes tecnologías, que permiten obtener energía para distintas aplicaciones de interés, ya sea en el campo residencial como industrial (Guamán et al., 2016).

Los sistemas de calentamiento de agua son utilizados entre otros para cocinar, calentar espacios, calentar agua para usos domésticos, calentar fluidos para usos industriales, secar productos agrícolas a una baja temperatura controlada. China es uno de los países que dominan la capacidad de producción de agua caliente, fabricando para el año 2009 aproximadamente 28 millones de metros cuadrados de sistemas solares. Seguido de países como Turquía, India y Brasil son de los mayores usuarios de estos sistemas (Sadiq, 2018).

En China cerca del 24% de casas urbanas cuentan con un sistema de calentamiento de agua. Por otra parte, Brasil ocupa el quinto lugar en el mundo y es uno de los países líder en Latinoamérica en el uso de esta tecnología con más de 13 millones de metros cuadrados de sistemas instalados (Giglio et al., 2019).

En Ecuador, a pesar que el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER), lanzó el programa de eficiencia energética para cocinas de inducción, las políticas para la implementación de sistemas de calentamiento de agua aun no son claras (Ochoa & Santos, 2016). El interés por esta tecnología se ha ido incrementado a nivel local. En Cuenca, por ejemplo, existen fabricantes como la empresa Juan Álvarez CIA. LTDA, que en el año 2012 fue reconocida por la Cámara de Construcción como premio a la propuesta más

innovadora. A la fecha, la empresa fabrica sistemas de calentamiento de agua para hogares, hoteles, piscinas e industrias. Los colectores con una capacidad de calentar 200 litros y 300 litros de agua se encuentran en los precios de 1200\$ y 3000\$ respectivamente (Sandoval et al., 2015).

Los sistemas solares térmicos, se clasifican según la temperatura a la que consiguen calentar un fluido. En los sistemas de baja temperatura: el fluido alcanza temperaturas entre 40°C a 60°C y se aplica principalmente para usos domésticos como la obtención de agua caliente sanitaria (SWH, solar water heating). Por otro lado, en los sistemas de media temperatura: la temperatura del fluido supera los 80°C hasta los 250°C y es aplicado en procesos industriales o generación de fluidos térmicos, entre otros (Hinojosa, 2017). Mientras que los sistemas de alta temperatura: el fluido es calentado a temperaturas superiores a los 300°C, para lograr una elevada presión capaz de mover turbinas para la generación de electricidad (Cañar, 2014).

Los sistemas de calentamiento de agua de baja temperatura que son utilizados principalmente en el sector residencial para la obtención de agua caliente sanitaria son de principal importancia para esta investigación. Estas instalaciones solares tienen como componentes: captador solar, tanque de almacenamiento y el fluido de transferencia de calor.

El captador solar es un tipo de intercambiador de calor, que transforma la energía de radiación solar en energía interna del sistema. Esta energía es transferida al fluido en forma de calor. El tanque de almacenamiento es necesario en este sistema ya que permite el almacenamiento temporal del fluido para ser utilizado a diferentes horas del día. El tanque está compuesto por materiales que evitan las pérdidas de calor. Suele fabricarse de acero inoxidable resistente a altas presiones y recubierto con fibras aislantes. El fluido tiene como propósito de recolectar el calor del colector para su uso directo o indirecto. El agua es el principal fluido utilizado en estos sistemas debido a sus propiedades de alta capacidad calorífica, alta conductividad térmica, baja viscosidad y bajo costo (Jamar et al., 2016).

En los sistemas de baja temperatura el principal elemento es el captador solar, que puede ser de dos tipos: a) colectores solares planos, y b) tubos evacuados o al vacío (Navntoft & Cristóbal, 2019).

El proceso de funcionamiento de un colector solar se inicia cuando, el agua fría ingresa y es calentada por radiación solar; y luego, distribuida (Singh et al., 2021). El colector solar capta la energía solar y la transfiere al agua, luego un termo-tanque almacena el agua caliente y mantiene su temperatura. El fluido es conducido a través de un sistema de tuberías y válvulas que permiten transportar el agua entre: colector, termo-tanque, y sistema sanitario, mediante el efecto termosifón o el uso de una bomba eléctrica.

El colector solar de placa plana permite la entrada de una gran porción de energía evitando pérdidas, mediante un vidrio opaco que calienta la placa, de tal manera que transfiere la mayor parte de energía al fluido (Rodríguez et al., 2016). La eficiencia de estos equipos dependen de varios factores como ubicación y posicionamiento además de características físicas, estructura y configuración geométrica (Forero & Garzón, 2020). Según, Flórez (2016) “cada metro cuadrado de colector, puede producir anualmente una cantidad de energía equivalente, a unos ochenta kilogramos de petróleo”.

Los colectores de tubo de vacío, están compuestos por una serie de tubos, de los cuales se ha extraído el aire para producir el vacío. Este tipo de panel convierte la radiación solar en energía térmica, consta de un conjunto de tubos cilíndricos que conforman un absorbedor selectivo, situado sobre un asentamiento reflector y rodeado de un cilindro de vidrio transparente. Entre el tubo exterior transparente y el absorbedor interior se ha hecho el vacío para evitar las pérdidas termodinámicas. Alcanza temperaturas de 100°C y aprovecha mucho más la energía solar. En los sistemas de colección de tubos al vacío, se ha demostrado que la combinación de una superficie selectiva y un espacio evacuado dan como resultado un desempeño más eficiente. Su geometría permite lograr excelentes niveles de colección en ángulos de incidencia bajos (Hernández, 2016).

Con respecto a la manera de circulación de agua, existen básicamente dos tipos de sistemas: por circulación natural y forzada. El sistema de circulación natural consta de un colector solar, y un tanque de almacenamiento. Mientras que el sistema forzado consta de un colector solar, un tanque de almacenamiento y una bomba que permita el flujo del agua (Marmoush et al., 2018). Los sistemas de circulación natural son recomendados para climas cálidos; mientras que los sistemas forzados se utilizan con mayor frecuencia en climas fríos (Singh et al., 2021).

1.3. Uso de la energía solar térmica

Para poder comprender la situación actual de estas energías, cabe mencionar los subsidios a los combustibles fósiles tanto en América Latina como en Ecuador han jugado un papel fundamental para limitar el desarrollo de nuevas tecnologías.

Un subsidio se da a manera de ayuda financiera dirigida a un sector específico, primordialmente con la intención de impulsar la política económica y social, siendo fomentada prioritariamente para los sectores más pobres (Troncoso & Soares da Silva, 2017).

En el Ecuador el consumo de petróleo se ha mantenido como preferente, debido a los subsidios que le han sido asignados por el Estado, siendo esto un incentivo para el consumo de la población. En el año 2017, estos subsidios requirieron cerca del 17% del presupuesto general del Estado (PGE) (Puig et al., 2018). Sin embargo, toda política para sustituir o retirar los subsidios ha recibido el rechazo popular, porque no han sido debidamente socializados.

En la Tabla 1 se puede observar el uso de la energía solar térmica para el calentamiento de agua en algunos países, cuando existen programas o políticas que estimulan el uso de estas. Los incentivos para su implementación pueden ser reducción de impuestos o el aumento de subsidios a estas tecnologías acompañadas de una campaña informativa sobre los beneficios que se adquieren.

*Tabla 1 Situación de la Energía solar térmica de baja temperatura en diferentes países.
Fuente:(Autores, 2021).*

PAÍS	SITUACIÓN ACTUAL	REDUCCIÓN DE EMISIONES	REFERENCIA
Brasil	Mediante el principal proyecto gubernamental llamado “Mi casa, Mi vida” han sido entregados cerca de 224 000 sistemas.	Cerca del 64% de duchas eléctricas son la fuente principal de obtención de agua caliente sanitaria. Esta reducción, equivale a cerca de 56089 toneladas CO ₂ por año.	(Giglio et al., 2019).
México	Dispone de una capacidad solar térmica instalada de	Manteniendo esta tendencia para el año de 2030 se	(García & Ituna, 2020).

PAÍS	SITUACIÓN ACTUAL	REDUCCIÓN DE EMISIONES	REFERENCIA
	aproximadamente 4 millones de metros cuadrados. Cerca de 2750 MWth. México de 2015 a 2030 podría lograr una tasa de crecimiento anual del mercado solar de aproximadamente 17.32%.	presentaría un ahorro de 5 934 200 toneladas de GLP y una disminución de las emisiones a la atmósfera de 5 735 926 toneladas de CO ₂	
Australia	Desde el año 2007 se registró un mercado de 8.2 millones de hogares con SWH, el valor de crecimiento anual ha sido de 1.5% hasta la actualidad lo que coloca a Australia con un mercado de cerca de 10 millones de sistemas instalados en viviendas. Este crecimiento se debe principalmente al programa de reembolso solar del gobierno australiano.	Las emisiones del calentamiento de agua con gas natural como fuente son 5 millones de toneladas de CO ₂ por año. Y para los calentadores eléctricos es de cerca de 18.4 millones de toneladas CO ₂ por año.	(Urmee et al., 2018).

En el Ecuador, el agua caliente sanitaria, mediante energía solar, no es significativa, ya que las principales tecnologías utilizadas para obtener ACS, es por medio de calefones que emplean GLP y duchas eléctricas. Debido a que no existen datos concretos de cuantas familias cuentan con duchas eléctricas, mediante estadísticas de comercio exterior, (Guamán et al., 2016), indica que, existirían aproximadamente 1 000 000 de duchas eléctricas y de la misma forma infiere que, actualmente existen aproximadamente 300 000 unidades de calefones en el país. Es por esto que se ha propuesto la subvención del 70% a la compra de paneles solares térmicos, para sustituir el calefón a gas, y con ello suprimir el uso incorrecto del subsidio al gas licuado de petróleo (GLP) (Hinojosa, 2017). Pero el costo en el mercado nacional del sistema de calentamiento de agua sanitaria mediante colectores solares, sigue siendo elevado (Hinojosa, 2017). Mientras que, el precio de venta al público de un cilindro de GLP de 15 kg es de 1.60 dólares y el costo de la energía eléctrica residencial es de 0.096 dólares por kWh, obligando al país a conceder una subvención de cerca de 1300 millones de dólares anuales. A pesar que,

existen varios proyectos por parte del MIDUVI (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda), para la incorporación de sistemas de calentamiento de agua, no existe un programa nacional que fomente el uso de un mayor porcentaje de la población (Guamán et al., 2016).

1.4.Simulación de sistemas de colectores solares

Los modelados de sistemas facilitan el proceso de toma de decisiones. La simulación computacional de sistemas, consiste en la utilización de ciertas técnicas matemáticas, empleadas en computadoras, las cuales permiten imitar el funcionamiento de prácticamente cualquier tipo de operación o proceso del mundo real, es decir, es el estudio del comportamiento de sistemas reales a través del ejercicio de modelos. La técnica de modelado software trata con complejidad un conjunto de partes operativas interrelacionadas, del que interesa considerar su comportamiento global (Caranqui, 2018).

A diferencia de los proyectos físicos, las simulaciones o modelados de sistemas software son menos costosas, y se pueden realizar en menor tiempo. Así pues, los resultados de la simulación dependen del modelo empleado, permitiendo reducir la incertidumbre de diversos factores como el clima y el error humano (Shrivastava et al., 2017).

TRNSYS es un entorno de software basado en gráficos, flexible, que se utiliza para simular comportamientos de sistemas transitorios. Si bien la gran mayoría de las simulaciones se centran en evaluar la eficiencia de los sistemas de energía térmica y eléctrica, TRNSYS también se puede utilizar para modelar otros sistemas dinámicos, como el flujo de tráfico o los procesos biológicos.

Los modelos se construyen de tal manera que los usuarios pueden modificar los componentes existentes o escribir los suyos propios. Esta última parte, incluye componentes esenciales para el estudio de los sistemas de colectores solares, como datos meteorológicos, radiación solar, y un sistema de control (Ahamed et al., 2016).

Desarrollado en el año 1975, con más de 35 años de disponibilidad comercial, TRNSYS sigue siendo un paquete de software flexible, basado en componentes que se adaptan a las necesidades cambiantes de los investigadores y profesionales de la comunidad de simulación energética (Hernández, 2016).

Este software tiene como objeto, el estudio del comportamiento de los sistemas de energía solar, y permite observar mediante simulaciones, dicho comportamiento a lo largo del tiempo (Hernández, 2016).“El modelado y la simulación de sistemas físicos, representa una capacidad fundamental para su comprensión, desde el punto de vista de las distintas disciplinas de la ingeniería, como: el control, el diseño, la selección o el mantenimiento de equipos e instalaciones térmicas” (Hernández, 2016). Debido a esto, el programa TRNSYS es uno de los más utilizados dentro de la ingeniería renovable.

En la Tabla 2, se presentan diferentes casos de estudios en los cuales se aplicó el software TRNSYS, para simular distintos sistemas de calentamiento de agua de uso doméstico y se presentan las distintas eficiencias para las condiciones climatológicas de cada lugar.

Tabla 2 Estudios realizados con TRNSYS. (Autores ,2021)

UBICACIÓN	ESTUDIO REALIZADO	REFERENCIA
Cuenca, Ecuador	Se realizó simulación en TRNSYS studio, de tres diferentes escenarios, con la finalidad de determinar los aportes energéticos de cada sistema. El primero, un sistema termo solar con recirculación forzada que genero un aporte de 3320 kWh, el segundo escenario, un sistema termo solar con recirculación forzada e intercambiador de calor generando un aporte de 3467 kWh y el ultimo, un sistema fotovoltaico con recirculación forzada generó 346 kWh. En todos los escenarios se cuentan con un sistema auxiliar.	
Concepción, Chile	Se realizó un modelo en el programa TRNSYS, de un sistema de colectores solares forzados; se simuló un año tipo, con intervalo de 15 minutos, en el cual se evidencio que: la eficiencia del colector fue de 55.6 %; y, la eficiencia general del sistema fue de 53.8%. Asimismo, la energía generada por el colector fue de 2.05 megavatios-hora (MWh), dando como porcentaje de aporte al sistema convencional el 48.3%.	(Campos, 2015)
India	Se modeló en TRNSYS un sistema de calentamiento de agua domestico para las condiciones climáticas de la India, y se obtuvo como resultados un promedio de temperatura del colector de 63° C, la eficiencia diaria del colector se mantuvo en rangos de 55 % a 65 %. El promedio de temperatura almacenada en el tanque varia de 45° a 65° C, utilizando un colector de placa plana.	(Tiwari et al., 2020)

2. CAPITULO II: METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este proyecto, se integra un conjunto de actividades que se aplican para recabar información y los datos necesarios para caracterizar el sistema experimental mediante la simulación. Para la investigación se han considerado cuatro etapas como se muestra en la Figura 1.



Figura 1 Diagrama de flujo de la metodología. (Autores, 2021).

2.1. Levantamiento de información

La ciudad de Cuenca se encuentra ubicada en la cordillera de los Andes, en la región centro sur de la República del Ecuador, pertenece a la provincia del Azuay como se muestra en la Figura 2. El Cantón ocupa una superficie de 366 532.96 hectáreas, representando un 42% de la superficie total de la provincia. Geográficamente se encuentra ubicada entre las coordenadas 2°30' a 3°10' de latitud sur y 78°51' a 79°40' de longitud oeste y su nivel altitudinal es de 2600 m.s.n.m. (PDOT, 2015).

En la ciudad predominan dos tipos de climas, el ecuatorial mesotérmico semi húmedo, el cual se caracteriza por sus temperaturas irregulares, cuyos valores varían entre los 18 a

20 °C, y el ecuatorial de alta montaña, el cual presenta temperaturas cercanas a los 8 °C (PDOT, 2015).

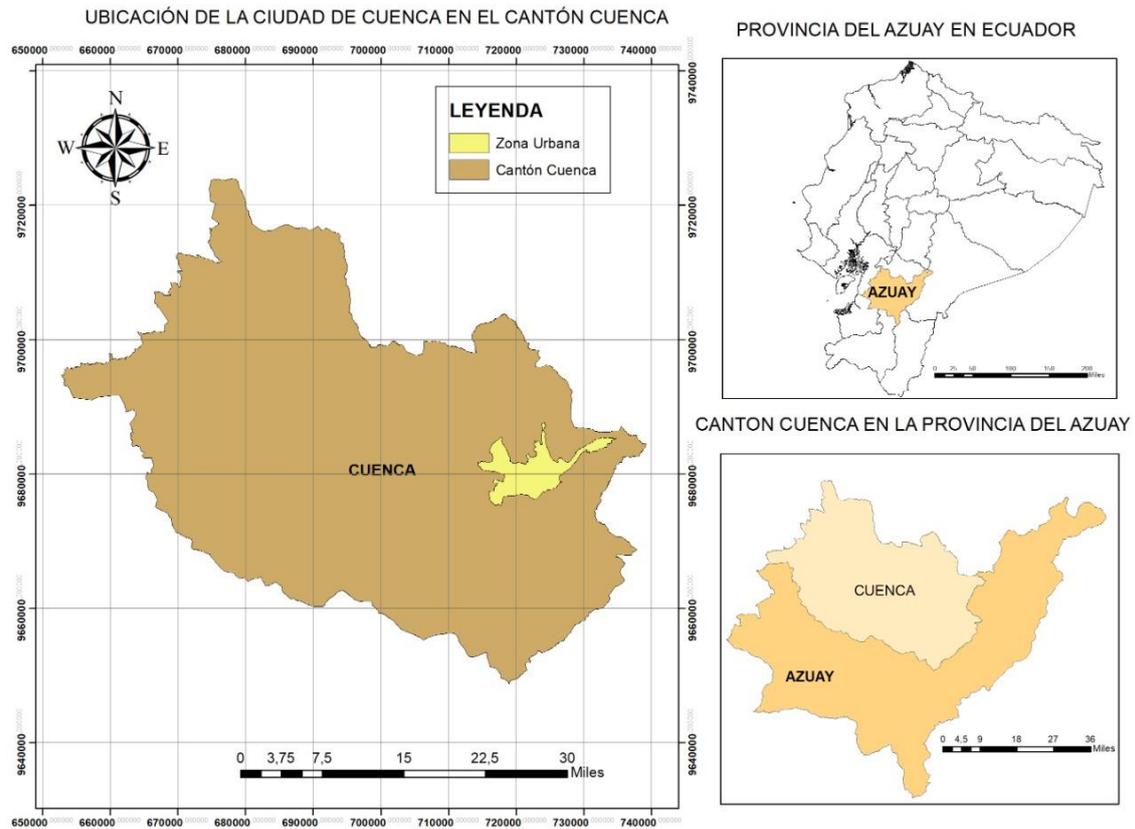


Figura 2 Delimitación del área de estudio. (Autores,2021).

El sistema a estudiar se encuentra ubicado en las instalaciones de la Universidad de Cuenca, en las coordenadas 2°54'02'' de latitud sur y 79°00'39'' de longitud oeste a una elevación de 2535 m.s.n.m. Los detalles de los elementos principales se presentan en la Ficha Técnica descrita en el Anexo 1, en donde se establecen características y especificaciones de cada uno de los componentes. En esta Ficha se especifica información relevante para la configuración de cada componente dentro del software TRNSYS.

En la Figura 3, se muestra el esquema de los dos sistemas de FPC y ETC con los elementos que los compone, cada uno con una orientación e inclinación indicada en el Anexo 6.

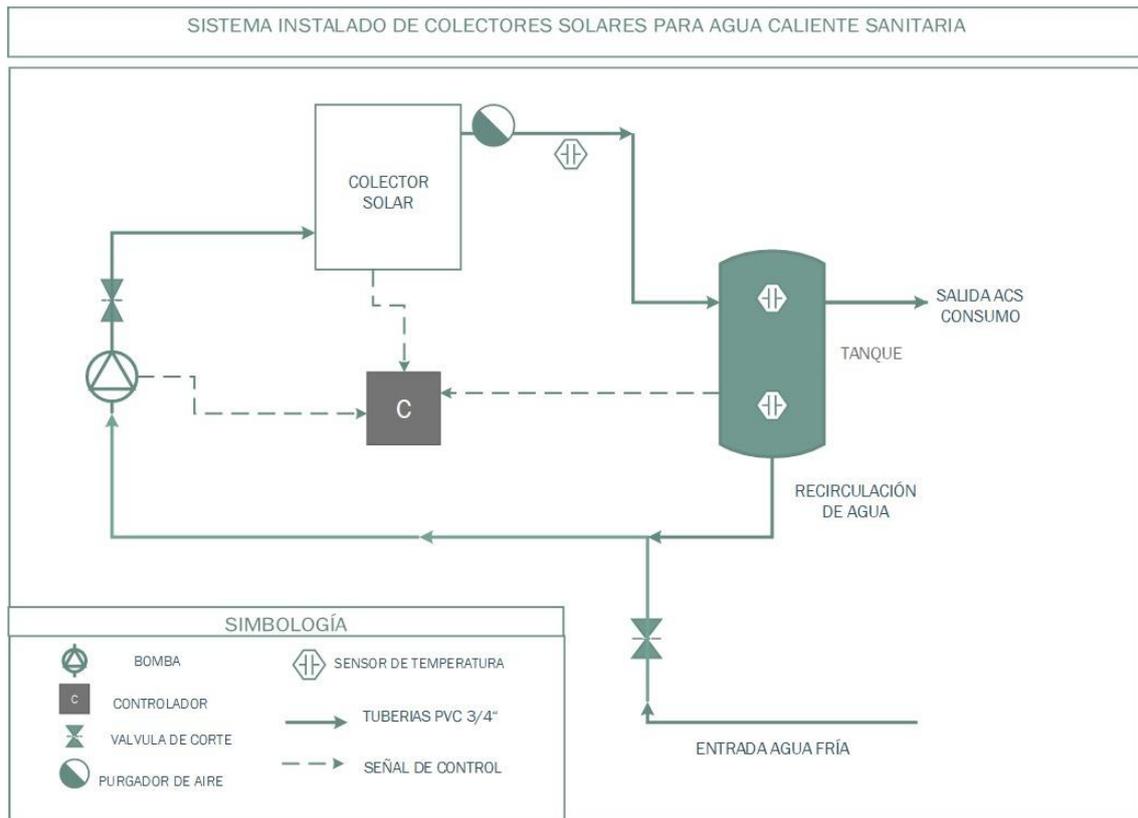


Figura 3 Sistema Instalado de colectores solares para ACS.

2.2. Obtención de datos

Los datos generados por el sistema de calentamiento de agua, se obtuvieron mediante la gestión realizada por el grupo de investigación de la Universidad de Cuenca. El equipamiento descrito en la Figura 3, cuenta con un control y procesamiento de los datos generados automáticamente por el sistema instalado. Estos datos muestran información como: temperaturas mínimas y máximas de los colectores, temperaturas mínimas y máximas de la parte superior del tanque de almacenamiento y; comparaciones entre la radiación máxima y temperatura agua. Esta base de datos es necesaria para realizar validaciones del modelo y para obtener la componente difusa y directa de la radiación global.

2.2.1. Modelo matemático: Modelo de Liu and Jordan

Este modelo permite obtener la radiación solar total sobre una superficie inclinada durante un periodo de tiempo horario, mediante la suma de los tres componentes: haz o radiación directa, radiación difusa y radiación reflejada o radiación de albedo (Duffie & Beckman,

2013), propuesto en el año 1960 por Benjamin Liu y Richard Jordan, quienes desarrollaron el modelo difuso isotrópico expresado en la Ecuación 1

$$I_T = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I_{pg} \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

Ecuación 1 Modelo difuso Isotrópico

Donde:

I_T Irradiación Total

I_b Radiación Solar Directa Horaria

R_b Factor de corrección de radiación directa

I_d Radiación Solar Difusa Horaria

I_{pg} Radiación Solar de Albedo Horario

β Ángulo de inclinación del colector solar

2.3. Modelamiento del sistema

El formato de fichero climático que requiere TRNSYS, precisa de las componentes difusa y directa, es por esto que, se aplicó el modelo de Liu and Jordan, para el cálculo de dichos componentes a partir de la radiación global. Los datos de radiación global fueron obtenidos de la Estación Meteorológica de la Universidad de Cuenca.

Para ejemplo del desarrollo del modelo, se tomó como referencia el día 1 de mayo del 2020 a las 12:00 horas.

Declinación del sol. - Indica la posición angular del sol al mediodía solar, con respecto al plano del ecuador. La declinación solar toma valores desde -23.45° a 23.45° (Duffie & Beckman, 2013). En la Ecuación 2, se muestra la expresión para el cálculo de la declinación solar:

$$\delta = 23,45 \sin \left(360 * \frac{284 + n}{365} \right)$$

$$\delta = 23,45 \sin \left(360 * \frac{284 + 122}{365} \right)$$

$$\delta = 15.210$$

Ecuación 2 Declinación Solar

Donde:

n Día del año

δ **Declinación solar**

Ángulo solar horario. – Debido a la rotación de la tierra, se genera un desplazamiento angular del sol sobre su propio eje en el meridiano local, desplazándose 15° por hora, los valores para la mañana son negativos y para la tarde positivos.

Considerando que para el medio día el valor del ángulo es 0°

$$\omega = 0^\circ$$

Esta variable toma valores en el rango de -180° hasta 180° y en anexo 2, indica la variación del ángulo con respecto a la hora del sol en un día.

Ángulo de incidencia. – Este ángulo depende de la posición del sol, en relación a una posición específica en la superficie terrestre, en un tiempo determinado (Alvarez,2017).

Se usó la Ecuación:

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \sin \delta \sin \phi \cos \beta \\ &- \sin \delta \sin \phi \cos \gamma \\ &+ \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega \\ &+ \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned}$$

Donde:

$$\delta = 15.21^\circ$$

$$\phi = -2.89$$

$$\beta = 14^\circ$$

$$\gamma = 180^\circ$$

$$\omega = 0^\circ$$

$$\vartheta = 23,07^\circ$$

Ecuación 3 Declinación Solar

Donde:

ϕ Latitud

δ Declinación

ω Angulo solar horario

β Ángulo de inclinación del colector solar

γ Azimut

ϑ Declinación Solar

Angulo Cenital. – Se calcula mediante la Ecuación 4 que se muestra a continuación

$$\text{Cos } \vartheta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \text{sen } \phi \text{ sen } \delta$$

$$\text{Cos } \vartheta_z = \cos(-2.89) \cos(15.21) \cos(0) + \text{sen } (-2.89) \text{ sen } (15.21)$$

$$\vartheta_z = 18,010^\circ$$

Ecuación 4 Ángulo cenital

Donde:

ϕ Latitud

δ Declinación

ω Angulo solar horario

ϑ_z Angulo Cenital

Factor de corrección de irradiación difusa. – Este factor es calculado mediante la Ecuación 5.

$$R_d = \frac{1 + \cos \beta}{2}$$

$$R_d = \frac{1 + \cos (14)}{2}$$

$$R_d = 0,985$$

Ecuación 5 Factor de conversión de la radiación difusa

Donde:

β Ángulo de inclinación del colector solar

Factor de corrección de la irradiación directa. – Este factor se calcula mediante la Ecuación 6.

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z}$$

$$R_b = \frac{\cos (23,07)}{\cos (18,01)}$$

$$R_b = 0,967$$

Ecuación 6 Declinación Solar

Donde:

θ Ángulo de Inclinación del sol

θ_z Ángulo cenital

Constante solar. – La constante solar se define como, la energía del sol por unidad de tiempo recibida en una unidad de superficie, perpendicular a la dirección de propagación de la radiación a la distancia promedio, Tierra – Sol fuera de la atmosfera (Duffie & Beckman, 2013).

Para el presente caso de estudio, el valor de constante solar empleado fue:

$$G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$$

Latitud. - El valor de la latitud fue tomado directamente de la estación meteorología M5103, ubicada en el centro de la ciudad de Cuenca

Radiación Solar Extraterrestre. – Es la cantidad de energía que proviene del sol, por unidad de área, que recibe cualquier punto por encima de la atmosfera terrestre, en cada instante de tiempo. La Ecuación 7 muestra el cálculo de la radiación solar extraterrestre para el periodo de tiempo de 1h.

$$I_o = G_{SC} \left(1 + 0,033 * \text{Cos} \frac{360n}{365} \right) (\text{cos } \varnothing \text{ cos } \delta \text{ cos } \omega + \text{sen } \varnothing \text{ sen } \delta)$$

$$I_o = 1367 \left(1 + 0,033 * \text{Cos} \frac{360(122)}{365} \right) (\text{cos}(-2,89) \text{ cos}(15,21) \text{ cos}(7,5) \\ + \text{sen} (-2,89) \text{ sen} (15,21))$$

$$I_o = 1327,15 \text{ Wh/m}^2$$

Ecuación 7 Radiación solar Extraterrestre

Donde:

G_{SC} Constante Solar

n Día del año

\varnothing Latitud

δ Declinación

ω Angulo solar horario

Índice de claridad. - El índice de claridad es la relación entre, la radiación promedio sobre una superficie horizontal y la radiación extraterrestre promedio, ya sea en periodos de tiempo mensual, diario u horario (Rodríguez Patarroyo et al., 2015). Este índice calculado en la Ecuación 8, permite asumir el tipo de día, los cuales pueden ser: días claros, días parcialmente nublados y días nublados.

$$K_T = \frac{I}{I_o}$$

$$K_T = \frac{291.83}{1327.15}$$

$$K_T = 0.22$$

Ecuación 8 Índice de claridad

Donde:

I Radiación Solar Horaria

I_0 Radiación Solar Extraterrestre Horaria

Obtenido el índice, se calcula la correlación de Erbs (I_d/I) en función del índice de claridad horaria, para ello se aplican las siguientes condiciones:

Tabla 3 Consideración para la correlación de Erbs.

$\frac{I_d}{I}$	$1.0 - 0.09 K_T$	$K_T \leq 0.22$
	$0.9511 - 0.1604K_T + 4.388K_T^2 - 16.638K_T^3 + 12.336K_T^4$	$0.22 < K_T \leq 0.80$
	0.165	$K_T > 0.80$

Debido a que el valor de K_T es 0.22, utilizamos la primera expresión descrita en la Ecuación 9, para el cálculo de la correlación.

$$\frac{I_d}{I} = 1 - 0.09 K_T$$

$$\frac{I_d}{I} = 1 - 0.09 (0.22)$$

$$\frac{I_d}{I} = 0.9802$$

Ecuación 9 Calculo de la correlación I_d/I

Donde:

K_T Índice de claridad

Radiación solar difusa horaria. – La Ecuación 10 se utiliza para calcular la radiación solar recibida después de que se ha dado un cambio en su dirección, debido a la composición atmosférica que causa una dispersión.

$$I_d = \frac{I_d}{I} * I * R_d$$

$$I_d = 0.9802 * 291.83 * 0.985$$

$$I_d = 281.76 \text{ Wh/m}^2$$

Ecuación 10 Radiación solar difusa horaria

Donde:

I Radiación Solar Horaria

R_d Factor de corrección de irradiación difusa

Radiación solar directa horaria. – Teniendo en cuenta que la radiación total es la suma de sus componentes, se obtiene despejando la radiación directa de la Ecuación 11.

$$I_T = (I_b + I_d)$$

$$I_b = I_T - I_d$$

$$I_b = 291.83 - 281.76$$

$$I_b = 10.07 \text{ Wh/m}^2$$

$$I_b * R_b$$

$$I_{b \text{ total}} = 10.07 * 0.967$$

$$I_{b \text{ total}} = 9.73 \text{ Wh/ m}^2$$

Ecuación 11 Radiación solar directa horaria

Donde:

I_T Irradiación Total

I_b Radiación Solar Directa Horaria

I_d Radiación Solar Difusa Horaria

R_b Factor de corrección de irradiación directa

Cabe recalcar que, el resultado de las variables se presenta en unidades sexagesimales, pero para los cálculos en el software Excel se transformó a radianes.

2.3.1. Cálculo de las eficiencias de los colectores solares

La eficiencia o rendimiento del captador, es una relación de la potencia térmica generada y la radiación solar incidente en la unidad de área, el valor por lo general se expresa en porcentaje. Se calcula aplicando la Ecuación 12.

$$\eta = \eta_o - k_1 \left(\frac{tm - ta}{I_o} \right) - k_2 \left(\frac{(tm - ta)^2}{I_o} \right) * 100$$

Ecuación 12 Cálculo de eficiencia

Donde:

η Eficiencia del colector (%)

η_o Eficiencia Óptico (%)

k_1 Coeficiente lineal de perdidas ($W/m^2.K$)

k_2 Coeficiente cuadrático de perdidas ($W/m^2.K^2$)

tm Temperatura media del Colector ($^{\circ}C$)

ta Temperatura ambiente ($^{\circ}C$)

I_o Irradiación horaria (W/m^2)

Los valores de eficiencia óptico y coeficientes de pérdida son obtenidos directamente del catálogo según el fabricante, siendo para el FPC $\eta_o = 0.73$, $k_1 = 2.51$, $k_2 = 0.038$ y para el ETC $\eta_o = 0.85$, $k_1 = 1.47$, $k_2 = 0.01$. Los cálculos de la eficiencia se los realizaron en los horarios de 6am a 6pm, esto debido a que las condiciones climáticas de baja irradiación en la zona de estudio, a tempranas horas de la mañana y pasadas las 6pm, provoca que los valores de eficiencia térmica a estas horas sean negativos.

2.4. Simulación del sistema

TRNSYS se compone de dos partes. El primero es un motor, que lee y resuelve los datos al ingresar, resuelve repetidamente el sistema, determina la relación y grafica las variables del sistema. El motor también propicia la alternativa de interpolar datos de archivos externos (Fernandez-Bravo & Cacabelos, 2015).

La segunda parte de TRNSYS es una extensa biblioteca de componentes, cada uno de los cuales modela el desempeño de una parte del sistema (Fernandez-Bravo & Cacabelos,

2015). En el Anexo 3, se muestra los componentes utilizados para modelar este sistema. La biblioteca básica incluye aproximadamente 140 modelos que contienen diferentes TYPES que son varios componentes de los sistemas de calentamiento de agua de uso residencial, también cuentan con procesadores de datos meteorológicos (Levy, 2018).

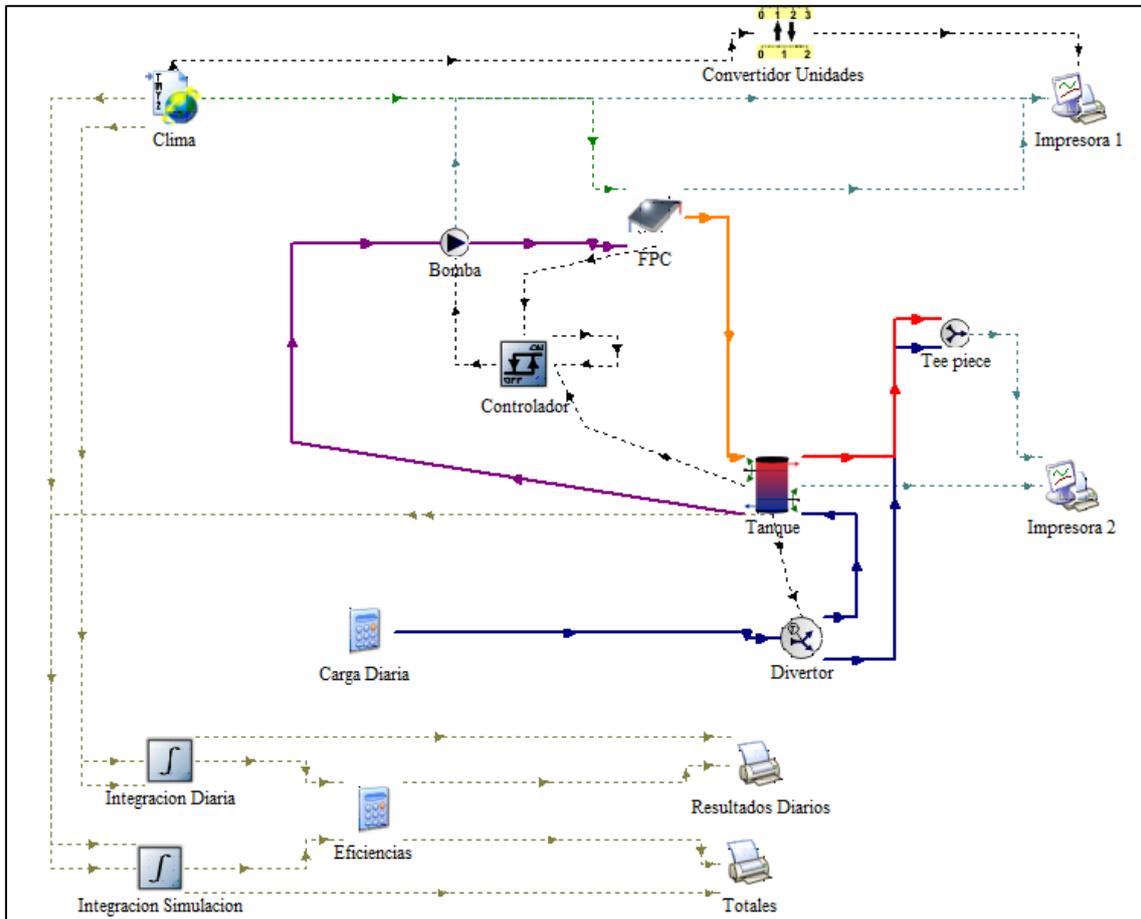


Figura 4 Modelo general de los FPC y ETC generado en TRNSYS. Fuente: (Autores, 2021).

Para el proceso de simulación, mediante las variables identificadas y con los componentes utilizados, se realizó las conexiones entre los diferentes elementos, utilizando la interfaz de TRNSYS. En la Figura 4 se muestra el modelo general de las conexiones en el software. Se configuró cada uno de los TYPES con las especificaciones técnicas, y para los datos de flujo de agua se consideró el consumo de una familia de cuatro personas. Según, Calle et. al. (2018), el consumo promedio de ACS en Cuenca, es de $50 \text{ L/hab} \cdot \text{día}$, resultando para este sistema 200 L/día . Para los horarios de consumo se configuró un controlador lógico programable (PLC), que permite simular las aperturas de flujo de agua, siendo tres veces en la mañana, dos en la tarde y dos en la noche. El volumen de agua y la hora de cada apertura se detalla en el Anexo 4.

En cuanto al fichero climatológico, se colocó los datos de radiación directa y difusa en el formato solicitado por el software, el cual se muestra en el Anexo 5.

Debido a que el sistema consta de dos colectores de placa plana y dos colectores de tubo al vacío, cada uno siendo un sistema independiente, con variaciones de inclinación y azimut por periodos determinados de tiempo, se realizaron dieciséis simulaciones como se puede ver en el Anexo 6.

Por último, se ingresa el flujo de agua de 200 L/día y la temperatura del agua de entrada de 15°C. Al simular el sistema, se obtiene como resultado las temperaturas de salida del colector, esta variable es la de mayor importancia para el proceso de validación. Una vez simulado el sistema, TRNSYS permite obtener gráficas de las temperaturas con respecto a las horas de simulación, como se muestra en el Anexo 7. Para la validación del modelo, se tomaron las temperaturas de salida del colector del sistema práctico y simulado. Se calculó un error de cada hora de simulación para hallar un promedio de error general del sistema, aplicando la ecuación 13. Para determinar la distribución de los datos se realizó un análisis estadístico mediante Ji Cuadrado.

$$\frac{T_{o_{real}} - T_{o_{simulada}}}{T_{o_{real}}} * 100$$

Ecuación 13 Cálculo del error porcentual

Donde:

T_o Temperatura salida *del colector solar*

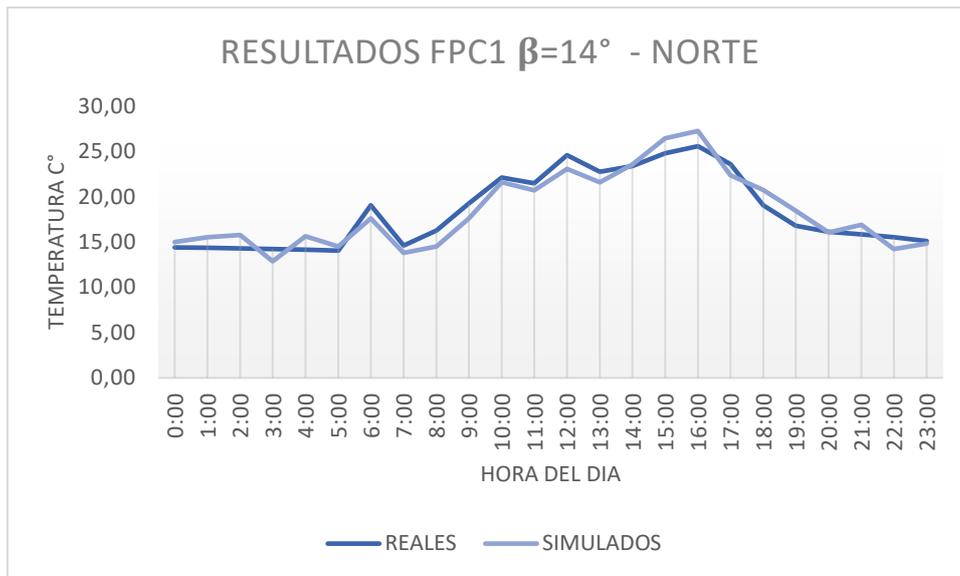
3. CAPITULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis de Resultados

En la Tabla 4, se presenta la validación de las simulaciones que muestra los datos reales y simulados de la temperatura de salida del colector, medida en grados Celsius, con el porcentaje de error de cada hora de simulación, además de la desviación estándar de esos valores. A modo de ejemplo se toma un periodo de 24 horas correspondiente a la simulación N°1.

Tabla 4 Error horario y Desviación estándar calculados del FPC01 (Autores,2021).

HORA	HORA DEL AÑO	TEMP. SALIDA DE COLECTOR REALES (°C)	TEMP. SALIDA DE COLECTOR SIMULADO (°C)	ERROR (%)	DESVIACION ESTANDAR
0:00	2905	14.40	15.00	4.17	
1:00	2906	14.38	15.52	7.88	
2:00	2907	14.30	15.76	10.22	
3:00	2908	14.22	12.87	9.45	
4:00	2909	14.15	15.64	10.52	
5:00	2910	14.05	14.53	3.39	
6:00	2911	19.07	17.62	7.60	
7:00	2912	14.62	13.82	5.46	
8:00	2913	16.28	14.51	10.92	
9:00	2914	19.25	17.60	8.59	
10:00	2915	22.12	21.60	2.34	
11:00	2916	21.48	20.70	3.67	
12:00	2917	24.58	23.08	6.11	3,11
13:00	2918	22.77	21.60	5.14	
14:00	2919	23.38	23.55	0.72	
15:00	2920	24.80	26.45	6.64	
16:00	2921	25.58	27.26	6.54	
17:00	2922	23.62	22.38	5.22	
18:00	2923	19.07	20.76	8.89	
19:00	2924	16.82	18.46	9.79	
20:00	2925	16.12	16.06	0.33	
21:00	2926	15.83	16.91	6.83	
22:00	2927	15.53	14.24	8.30	
23:00	2928	15.12	14.84	1.86	
ERROR PROMEDIO				6.27	



Gráfica 1 Validación de los resultados FPC1. Fuente: (Autores,2021)

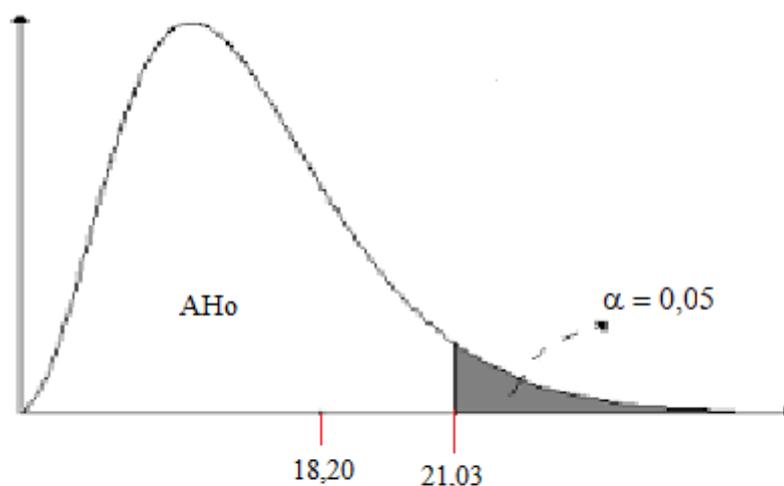
En la Grafica 1, se observa que los datos reales y simulados tienen una tendencia similar, y determinando estadísticamente que estos datos simulados se ajustan a una misma distribución, mediante la prueba de bondad de ajuste de Ji Cuadrada, se obtuvo las frecuencias de ambas variables como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5 Cálculo de Ji Cuadrada para la simulación 1. Fuente: (Autores,2021).

CLASES	Frecuencia Absoluta real f_o	Frecuencia Absoluta simulada f_e	$\frac{(f_o - f_e)^2}{f_e}$
1	3	6	1.50
2	102	125	4.23
3	600	545	5.55
4	319	353	3.27
5	167	188	2.35
6	294	291	0.03
7	259	245	0.80
8	230	225	0.11
9	95	93	0.04
10	15	13	0.31
11	0	0	0.00
12	4	4	0.00
13	0	0	1.00
Ji Cuadrada			18.20
Ji Crítico			21.03

Mediante los valores de Ji cuadrado en la Gráfica 2 se muestra, que el valor calculado cae dentro de la zona de aceptación de la hipótesis nula, esto indica que los valores de

frecuencia de los datos en la simulación 1, siguen una misma distribución que los reales, a un nivel de significancia de 5%.



H₀: Los datos reales y simulados siguen una misma distribución
H₁: Los datos reales y simulados no siguen una misma distribución.

Gráfica 2 Prueba de bondad de ajuste, simulación 1. Fuente: (Autores, 2021).

En total se obtuvieron, 4152 datos de cada colector, estos datos corresponden a la temperatura de agua de salida de cada uno. Con estos datos se calculó los errores promedio con respecto a los datos reales de temperatura de salida del colector. De la misma forma con estos datos, se calculó la desviación estándar para los periodos establecidos.

En la Tabla 6, se presenta un resumen general de los errores calculados durante las simulaciones que corresponden a los colectores solares de placa plana y tubo al vacío.

Tabla 6 Error promedio general de las simulaciones. Fuente: (Autores, 2021).

Nº SIMULACION	PERIODO DE HORAS	COLECTOR	ERROR	PROMEDIO ERROR	DESVIACION ESTANDAR	PROM. DESVIACION ESTANDAR
1	2904 - 5088	FPC01	5.71%	5.79%	6.69	5.12
2	5112 - 5904		5.77%		4.48	
3	5905 - 6432		5.43%		4.05	
4	6433 - 7056		6.26%		5.27	
5	2904 - 5088	FPC02	6.15%	6.20%	4.55	4.85
6	5112 - 5904		6.42%		5.10	
7	5905 - 6432		5.54%		4.31	
8	6433 - 7056		6.67%		5.43	
9	2904 - 5088	ETC01	4.60%	5.60%	3.27	4.43
10	5112 - 5904		6.18%		5.59	

11	5905 - 6432		5.74%		4.23	
12	6433 - 7056		5.87%		4.62	
13	2904 - 5088		4.68%		3.84	
14	5112 - 5904	ETC02	5.44%	5,57%	4.62	4.51
15	5905 - 6432		5.84%		4.42	
16	6433 - 7056		6.33%		5.16	

Para la eficiencia de los colectores solares (Ecuación 12), mediante la Tabla 7, se expone a manera de resumen, la eficiencia para cada colector, en el periodo de tiempo establecido para cada simulación.

Tabla 7 Eficiencias térmicas promedio. Fuente: (Autores,2021)

N° SIMU	PERIODO DE HORAS	COLECTOR	RADIACION TOTAL PROMEDIO	TEMP. SALIDA COLECTOR	TEMP. SALIDA AMBIENTE	EFICIENCIA	PROMEDIO EFICIENCIA
			IT (w/m ²)	(°C)	(°C)	(%)	(%)
1	2904 - 5088	FPC01	246.30	23.85	15.67	52.73	54.09
2	5112 - 5904		289.50	24.23	15.29	53.28	
3	5905 - 6432		234.11	23.16	16.41	53.79	
4	6433 - 7056		274.44	24.73	18.51	56.54	
5	2904 - 5088	FPC02	246.30	23.68	15.67	54.00	52.94
6	5112 - 5904		289.50	25.06	15.29	50.04	
7	5905 - 6432		234.11	23.20	16.41	52.83	
8	6433 - 7056		274.44	24.95	18.51	54.89	
9	2904 - 5088	ETC01	246.30	28.19	15.67	61.26	66.58
10	5112 - 5904		289.50	25.52	15.29	66.12	
11	5905 - 6432		234.11	25.13	16.41	69.16	
12	6433 - 7056		274.44	26.15	18.51	69.76	
13	2904 - 5088	ETC02	246.30	32.21	15.67	57.95	64.86
14	5112 - 5904		289.50	28.28	15.29	63.87	
15	5905 - 6432		234.11	26.58	16.41	69.05	
16	6433 - 7056		274.44	28.50	18.51	68.55	

Por último, en la Tabla 8 se colocaron las eficiencias (Ecuación 12), de los colectores con su respectiva orientación y ángulo de inclinación donde, se puede observar que, a menor ángulo de inclinación, las eficiencias aumentan ya sea para los colectores solares de placa plana y tubo al vacío, de igual forma varía según la orientación.

Tabla 8 Variación de la eficiencia según la orientación y ángulo de inclinación. Fuente: (Autores,2021).

Nº SIMULACION	PERIODO DE HORAS	COLECTOR	INCLINACION	ORIENTACION	AZIMUT °	EFICIENCIA (%)
1	2904 - 5088		14°	ESTE	90	52.73
2	5112 - 5904	FPC01	45°	NORTE	0	53.28
3	5905 - 6432		26°	NORTE	0	53.79
4	6433 - 7056		18°	NORTE	0	56.54
5	2904 - 5088		14°	NORTE	0	54.00
6	5112 - 5904	FPC02	45°	ESTE	90	50.04
7	5905 - 6432		26°	ESTE	90	52.83
8	6433 - 7056		18°	ESTE	90	54.89
9	2904 - 5088		14°	SUR	180	61.26
10	5112 - 5904	ETC01	45°	SUR	180	66.12
11	5905 - 6432		26°	SUR	180	69.16
12	6433 - 7056		18°	SUR	180	69.76
13	2904 - 5088		14°	OESTE	270	57.95
14	5112 - 5904	ETC02	45°	OESTE	270	63.87
15	5905 - 6432		26°	OESTE	270	69.05
16	6433 - 7056		18°	OESTE	270	68.55

3.1. Discusión

En base a los resultados obtenidos en este estudio, se puede observar que existen algunos métodos para validar los modelos de sistemas transitorios. Moreno (2015) desarrolla un modelo dinámico en TRNSYS, para simular el comportamiento energético de una piscina y estadísticamente calcula un error relativo promedio de 7.83%. De la misma forma, Kazdaba et al., (2018) realiza una validación experimental de un modelo para el calentamiento de agua por circulación forzada y aplica en su estadística el cálculo del error porcentual absoluto medio obteniendo 12.5%. Mientras tanto, Afzanizam et al., (2020) realiza un modelo transitorio para simular la producción de agua caliente para un hospital y para la validación utiliza la estadística del error porcentual con la cual estima un error de 6.6%. Finalmente, en este estudio se realizan dos métodos de validación estadística, primero el cálculo del error porcentual del modelo resultando un valor de 5.79% y la prueba de Ji Cuadrada que indica que los datos siguen una misma distribución con los datos reales. Las pruebas estadísticas permiten verificar la fiabilidad del sistema reduciendo el sesgo de error al momento de su implementación.

En los modelos utilizados por Kazdaba et. al., (2018) y Tiwari et. al., (2020) se consideran las pérdidas térmicas tanto del tanque de almacenamiento como de los colectores, mientras que, Moreno (2015) , Afzanizam et. al., (2020) y en el presente estudio estas pérdidas han sido despreciadas. El considerar las pérdidas en los sistemas de simulación permite reducir el error calculado aumentando la fiabilidad del modelo.

Se ha verificado que factores climáticos influyen directamente en la eficiencia de un sistema de calentamiento de agua. Tiwari et. al. (2020) en las condiciones climáticas de Gujarat - India, con una latitud de $22^{\circ} 18' 33''$ N y longitud $72^{\circ} 08' 10''$, a una temperatura ambiente promedio de 32°C con cielos despejados, simula un sistema de calentamiento de agua usando FPC, y alcanza una temperatura promedio de 49.90°C con un rango de eficiencia de 55% a 65%. Al igual que, Yang et al., (2018) en Tianjin - China a $39^{\circ} 08' 32''$ de latitud y $117^{\circ} 10' 00''$ de longitud aplica TRNSYS para analizar el rendimiento de un sistema de colectores solares de placa plana con una temperatura ambiente promedio de 20°C y obtiene una temperatura aproximada de 45°C con una eficiencia de 55%. Así mismo, Campos (2015) analiza la viabilidad de la generación energética de un sistema solar forzado en Concepción Chile, la temperatura ambiente promedio es de 17°C a $36^{\circ} 49' 37''$ de latitud y $73^{\circ} 03' 00''$ de longitud, para una vivienda de 4 personas y consigue una eficiencia de 55.6%. En este estudio se calienta agua a una temperatura en un rango de 25°C a 40°C y se calcula una eficiencia de 56.54% con una temperatura ambiente promedio de 15°C y $2^{\circ} 54' 02''$ de latitud sur y $79^{\circ} 00' 39''$ de longitud oeste. Esto indica que las principales condiciones climáticas como temperatura ambiente, nubosidad, velocidad del viento que dependen de la latitud, influyen directamente en la eficiencia de un sistema al momento de calentar agua.

En cuanto a los factores técnicos de los sistemas como área de captación de los colectores y el volumen de almacenamiento de los tanques. Campos, (2015) expone en su estudio de viabilidad energética que al reducir la capacidad de almacenamiento a 160 L disminuye la eficiencia general del sistema. Mientras que usando 300 L la eficiencia aumenta a 55.6%, sin embargo, al aumentar dicho almacenamiento a 500 L la eficiencia vuelve a disminuir. Por otro lado, Tiwari et. al. (2020), Kazdaba et. al. (2018) y Afzanizam et. al. (2020), usan colectores solares de placa plana con un área de captación de 5m^2 , 2m^2 y 5m^2 respectivamente. Para esta investigación se utilizan colectores FPC y ETC con un área de captación de 2m^2 y 3m^2 y un volumen de almacenamiento de 200 L y 300 L respectivamente Los autores coinciden que usando volúmenes de almacenamiento entre

200 L a 400 L y mientras mayor sea el área de captación, se obtienen mejores eficiencias de estos sistemas de calentamiento de agua.

La orientación y el ángulo de inclinación de los paneles solares son también factores que influyen en la eficiencia de los mismos. Existen tablas que indican que para latitudes entre 0° y 15° el ángulo de inclinación óptimo es de 15° , y para latitudes de 15° a 25° este ángulo será igual a la latitud (Alvarez, 2017). De igual forma, Álvarez et. al. (2017) analizan el ángulo y orientación óptimo para maximizar la captación en la ciudad de Cuenca y obtiene una posición óptima al Noreste y una inclinación de 16° . Del mismo modo, (SERRANO,2021), en su estudio estiman los ángulos óptimos de inclinación y orientación en el caso de Ecuador obteniendo como resultados generales que la inclinación óptima de una superficie plana debe estar entre 12° y 19° y la orientación entre 20° a 60° con respecto al Norte. En esta investigación, el colector solar de placa plana más eficiente fue orientado al Norte y con una inclinación de 18° y el de tubo al vacío orientado al Sur y con 18° de inclinación. Los resultados obtenidos concuerdan con la teoría debido a que, al encontrarse el sistema en latitud Sur, los colectores orientados al norte son mucho más eficientes. En el caso del ETC no se puede estimar su eficiencia orientado al norte dado que, los ángulos que se consideraron fueron al Sur y Este.

4. CAPITULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- En esta investigación se caracterizó un sistema de colectores solares para la obtención de ACS empleando el modelo TRNSYS, bajo las condiciones de operación en la ciudad de Cuenca. Los resultados de la validación muestran una buena correlación entre los resultados simulados y los datos reales, por lo que para los colectores FPC1, FPC2, ETC1 y ETC2 los errores calculados son 5.79%, 6.20%, 5.60% y 5.59% respectivamente. Según las pruebas de distribución de Ji Cuadrada, el modelo de simulación muestra una buena concordancia entre las predicciones en comparación con el experimento.
- Se levantó la información del sistema de colectores solares, obteniendo 4152 datos de temperatura de agua del sistema instalado y de radiación global, en un periodo de seis meses de funcionamiento con una frecuencia de 10 min. Obteniendo como resultados principales la temperatura promedio de agua para FPC1 23.99°C, FPC2 24.23°C, ETC1 26.25°C y ETC2 28.89°C. Las eficiencias calculadas para los colectores mencionados son 54.09%, 52.94%, 66.58% y 64.86% respectivamente.
- Con el modelo realizado se simuló el comportamiento del sistema. El modelo permitió visualizar las temperaturas de agua y las eficiencias del sistema, concluyendo que un sistema conformado por un colector de placa plana de 2m² y un tanque de almacenamiento de 200 L puede satisfacer aproximadamente el 50% de la demanda de agua de una vivienda de 4 personas con un consumo de 200 L por día. Mientras que un sistema

conformado por un colector de tubo al vacío de 3m^2 y un tanque de almacenamiento de 300 L puede satisfacer cerca del 60% de esta demanda.

- A pesar de que los datos de radiación solar son favorables por la ubicación geográfica de la ciudad de Cuenca, las eficiencias de los colectores se vieron limitadas por factores climáticos, como la temperatura ambiente que oscila entre los 14°C y 15°C y el índice de claridad de 0.22 que indica cielos nublados en la mayor parte del año. Por ello, se requiere de un sistema auxiliar que ayude a satisfacer las necesidades de agua caliente en los periodos de baja radiación solar y alta nubosidad.

4.2. Recomendaciones

- Para futuros trabajos de investigación se recomienda considerar las pérdidas de calor tanto en el almacenamiento como en los colectores para obtener datos más precisos y variar en los ángulos de inclinación y orientación en especial el ETC que solamente se analizó orientado al Sur y al Oeste.
- Se recomienda realizar modelos con otros programas de simulación disponibles, para comparar los resultados obtenidos y verificar la precisión de los softwares.

BIBLIOGRAFÍA

- Afzanizam, M., Rosli, M., Naidu, L., Naido, P., Khairul, M., Sharif, A., & Saputra, M. (2020). *Domestic hot water production from flat plate solar collector using transient system simulation software (TRNSYS) in hospital thermal-fluid applications. December, 229–230.*
- Aguirre, J. (2018). *Análisis De La Matriz Energética Ecuatoriana Y Plan De Desarrollo Energético Sostenible Para La Ciudad De Machala. 1–80.*
<https://riunet.upv.es:443/handle/10251/106306>
- Ahamed, M. S., Guo, H., & Tanino, K. K. (2016). Modeling of heating requirement in Chinese Solar Greenhouse. *2016 American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting, ASABE 2016, November.*
<https://doi.org/10.13031/aim.20162455669>
- Albarracin Vélez, G. (2016). *Análisis De Morfología Urbana Para La Optimización De Captación Solar En El Periurbano De Cuenca - Ecuador.*
https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/100243/86BCN_AlbarracinGiovanny.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Alonso, H. C. (2021). Impact of renewable energies on greenhouse gas emissions in Mexico. *Problemas Del Desarrollo, 52(204), 59–83.*
<https://doi.org/10.22201/IIEC.20078951E.2021.204.69611>
- Alvarez Lozano, D. A. (2017). *Evaluación de la orientación y el ángulo de inclinación óptimo de una superficie plana para maximizar la captación de irradiación solar en Cuenca-Ecuador. 7, 74–77.*
- Barragan, A., & Espinoza, J. (2015). Políticas para la promoción de las energías

- renovables en Ecuador. In *Universidad de Cuenca* (Issue January 2016).
- Barragán, E. A. (2018). *El autoabastecimiento energético en los países en vías de desarrollo en el marco del metabolismo urbano: caso cuenca, ecuador*. 1–373.
- Blaga, R., Sabadus, A., Stefu, N., Dughir, C., Paulescu, M., & Badescu, V. (2019). A current perspective on the accuracy of incoming solar energy forecasting. *Progress in Energy and Combustion Science*, 70, 119–144.
<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.10.003>
- Calle - Sigüencia, J., & Tinoco - Gómez, O. (2018). Obtención de ACS con energía solar en el cantón Cuenca y análisis de la contaminación ambiental. *Ingenius*, 19, 89–101.
<https://doi.org/10.17163/ings.n19.2018.09>
- Calle, J., & Tinoco, O. (2018). Obtención de ACS con energía solar en el cantón Cuenca y análisis de la contaminación ambiental. *Ingenius*, 19, 90.
<https://doi.org/10.17163/ings.n19.2018.09>
- Campos, P. (2015). *Evaluación técnico-económico de alternativas de generación energética in situ en viviendas en Concepción*.
- Cañar, D. (2014). *Energía Solar Térmica para generación de electricidad en el Ecuador*. 94. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/20895/1/Tesis.pdf>
- Caranqui, J. (2018). *Simulacion de un Sistema de Enfriamiento con Rueda Desecante, Hibrido mediante el Sofrware TRNSYS 17*.
- Correa, F., Gonzáles, D., & Pacheco, J. (2016). Energías renovables y medio ambiente. Su regulacion en Ecuador. *Revista Científica Universidad y Sociedad*, 8, 150.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*.

- Fernandez-Bravo, M., & Cacabelos, A. (2015). *Análisis del sistema de climatización del Centro Universitario de la Defensa*. 2014–2015.
- Forero, N., & Garzón, P. (2020). *Medida de la eficiencia de un colector solar de placa plana, mediante un montaje experimental desarrollado con instrumentación virtual*. 24(65), 109–124. <https://doi.org/10.14483/22487638.1>
- García, V. O., & Ituna, Y. J. F. (2020). Energy, economic and emissions avoided contribution of domestic solar water heating systems for Mexico, Costa Rica and the Democratic Republic of the Congo. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 39(April), 100721. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100721>
- Giglio, T., Santos, V., & Lamberts, R. (2019). Analyzing the impact of small solar water heating systems on peak demand and on emissions in the Brazilian context. *Renewable Energy*, 133, 1404–1413. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.104>
- Guamán, J., García, M., Guevara, D., & Ríos, A. (2016). Evaluación del Impacto Económico en Diferentes Escenarios de Implementación de Tecnologías Eficientes de Calentamiento de Agua en el Ecuador. *Revista Técnica “Energía,”* 12(1), 270–283. <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v12.n1.2016.52>
- Hernández, A. (2016). *Modelado Orientado a Objetos y Simulación de Sistemas Solares Térmicos en Edificios*. 1, 1–7. <https://es.slideshare.net/RafaelMiranda2/modelado-orientado-a-objetos>
- Hinojosa, J. (2017). “Diagnóstico térmico para la instalación de un sistema para calentamiento de agua de uso sanitario unifamiliar utilizando energía solar térmica en la comunidad de río blanco, provincia de Tungurahua.” *Jurnal Sains Dan Seni ITS*, 14(1), 141. <http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf%0Ahttp://fiskal.kemenkeu.go.id/ejo>

urnal%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.001%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2016.12.055%0Ahttps://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.02.006%0Ahttps://doi.org/10.1

IEA (International Energy Agency). (2018). World Energy Outlook 2018: Highlights. *International Energy Agency*, 1, 1–661. https://www.oecd-ilibrary.org/energy/world-energy-outlook-2018/executive-summary_weo-2018-2-en

Jamar, A., Majid, Z. A. A., Azmi, W. H., Norhafana, M., & Razak, A. A. (2016). A review of water heating system for solar energy applications. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 76, 178–187. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.05.028>

Kazdaba, H., Bah, A., Idlimam, R., Ansari, O., Malha, M., & Asbik, M. (2018). Experimental validation of TRNSYS model of an indirect solar water heater with forced circulation in various weather: Application to Rabat (Morocco). *Proceedings of 2017 International Conference on Electrical and Information Technologies, ICEIT 2017, 2018-Janua*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/EITech.2017.8255260>

Levy, G. (2018). Mathematical Reference. *Energy Power Risk*, 4, 291–295. <https://doi.org/10.1108/978-1-78743-527-820181015>

Madriz, R., & Nandwani, S. (2016). *Breve Reseña Histórica de la Primera Asociación Costarricense de Energía Solar (ACES)*. 2, 1–9.

Manuel Moreno Nicolás. (2015). *Desarrollo de un modelo dinámico para la simulación del comportamiento energético de una piscina climatizada*. 61. <http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/5273/tfg647.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Marmoush, M. M., Rezk, H., Shehata, N., Henry, J., & Gomaa, M. R. (2018). A novel merging Tubular Daylight Device with Solar Water Heater – Experimental study. *Renewable Energy*, 125, 947–961. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.031>
- MERNNR. (2019). *Balance Energetico Nacional*.
- Navntoft, C., & Cristófalo, M. P. (2019). Introducción a la energía solar térmica. In <https://www.Argentina.Gob.Arwww.Argentina.Gob.Ar>.
- Ochoa, N., & Santos, M. (2016). *Modeling and Simulation of a Solar-Thermal System for its Efficient Implementation in Quito*. 14(5), 2271–2279.
- OLADE. (2019). *Panorama Energético de América Latina y el Caribe 2019*.
- Parreño, J., Oscar, L., Rommel, J., Caicedo, H., & Sarzosa, D. (2020). *Diseño de una módulo de Energía Solar como estrategia de ahorro energético y disminución de la emisión de CO2*. 4–18.
- PDOT. (2015). *Plan de Desarrollo y Ordenación Territorial 2011 -2030*.
- Puig, S. E., Aguirre, G., Maidana, A., & Fontanetto, L. D. (2018). Sistema de ahorro energético basado en colectores solares para dotar de agua caliente sanitaria (ACS) a una vivienda social de 2 dormitorios en la ciudad de Santa Fe. *Arquitecno*, 12, 134. <https://doi.org/10.30972/arq.0124185>
- Rodríguez Patarroyo, D. J., Hernandez, J., & Simbaqueva, O. (2015). Análisis Estadístico Del Índice De Claridad Atmosférica Para La Ciudad De Bogotá. *Revista Científica*, 1(21), 65. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.rc.2015.21.a6>
- Rodríguez, R., López, F., Araiza, M., Olvera, C., & Santiago, D. (2016). Diseño de un colector solar de placa plana. *Ingeniería Energética*, XXXVII(1), 15–24.

- Sadiq, M. (2018). Solar water heating system for residential consumers of Islamabad , Pakistan : A cost bene fi t analysis. *Journal of Cleaner Production*, 172, 2443–2453. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.166>
- Sanchez, A. (2019). “ *Modelo dinamico con ajuste experimental de una instalación de colectores solares .*”
- Sandoval, S., Córdoba, J., Khdy, R. I., Lq, P., Fdfdr, R., Furs, F., Oihgr, X. J. R., Xsdqtxl, X., Huauya-rojas, M. Á., Mansilla-minaya, L. G., Vh, W., Orv, H., Gh, F., Sorpr, F., Vxhorv, H. Q., Gho, K., Hq, F., Uhjlrqhv, H., Químico, T. D. E. I., ... De la Torre, C. M. H. (2015). La Universidad Católica de Loja. *Facultad de Ciencias Quimicas*, 16(3), 66. [http://www.ispch.cl/sites/default/files/documento_tecnico/2010/12/Guia T?cnica 1 validaci?n de M?todos y determinaci?n de la incertidumbre de la medici?n_1.pdf](http://www.ispch.cl/sites/default/files/documento_tecnico/2010/12/Guia_Tecnica_1_validaci?n de M?todos y determinaci?n de la incertidumbre de la medici?n_1.pdf)
- Santamarta, J. (2016). Las energías renovables son el futuro. *Mapping*, 99, 68–83.
- Shah, T. R., & Ali, H. M. (2019). Applications of hybrid nanofluids in solar energy, practical limitations and challenges: A critical review. *Solar Energy*, 183(February), 173–203. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.012>
- Shrivastava, R. L., Kumar, V., & Untawale, S. P. (2017). Modeling and simulation of solar water heater: A TRNSYS perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 126–143. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.005>
- Singh, S., Anand, A., Shukla, A., & Sharma, A. (2021). Environmental, technical and financial feasibility study of domestic solar water heating system in India. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 43(June 2020), 100965. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100965>

- Tiwari, A. K., Gupta, S., Joshi, A. K., Raval, F., & Sojitra, M. (2020). TRNSYS simulation of flat plate solar collector based water heating system in Indian climatic condition. *Materials Today: Proceedings*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.794>
- Troncoso, K., & Soares da Silva, A. (2017). LPG fuel subsidies in Latin America and the use of solid fuels to cook. *Energy Policy*, 107(January), 188–196. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.04.046>
- Urmee, T., Walker, E., Bahri, P. A., Baverstock, G., Rezvani, S., & Saman, W. (2018). Solar water heaters uptake in Australia – Issues and barriers. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 30(November 2017), 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.08.006>
- Yang, B., Liu, J., Hao, M., & Gao, L. (2018). Study on performance of solar water heating system using TRNSYS software. *Chemical Engineering Transactions*, 70, 2071–2076. <https://doi.org/10.3303/CET1870346>

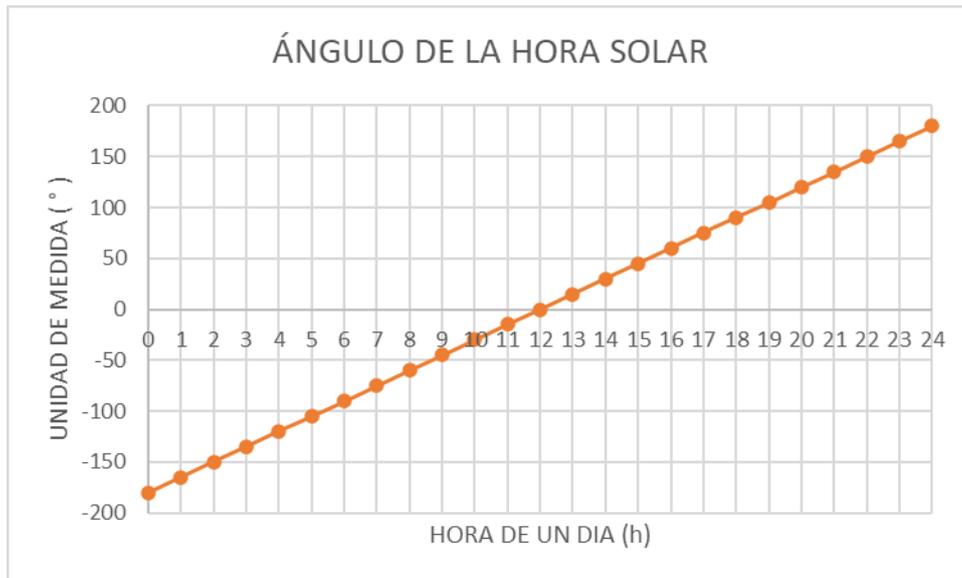
4. ANEXOS

Anexo 1

FICHA TECNICA DEL SISTEMA DE COLECTORES SOLARES			
COLECTOR TUBO DE VACIO		COLECTOR PLACA PLANA	
Nombre:	ETC-20 Apricus Solar Collector	Nombre:	FPC-E20 Flat Plate Collector
Cantidad:	2	Cantidad:	2
Dimensiones (LxWxH):	2005 x 1496 x 136 mm	Dimensiones (LxWxH):	2000 x 1000 x 70 mm
Área de Apertura:	1.89 m ²	Área de Apertura:	1.824 m ²
Superficie Total:	3 m ²	Superficie Total:	2.0 m ²
Peso Total Seco:	63.5 kg	Peso Total Seco:	30 kg
Capacidad de Fluido:	550 ml	Capacidad de Fluido:	1500 ml
Presión Máxima	800 kPa	Presión Máxima	900 kPa
Potencia Máxima	1342 W	Potencia Máxima	1170 W
BOMBA DE CIRCULACION DE AGUA			
Nombre:	Star- RS15/16		
Cantidad:	4		
Potencia Máxima	99 W		
Presión Máxima de Trabajo	10 bar		
Temperatura Mínima del Fluido	(-10 °C)		
Temperatura Máxima del Fluido	(110°C)		
Velocidad Máxima	1900 rpm		
TANQUE DE ALMACENAMIENTO		TANQUE DE ALMACENAMIENTO	
Capacidad:	300 litros	Capacidad:	200 litros

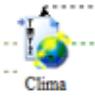
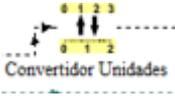
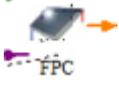
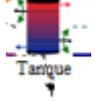
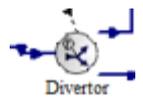
Anexo 1 Ficha técnica de los componentes del sistema. (Autores,2021).

Anexo 2



Anexo 2 Ángulo de la hora solar. (Autores, 2021).

Anexo 3

COMPONENTES UTILIZADOS		
	TYPE 109	Lector de datos y procesador de radiación
	TYPE 57	Convertidor de unidades
	TYPE 3	Bomba de circulación de agua
	TYPE 1	Colector solar de placa plana
	TYPE 71	Colector solar de Tubo al vacio
	TYPE 2	Controlador diferencial de encendido y apagado
	TYPE 4	Tanque de almacenamiento del ACS
	TYPE 65	Impresora grafica online con archivos de salida
	TYPE 11	Conector en T
	TYPE 24	Integrador de datos
	TYPE 25	Impresora de resultados diarios

Anexo 3 Componentes utilizados de la biblioteca de TRNSYS. Fuente: (Autores, 2021).

Anexo 4

Horario / Colector	ETC01	ETC02	FPC01	FPC02	Volumen (L)
Mañana 1 (am)	06:05	06:00	06:15	06:10	52
Mañana 2 (am)	07:00	06:55	07:10	07:05	20
Mañana 3 (am)	07:55	07:50	08:05	08:00	8
Tarde 1 (pm)	12:15	12:00	12:45	12:30	16
Tarde 2 (pm)	13:30	13:15	14:00	13:45	16
Noche 1 (pm)	19:05	19:00	19:15	19:10	16
Noche 2 (pm)	20:00	19:55	20:10	20:05	20
Noche 3 (pm)	20:55	20:50	21:05	21:00	52

Anexo 4 Horarios de consumo. (Autores,2021)

Anexo 5

D	M	H	Bh	Dh	Ta	FF	RH
-	-	-	W/m2	W/m2	°C	m/s	%
1	5	1	0.0	0.0	12.1	2.70	93
1	5	2	0.0	0.0	11.7	3.40	98
1	5	3	0.0	0.0	11.4	3.60	100
1	5	4	0.0	0.0	11.2	3.00	97
1	5	5	0.0	0.0	11.1	1.50	97
1	5	6	0.0	6.1	10.9	1.30	97
1	5	7	0.2	49.1	11.1	1.80	95
1	5	8	0.44	80.7	13.0	2.70	84
1	5	9	1.46	145.5	14.8	4.10	82
1	5	10	4.5	254.3	16.5	4.10	73
1	5	11	3.4	216.5	17.9	3.60	66
1	5	12	5.8	286.5	19.0	4.10	62
1	5	13	4.1	242.0	19.9	3.40	59
1	5	14	3.2	213.9	20.5	2.20	56
1	5	15	5.3	275.3	20.7	1.50	57
1	5	16	1.8	162.3	20.5	1.50	58
1	5	17	0.1	42.3	19.8	1.50	60
1	5	18	0.0	3.5	18.8	1.80	64
1	5	19	0.0	0.0	17.6	1.00	79
1	5	20	0.0	0.0	17.0	0.50	91
1	5	21	0.0	0.0	16.4	0.40	91
1	5	22	0.0	0.0	15.8	0.70	93
1	5	23	0.0	0.0	15.2	0.40	93
1	5	24	0.0	0.0	14.6	0.80	96
2	5	1	0.0	0.0	14.1	0.90	98
2	5	2	0.0	0.0	13.5	1.10	98
2	5	3	0.0	0.0	13.0	1.60	97
2	5	4	0.0	0.4	12.7	1.60	98
2	5	5	0.0	0.0	12.4	1.10	98
2	5	6	0.0	6.1	12.2	0.90	98
2	5	7	0.0	34.0	12.4	0.50	100
2	5	8	0.9	116.8	13.2	0.20	97
2	5	9	2.6	194.2	14.3	0.30	94

Anexo 5 Formato de texto para radiación. (Autores, 2021).

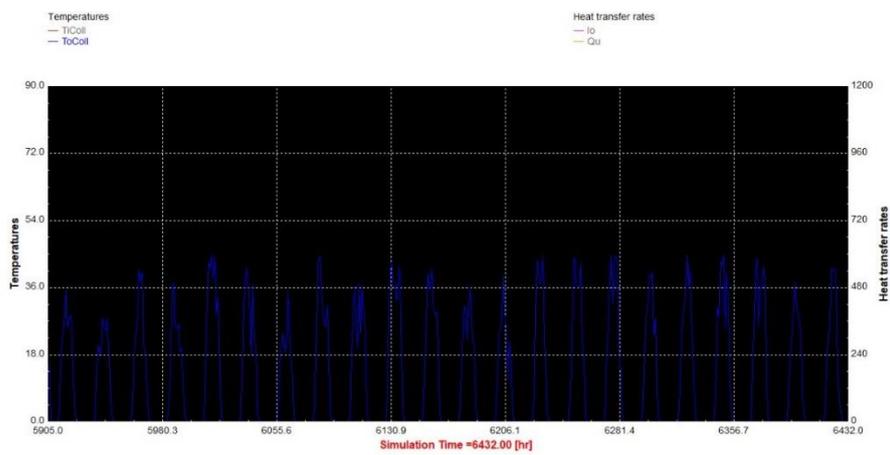
Anexo 6

N° SIMULACION	PERIODO DE HORAS	COLECTOR	INCLINACION	ORIENTACION	AZIMUT °
1	2904 - 5088		14°	ESTE	90
2	5112 - 5904	FPC01	45°	NORTE	0
3	5905 - 6432		26°	NORTE	0
4	6433 - 7056		18°	NORTE	0
5	2904 - 5088		14°	NORTE	0
6	5112 - 5904	FPC02	45°	ESTE	90
7	5905 - 6432		26°	ESTE	90
8	6433 - 7056		18°	ESTE	90
9	2904 - 5088		14°	SUR	180
10	5112 - 5904	ETC01	45°	SUR	180
11	5905 - 6432		26°	SUR	180
12	6433 - 7056		18°	SUR	180
13	2904 - 5088		14°	OESTE	270
14	5112 - 5904	ETC02	45°	OESTE	270
15	5905 - 6432		26°	OESTE	270
16	6433 - 7056		18°	OESTE	270

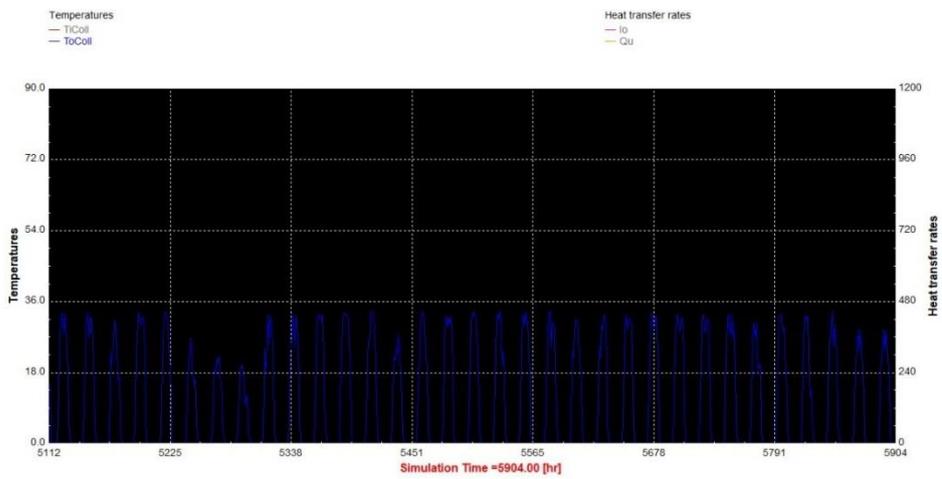
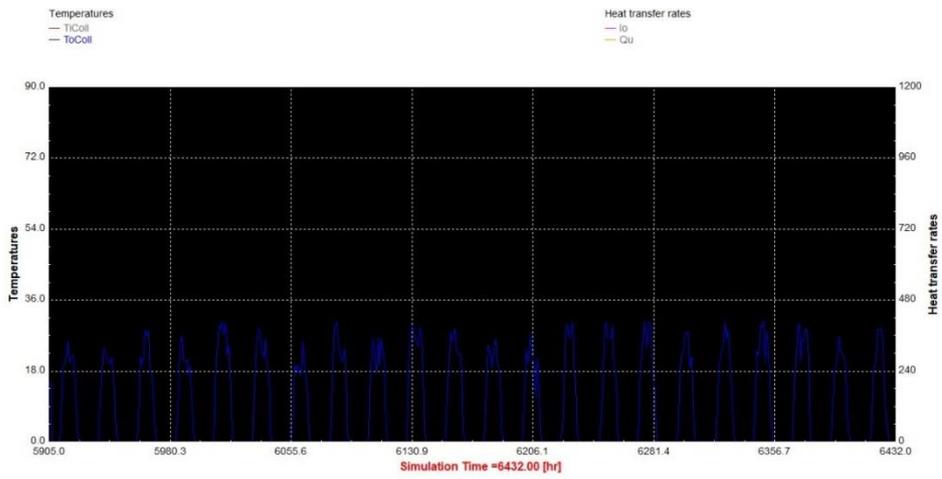
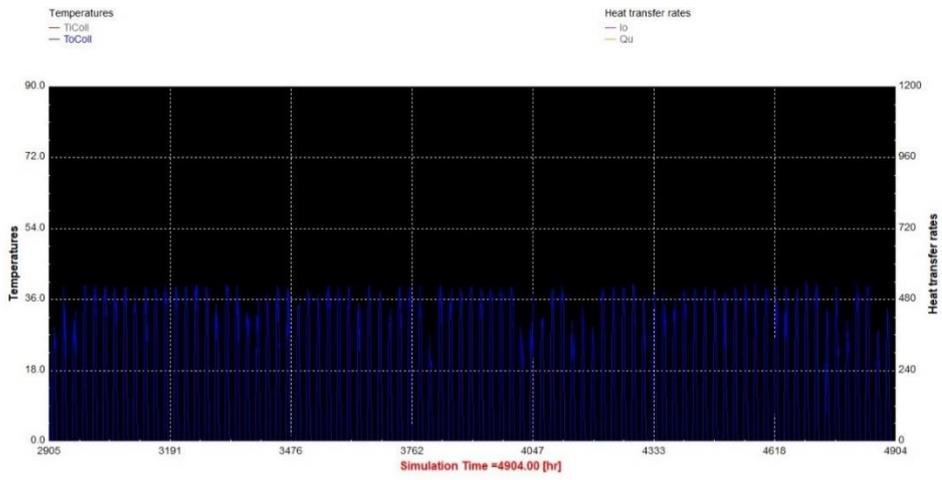
Anexo 6 Simulaciones realizadas del sistema de colectores solares (Autores,2021).

Anexo 7

ETC



FPC



Anexo 7 Gráficas de simulación en TRNSYS