

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**EVALUACIÓN DEL USO DE ACEITE DE PALMA Y BIODIÉSEL COMO  
FLUIDOS DE TRANSFERENCIA DE ENERGÍA TÉRMICA Y SU APLICACIÓN  
EN SISTEMAS DE COLECCIÓN TERMOSOLAR**

PROYECTO DE GRADUACIÓN SOMETIDO A LA CONSIDERACIÓN DE LA ESCUELA DE  
INGENIERÍA QUÍMICA COMO REQUISITO FINAL PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA

**JOSÉ FABRICIO RODRÍGUEZ ACEVEDO**

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

San José, Costa Rica

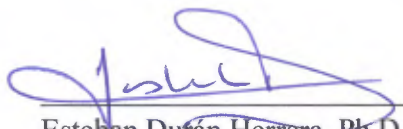
2019

# TRIBUNAL EXAMINADOR

Proyecto de graduación sometido a consideración de la Escuela de Ingeniería Química como requisito final para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Química

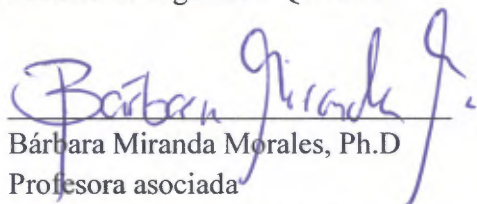
José Fabricio Rodríguez Acevedo  
Sustentante

**Aprobado por:**



Esteban Dufán Herrera, Ph.D  
Profesor catedrático  
Escuela de Ingeniería Química

Presidente del tribunal



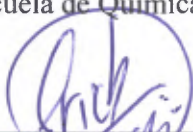
Bárbara Miranda Morales, Ph.D  
Profesora asociada  
Escuela de Ingeniería Química

Directora del proyecto



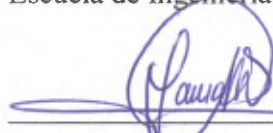
Julio Mata Segreda, Ph.D  
Profesor catedrático  
Escuela de Química

Miembro lector



Lic. Esteban Richmond Salazar  
Profesor interino  
Escuela de Ingeniería Química

Miembro lector



Licda. Laura Saborío Marín  
Profesora interina  
Escuela de Ingeniería Química

Miembro invitado

“Nunca dejes que tu sentido de la moral te impida hacer lo correcto”

*Isaac Asimov*

## **DEDICATORIA**

Quiero dedicar este trabajo a mi madre, Athenia, que con su ejemplo de superación y perseverancia me ha enseñado a luchar por lograr mis metas y hacerme la persona que soy.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por permitirme finalizar esta etapa de mi vida, con la compañía de grandes personas.

A mis padres, Athenia y Vicente, a mis hermanos, Henry, Adinia y Natalia por su apoyo incondicional durante todo este largo, pero satisfactorio proceso.

A Dani, por su apoyo y compañía durante todo este tiempo, por siempre estar en las buenas y en las malas.

A Don Julio, por ser un gran mentor que con su confianza, paciencia y colaboración logro concluir esta gran etapa de mi vida.

A mis amigos y compañeros, que hicieron de la universidad una gran experiencia, a José, Stefano, Jorge, Gustavo, Felipe, Andrés y Diego, grandes amigos de la universidad y de la vida.

A los ingenieros Bárbara y Esteban, por su apoyo y colaboración.

Al Laboratorio de Biomásas de la Escuela de Química.

Al CIGEFI, la Sección de Transportes, el Taller de Soldadura y de Ebanistería, por su colaboración en el proyecto.

## RESUMEN

Se llevó a cabo la evaluación del uso de aceite de palma y biodiésel como fluidos de transferencia de energía térmica y posteriormente se analizó su comportamiento en sistemas de colección termo solar. Fue realizado en el Laboratorio de Biomásas de la Escuela de Química de la Universidad de Costa Rica.

La variable de estudio en la primera parte de la investigación fue el flujo neto relativo de calor para cada uno de los fluidos estudiados (agua, aceite de palma, biodiésel H&M, biodiésel EB y la mezcla 50:50 de ambas muestras de biodiésel), la cual se obtuvo mediante la curva de enfriamiento de Newton y de los parámetros de ajuste de cada modelo de transferencia obtenido.

Con los resultados obtenidos en la parte anterior, se determinó la eficiencia térmica del prototipo de colector termosolar, llevado a cabo con agua como patrón de referencia y con el líquido con mejores propiedades de transporte obtenidas en la primera parte del estudio.

Se determinó que, en promedio, la mezcla de biodiésel corresponde al fluido donde se obtuvo una mayor eficiencia de intercambio de calor, además, entre mayor sea la temperatura inicial de este, mayor será el tiempo efectivo de transferencia de calor, pues en la corrida 6, que es la que presenta la mayor temperatura inicial (superior a 100 °C), se empiezan a obtener pérdidas hacia el ambiente pasados los 35 min. Adicionalmente, para el prototipo construido de colector termosolar, se obtuvieron eficiencias promedio de transferencia de calor de 42.92 % para cuando se utilizó agua y de 23.43 % cuando se utilizó a mezcla de biodiésel.

Se concluye que la mezcla de ambas muestras de biodiésel utilizados presenta un flujo neto de calor adecuado para su utilización en sistemas de calentamiento termosolar, en comparación a los demás fluidos estudiados, además, entre mayor sea la temperatura inicial que alcance éste, mayor será la eficiencia de transferencia de calor hacia el líquido frío.

Se recomienda realizar una caracterización de los ácidos grasos presentes en la mezcla de biodiésel con el fin de poder realizar estudios con estos de forma separada y poder predecir y comprobar el efecto de cada uno de ellos en el compuesto global (biodiésel).

# ÍNDICE GENERAL

Dedicatoria.....	v
Agradecimientos .....	vii
Resumen.....	ix
Introducción.....	1
Alcances del proyecto .....	2
CAPÍTULO 1. Fundamento teórico.....	5
1.1 Generalidades de la energía solar .....	5
1.2 Colector solar térmico.....	8
1.3 Eficiencia de colectores planos.....	12
1.4 Propiedades del aceite de palma y biodiésel.....	13
1.4.1 Aceite de palma .....	13
1.4.2 Biodiésel .....	14
1.5 Parámetros de transferencia de energía térmica .....	16
1.5.1 Capacidad calorífica .....	16
1.5.2 Conductividad térmica.....	17
1.5.3 Difusividad térmica.....	18
CAPÍTULO 2. Metodología Experimental.....	21
2.1 Materiales y equipos .....	21
2.2 Variables y factores experimentales .....	22
2.2.1 Variables de estudio.....	22
2.2.2 Variable de estímulo .....	22
2.2.3 Variables fijas .....	23
2.2.4 Variable de respuesta .....	23
2.3 Diagrama experimental.....	23
2.4 Procedimiento experimental .....	25
2.4.1 Estudio de las propiedades térmicas de los fluidos de interés .....	25

2.4.2	Diseño y construcción del prototipo de colector solar.....	27
2.4.3	Toma de datos en el prototipo de colector solar .....	27
CAPÍTULO 3. Análisis de Resultados .....		29
3.1	Evaluación del aceite de palma y biodiésel como fluidos de transferencia de energía térmica .....	29
3.1	Evaluación de la eficiencia de intercambio de calor en el prototipo de colector solar .....	40
CAPÍTULO 4. Conclusiones y Recomendaciones .....		45
4.1	Conclusiones.....	45
4.2	Recomendaciones .....	46
CAPÍTULO 5. Nomenclatura .....		47
CAPÍTULO 6. Bibliografía .....		49
Apéndice A: Datos experimentales.....		54
Apéndice B: Resultados intermedios .....		76
Apéndice C: Muestra de cálculos .....		84



## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.1.</b> Propiedades del biodiésel según la norma ASTM D6751 (ASTM International, 2008).....	15
<b>Cuadro 1.2.</b> Capacidad calorífica de algunas sustancias (Rodríguez et al., 2018).....	17
<b>Cuadro 1.3.</b> Flujo térmico inducido volumétrico de algunas sustancias (Rodríguez et al., 2018).....	18
<b>Cuadro 2.1.</b> Constantes físicas y químicas de las sustancias utilizadas (Perry & Green, 2008; Rodríguez et al., 2018).....	21
<b>Cuadro 2.2.</b> Equipos utilizados en el desarrollo del proyecto .....	22
<b>Cuadro 3.1.</b> Resultados obtenidos de la eficiencia del colector solar .....	41
<b>Cuadro A.1.</b> Información básica de las corridas de agua caliente a ambiente .....	55
<b>Cuadro A.2.</b> Información básica de las corridas de agua hacia agua sin aislamiento .....	56
<b>Cuadro A.3.</b> Información básica de las corridas de agua a ambiente con el tanque aislado.....	58
<b>Cuadro A.4.</b> Información básica de las corridas de agua caliente a agua con aislamiento .....	61
<b>Cuadro A.5.</b> Información básica de las corridas aceite caliente a agua fría con aislamiento .....	63
<b>Cuadro A.6.</b> Información básica de las corridas de biodiésel H&M a agua fría con aislamiento .....	66
<b>Cuadro A.7.</b> Información básica de las corridas de biodiésel EB a agua con aislamiento.....	68
<b>Cuadro A.8.</b> Información básica de las corridas de biodiésel mezcla a agua fría con aislamiento .....	71
<b>Cuadro A.9.</b> Determinación de la densidad de la mezcla de biodiésel.....	72
<b>Cuadro A.10.</b> Corrida 1 del colector solar.....	72
<b>Cuadro A.11.</b> Corrida 2 del colector solar.....	73
<b>Cuadro A.12.</b> Corrida 3 del colector solar.....	73
<b>Cuadro A.13.</b> Corrida 4 del colector solar.....	73
<b>Cuadro A.14.</b> Corrida 5 del colector solar.....	74
<b>Cuadro A.15.</b> Corrida 6 del colector solar.....	74
<b>Cuadro A.16.</b> Corrida 7 del colector solar.....	74

<b>Cuadro A.17.</b> Corrida 8 del colector solar.....	75
<b>Cuadro A.18.</b> Resultados obtenidos de la curva de enfriamiento del agua dentro del tanque de agua del colector solar.....	75

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Datos de irradiación anual promedio en Costa Rica (Josht & Weigl, 2014) .....	6
<b>Figura 1.2.</b> Esquema de un sistema solar térmico (Quinteros, 2012) .....	9
<b>Figura 1.3.</b> Colector de energía solar de vidrio al vacío de tipo mojado (Enteria & Akbarzadeh, 2014).....	10
<b>Figura 1.4.</b> Diagrama de un colector solar de lámina plana de un líquido de transporte (a) y de aire (b) (Attmann, 2010). .....	10
<b>Figura 1.5.</b> Colector solar de tipo termosifón (Paz, 2005).....	11
<b>Figura 1.6.</b> Colector solar con sistema de intercambio de calor (Paz, 2005) .....	12
<b>Figura 1.7.</b> Fruto de la palma aceitera (Kole et al., 2012). .....	13
<b>Figura 1.8.</b> Reacción de transesterificación (Knothe et al., 2005).....	14
<b>Figura 2.1.</b> Diagrama experimental del equipo para determinación de propiedades térmicas de los fluidos .....	23
<b>Figura 2.2.</b> Equipo construido para la determinación de las propiedades térmicas de los fluidos de interés .....	24
<b>Figura 2.3.</b> Diagrama experimental del colector termosolar .....	24
<b>Figura 2.4.</b> Prototipo construido del colector termosolar .....	25
<b>Figura 3.1.</b> Corrida 1 agua caliente a ambiente sin aislamiento en el tanque .....	30
<b>Figura 3.2.</b> Flujo neto relativo de calor en función del tiempo para el agua .....	31
<b>Figura 3.3.</b> Corrida 5 agua caliente a agua fría con aislamiento.....	32
<b>Figura 3.4.</b> Flujo neto relativo de calor en función del tiempo para el aceite de palma .....	33
<b>Figura 3.5.</b> Flujo neto relativo de calor en función del tiempo para el Biodiésel H&M .....	34
<b>Figura 3.6.</b> Flujo neto relativo de calor en función del tiempo para el Biodiésel EB.....	35
<b>Figura 3.7.</b> Flujo neto relativo de calor en función del tiempo para la mezcla de biodiésel.....	37
<b>Figura 3.8.</b> Flujo neto relativo de calor en función del tiempo para las corridas a temperatura alta de la mezcla de biodiésel .....	38
<b>Figura 3.9.</b> Flujo neto relativo de calor en función del tiempo para las corridas a baja temperatura de la mezcla de biodiésel .....	38
<b>Figura A.1.</b> Corrida 1 agua caliente hacia ambiente sin aislamiento.....	54

<b>Figura A.2.</b> Corrida 2 agua caliente hacia ambiente sin aislamiento.....	54
<b>Figura A.3.</b> Corrida 3 agua caliente hacia ambiente sin aislamiento.....	55
<b>Figura A.4.</b> Corrida 1 agua caliente a agua fría sin aislamiento.....	55
<b>Figura A.5.</b> Corrida 2 agua caliente a agua fría sin aislamiento.....	56
<b>Figura A.6.</b> Corrida 3 agua caliente a agua fría sin aislamiento.....	56
<b>Figura A.7.</b> Corrida 1 agua caliente hacia ambiente con aislamiento .....	57
<b>Figura A.8.</b> Corrida 2 agua caliente hacia ambiente con aislamiento .....	57
<b>Figura A.9.</b> Corrida 3 agua caliente hacia ambiente con aislamiento .....	58
<b>Figura A.10.</b> Corrida 4 agua caliente hacia ambiente con aislamiento .....	58
<b>Figura A.11.</b> Corrida 1 agua caliente a agua fría con aislamiento.....	59
<b>Figura A.12.</b> Corrida 2 agua caliente a agua fría con aislamiento.....	59
<b>Figura A.13.</b> Corrida 3 agua caliente a agua fría con aislamiento.....	60
<b>Figura A.14.</b> Corrida 4 agua caliente a agua fría con aislamiento.....	60
<b>Figura A.15.</b> Corrida 5 agua caliente a agua fría con aislamiento.....	61
<b>Figura A.16.</b> Corrida 1 aceite caliente a agua fría con aislamiento .....	61
<b>Figura A.17.</b> Corrida 2 aceite caliente a agua fría con aislamiento .....	62
<b>Figura A.18.</b> Corrida 3 aceite caliente a agua fría con aislamiento .....	62
<b>Figura A.19.</b> Corrida 4 aceite caliente a agua fría con aislamiento .....	63
<b>Figura A.20.</b> Corrida 5 aceite caliente a agua fría con aislamiento .....	63
<b>Figura A.21.</b> Corrida 1 biodiésel H&M a agua fría con aislamiento.....	64
<b>Figura A.22.</b> Corrida 2 biodiésel H&M a agua fría con aislamiento.....	64
<b>Figura A.23.</b> Corrida 3 biodiésel H&M a agua fría con aislamiento.....	65
<b>Figura A.24.</b> Corrida 4 biodiésel H&M a agua fría con aislamiento.....	65
<b>Figura A.25.</b> Corrida 5 biodiésel H&M a agua fría con aislamiento.....	66
<b>Figura A.26.</b> Corrida 1 biodiésel EB a agua fría con aislamiento .....	66
<b>Figura A.27.</b> Corrida 2 biodiésel EB a agua fría con aislamiento .....	67
<b>Figura A.28.</b> Corrida 3 biodiésel EB a agua fría con aislamiento .....	67
<b>Figura A.29.</b> Corrida 4 biodiésel EB a agua fría con aislamiento .....	68
<b>Figura A.30.</b> Corrida 5 biodiésel EB a agua fría con aislamiento .....	68
<b>Figura A.31.</b> Corrida 1 biodiésel mezcla a agua fría con aislamiento .....	69

<b>Figura A.32.</b> Corrida 2 biodiésel mezcla a agua fría con aislamiento .....	69
<b>Figura A.33.</b> Corrida 3 biodiésel mezcla a agua fría con aislamiento .....	70
<b>Figura A.34.</b> Corrida 4 biodiésel mezcla a agua fría con aislamiento .....	70
<b>Figura A.35.</b> Corrida 5 biodiésel mezcla a agua fría con aislamiento .....	71
<b>Figura A.36.</b> Corrida 6 biodiésel mezcla a agua fría con aislamiento .....	71

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe interés por parte de la unidad de Ingeniería y Construcción del Instituto Costarricense de Electricidad (IC-ICE) para el aprovechamiento de recursos renovables para la generación de energía eléctrica y calor, como por ejemplo la energía solar, con el fin de satisfacer ciertas necesidades que requieren de calor como son el uso de agua caliente sanitaria (ACS) en duchas, cocinas, calefacción, etc., el cual es uno de los procesos más comunes en diversas industrias y hogares en el país (Lizana, 2015). Esto mediante el uso de líquidos de origen renovable para el transporte de energía térmica como son el aceite de palma y el biodiésel de las empresas costarricenses Energías Biodegradables S.A. y Biodiésel H&M.

En muchos casos, la generación de calor para este tipo de aplicaciones proviene de combustibles fósiles o bien, directamente por la energía eléctrica que provee el ICE mediante dispositivos eléctricos de calentamiento en línea, los cuales implican un elevado gasto económico para las industrias y hogares, y generan un alto impacto ambiental mediante la generación de gases contaminantes. Además, se utilizan derivados de petróleo como lubricantes y/o fluidos de transporte que, en caso de derrames, resultan severamente nocivos para la flora y fauna, de ahí que se realicen investigaciones en fluidos térmicos que presenten un bajo impacto ambiental en caso de desastres tecnológicos y naturales. Anteriormente, investigadores del Laboratorio de Biomazas (LB) y de la Facultad de Microbiología de la Universidad de Costa Rica determinaron que algunos tipos de biodiésel de origen vegetal como el de *Elaeis guineensis* presentan una alta biodegradabilidad (Lutz, Chavarría, Arias, & Mata, 2006), de ahí el interés para su aplicación en este tipo de procesos, además de que al operar a altas temperaturas, no generan problemas de obstrucción en tuberías como el producido por el agua, rica en minerales la cual debe ser tratada previamente lo cual incrementa los costos operacionales.

Otro punto importante resulta en que anteriormente, el Laboratorio de Biomazas ha realizado estudios sobre parámetros de transmisión de energía térmica para este tipo de fluidos, obteniendo que presentan valores cercanos a líquidos lubricantes y de transporte térmico

comerciales y que son derivados de petróleo, por lo que resulta técnicamente viable el estudio en estos líquidos de origen renovable (Rodríguez, Fiore, Zúñiga, Miranda, & Mata, 2018).

Debido a lo anterior, la relevancia del presente trabajo se basa en evaluar experimentalmente a nivel de laboratorio el aceite de palma y el biodiésel como fluidos de transporte térmico, para la sustitución de derivados del petróleo con el fin de obtener información técnico-científica que permita el diseño y construcción de un prototipo de colección termo solar, el cual sea capaz de satisfacer las necesidades de ACS en la sala estudiantil de la sede de Guanacaste de la UCR y reducir así el consumo eléctrico en la misma. Esta última propuesta realizada por el Dr. Carlos Araya Leandro, vicerrector de administración. Este objetivo es relevante en la ingeniería química, como rama de la ingeniería responsable en la búsqueda de soluciones para los problemas energéticos presentes en la actualidad, considerando cuidadosamente el impacto ambiental y social en la zona de interés.

### **Alcances del proyecto**

El objetivo general de este proyecto es evaluar el uso de aceite de palma y biodiésel como fluidos de transferencia de energía térmica y analizar su comportamiento en sistemas de colección termo solar ya construidos con el fin de obtener información técnico-científica que permita diseñar un prototipo de colector solar que satisfaga las necesidades de agua caliente sanitaria en el comedor de la Sede de Guanacaste de la Universidad de Costa Rica.

Los objetivos específicos son:

- Realizar una investigación bibliográfica donde se definan conceptos como energía solar, colectores termo solares, propiedades del aceite de palma y biodiésel y parámetros de transferencia de energía térmica.
- Plantear las variables de estudio para la obtención de parámetros térmicos como conductividad y eficiencia de transferencia para el aceite de palma y el biodiésel.
- Construir un sistema que cumpla con las condiciones establecidas para la determinación de los parámetros térmicos de interés.

- Ejecutar pruebas preliminares al sistema de estudio de los fluidos de interés con el fin de verificar el buen funcionamiento del sistema y los equipos de medición de temperatura.
- Determinar experimentalmente la conductividad y eficiencia para el aceite de palma y el biodiésel.
- Seleccionar el líquido orgánico con mejores características para el transporte térmico.
- Evaluar la eficiencia de intercambio de calor del líquido orgánico seleccionado.
- Redactar el documento de proyecto final de graduación para optar por el título de licenciatura en ingeniería química.



# CAPÍTULO 1. FUNDAMENTO TEÓRICO

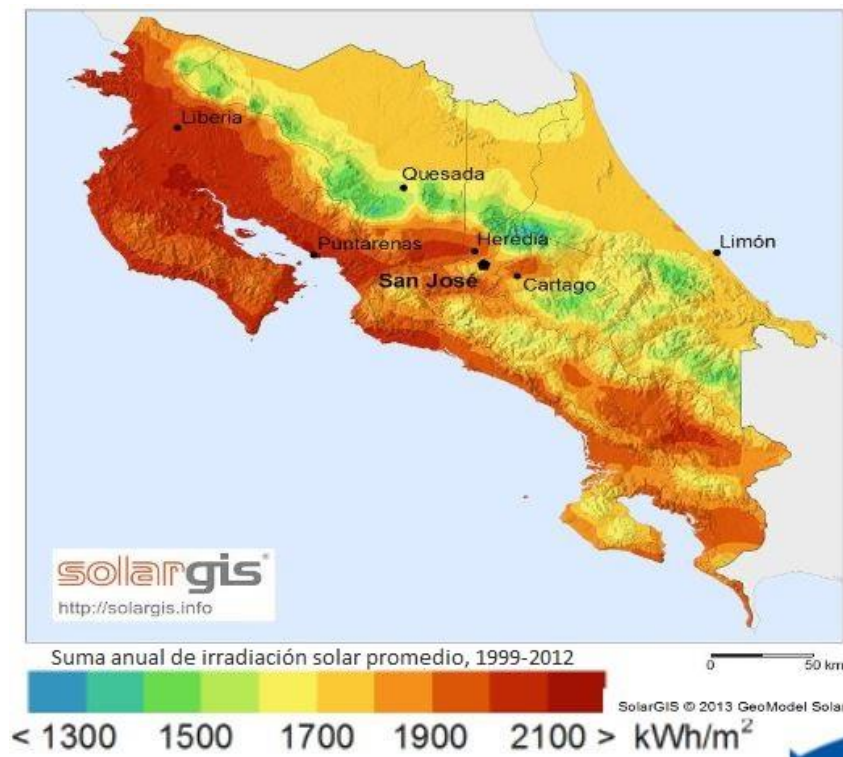
## 1.1 Generalidades de la energía solar

La energía solar es un recurso renovable, abundante, descentralizado y no contaminante, que no puede ser agotado (al menos en los próximos millones de años). La energía solar es energía radiante la cual es producida por el Sol el cual diariamente irradia a la Tierra enormes cantidades de energía que mantienen el planeta a una temperatura aceptable para la vida. Esta energía es generada por el Sol a partir de procesos de fusión nuclear en el cual aproximadamente 4 núcleos de hidrógeno se fusionan a presión y temperatura extremadamente alta para producir un átomo de helio, este proceso es acompañado de una pérdida de masa lo cual da como resultado la emisión de energía radiante cuyo proceso tarda millones de años para generarse en el núcleo del Sol y llegar hacia su superficie, pero que seguidamente lleva alrededor de 8 min recorrer los 150000000 km hasta llegar a la Tierra (Skipka & Theodore, 2014).

De toda la energía irradiada por el Sol al espacio, sólo una pequeña porción es recibida por la Tierra, aproximadamente  $1020 \text{ W/m}^2$  al nivel del mar, que aun así representa una cantidad enorme de energía la cual solamente en los Estados Unidos se encarga de satisfacer las necesidades energéticas diarias de al menos medio año, en Costa Rica, para el 2017 se tienen datos de generación de energía eléctrica por medio de sistemas fotovoltaicos los cuales generaron 28.1 MW, lo que representa un 0.35% de la generación total del país para dicho año. En cuanto a términos numéricos, aproximadamente el 30 % de la energía que choca la Tierra es reflejada hacia el espacio por las nubes, 27.8 % es absorbido en la evaporación de agua, 5.3 % es absorbido por el suelo, 1.7 % es absorbido por la vegetación marina y 0.2 % es absorbido por la vegetación terrestre (Skipka & Theodore, 2014). El restante de energía se encuentra disponible para suplir las necesidades energéticas de la sociedad (Acuña et al., 2018; Beaty & Fink, 2013).

Consecuentemente, la cantidad de energía solar que nuestro planeta recibe aproximadamente en un año es de 3.1 millones de exajoule (EJ). Según el International Energy Outlook Report del 2008, el consumo energético global era de 462 EJ/año en el 2005 y se reportan

proyecciones para el año 2030 de que sea cercana al doble (924 EJ/año), con lo cual se observa que se está recibiendo alrededor de 6900 veces más energía por parte del Sol de la que se consume globalmente (U.S Department of Energy, 2017), por lo que si se lograra aprovechar de manera más eficiente, aunque sea una pequeña porción de toda esa energía, sería suficiente para proporcionar más energía eléctrica de la que se necesita (Attmann, 2010). Sólo en Costa Rica, existen diversas zonas geográficas con alto potencial teórico para su utilización, donde algunos lugares alcanzan valores cercanos a los 2100 kWh/m<sup>2</sup> de radiación solar anuales, tal es el caso de la zona de Guanacaste y algunas partes de Puntarenas, como se observa en la Figura 1.1 (Josht & Weigl, 2014).



**Figura 1.1.** Datos de irradiación anual promedio en Costa Rica (Josht & Weigl, 2014)

Las tecnologías existentes se encargan ya sea de convertir la energía solar en energía eléctrica, o bien, en calor. Aunque existen numerosas formas de conversión de la energía solar, éstos pueden clasificarse en 2 tipos, pasiva o activa. Los sistemas solares pasivos son sistemas que no implican la entrada de ninguna otra forma de energía aparte de la luz del Sol entrante, mientras que los sistemas activos son aquellos que utilizan mecanismos adicionales

como sistemas de recirculación de algún fluido de transporte térmico, sopladores de aire o sistemas automáticos que apuntan a los paneles colectores de energía hacia el Sol. A continuación, se presentan 3 de las aplicaciones con mayor utilización para el aprovechamiento de la energía solar (Beaty & Fink, 2013):

- **Sistemas fotovoltaicos:** Corresponden a celdas solares, conocidas además como celdas fotovoltaicas, se basan en el efecto fotovoltaico de semiconductores para generar electricidad directamente de la luz solar, presentan el inconveniente de que requieren de altos costos de manufactura, por lo que su uso se ha limitado recientemente.
- **Cocinas solares:** La energía solar incide sobre una caja aislada, la cual a su vez proporciona esta energía con el fin de lograr cocinar los alimentos. Este tipo de sistemas es aplicado mayormente en países en vías de desarrollo con el fin de reducir las demandas de leña local y reducir así la explotación de la madera. Los primeros sistemas construidos a nivel nacional resultaron en calentadores de alimentos, donde se lograban alcanzar temperaturas entre 80 °C y 90 °C durante 40 min a 60 min aproximadamente al medio día. Conforme avanzan los tiempos y la tecnología se lograron desarrollar sistemas multipropósito que logran cocinar alimentos, hervir agua y secar alimentos y dependiendo de la radiación solar del lugar, se pueden utilizar durante 6 meses hasta 9 meses en el año (Nandwani, 2016).
- **Calentadores solares (Sistemas solar-térmico):** Sistemas de agua calentada solarmente se han vuelto muy comunes en muchos países en donde su mayor aplicación corresponde a la instalación de pequeños paneles planos en los techos de las casas con el fin de satisfacer las necesidades de agua caliente sanitaria. También se utilizan en la climatización de piscinas. A nivel más industrializado, este tipo de sistemas son utilizados en la producción de vapor de agua, el cual es circulado y utilizado directamente o bien, ser conducido hacia turbinas para generar energía eléctrica.

## 1.2 Colector solar térmico

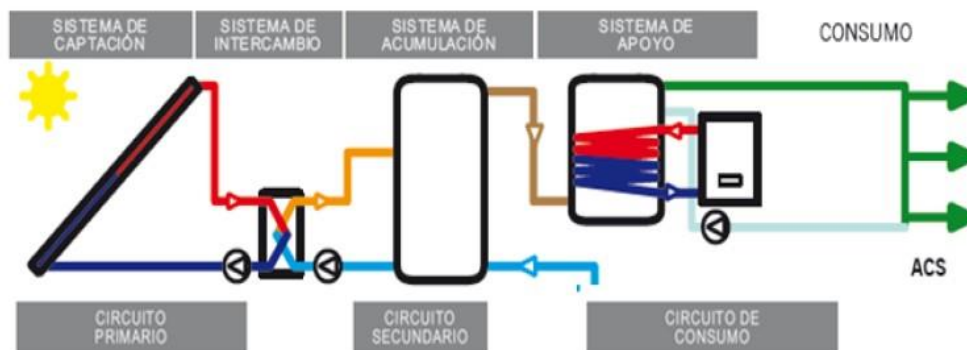
Los sistemas de colección solar-térmico se encargan de transformar la energía radiante del Sol en energía térmica acumulada en algún fluido de transporte el cual luego puede ser utilizado de diferentes maneras (Quinteros, 2012). Es un conjunto de equipos y componentes que conforman una instalación solar térmica y que permiten el aprovechamiento de la energía solar para las siguientes aplicaciones (Enteria & Akbarzadeh, 2014):

- ✓ Uso directo de agua, para la producción de agua caliente sanitaria (ACS), para el consumo doméstico.
- ✓ Fluidos de transporte de calor especializado, principalmente en la generación de energía eléctrica a partir de energía solar térmica.
- ✓ Vapor, también en sistemas de generación de energía eléctrica.
- ✓ Almacenamiento de energía inherente como en calentadores de agua pasivos integrales y estanques solares (Leblanc, Akbarzadeh, Andrews, Lu, & Golding, 2011).
- ✓ Fluidos con producción de energía eléctrica a partir de un módulo fotovoltaico utilizado como absorbedor.
- ✓ Refrigerantes o fluidos volátiles.

En el esquema de funcionamiento de un colector solar como el mostrado en la Figura 1.2 se pueden distinguir las siguientes partes (Quinteros, 2012):

- **Sistema de captación:** Es donde se transforma la radiación solar que incide en el equipo en energía térmica, incrementando la temperatura de un fluido, llamado *fluido de trabajo* o *fluido termoportador*.
- **Sistema de acumulación:** Corresponde al depósito de almacenamiento del fluido de trabajo, hasta que se requiera su uso.
- **Sistema de intercambio:** Es la sección donde se realiza el intercambio calórico entre el fluido de trabajo, que circula por el circuito primario, y el fluido que circula por el circuito secundario, que por lo general corresponde al agua de consumo.

- **Sistema de apoyo (auxiliar o de respaldo):** Es un complemento al aporte solar, se encarga de suministrar la energía necesaria para cubrir las necesidades de ACS. En algunos diseños este sistema no es considerado.



**Figura 1.2.** Esquema de un sistema solar térmico (Quinteros, 2012)

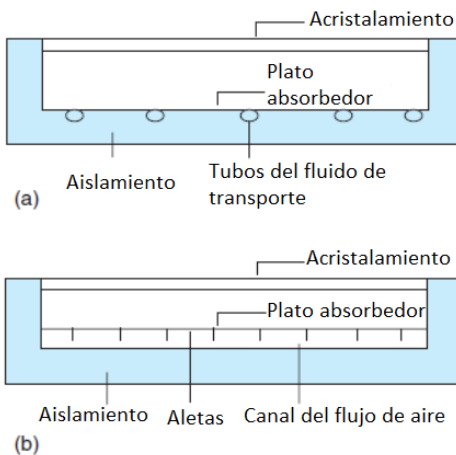
Con respecto a tipos de colectores, existen dos diseños principales que se encargan de suplir las necesidades de ACS que son los de láminas planas y los de tubos al vacío como el de la Figura 1.3.

Los colectores de láminas planas han sido sobrepasados en uso por los de tubos al vacío, pues este último posee una eficiencia más alta en operaciones que requieren de temperaturas más elevadas, además, han llegado a tener precios relativamente bajos pues existen altos volúmenes de producción en países como China. De ahí que sea mayor su venta y uso, no obstante, aún se siguen utilizando ampliamente los colectores de láminas planas pues estos pueden absorber la energía solar incidente para calentar agua la cual es utilizada mayormente en hogares.

En la Figura 1.4 se muestra un diagrama de un colector solar de láminas planas que funciona por medio de 2 tipos de fluidos de calentamiento, uno líquido (a) y otro que es por medio de aire (b).



**Figura 1.3.** Colector de energía solar de vidrio al vacío de tipo mojado (Enteria & Akbarzadeh, 2014).



**Figura 1.4.** Diagrama de un colector solar de lámina plana de un líquido de transporte (a) y de aire (b) (Attmann, 2010).

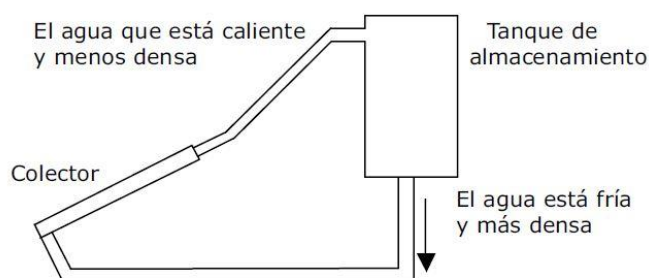
En la Figura 1.4a se pueden ver diversas partes de un colector que se describen a continuación:

- **Acristalamiento:** también llamada cubierta transparente, tiene como función el permitir el paso de radiación de onda corta (de alta energía) el cual a su vez la atraviesa para ser reflejada en el plato absorbedor así como también retardar el paso de la radiación de onda larga reflejada por el plato absorbedor, además se encarga de impedir el paso de polvo y otras impurezas que afecten el funcionamiento correcto

del colector (Paz, 2005). Habitualmente se utilizan cubiertas de vidrio con espesores de entre 3 mm y 4 mm (Quinteros, 2012).

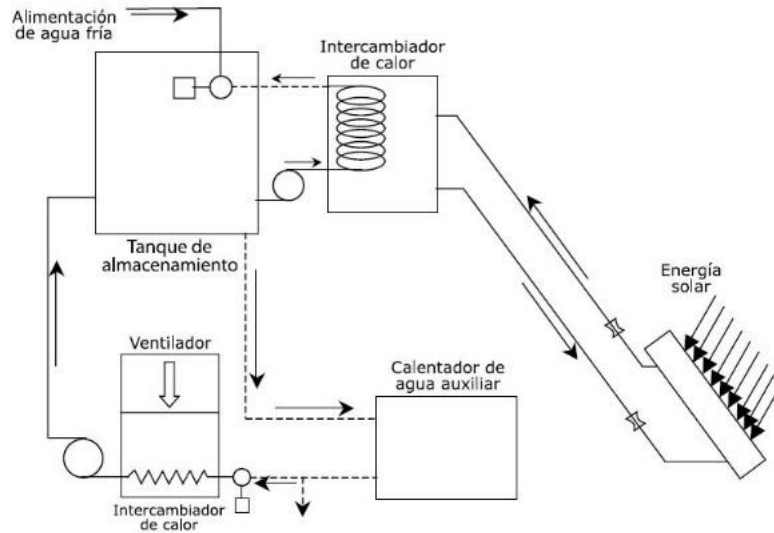
- **Plato absorbedor:** por lo general es una lámina de color negro para aumentar la absorbancia y emitividad de un material de elevada conductividad térmica y resistencia a la corrosión, generalmente en cobre o aluminio. Tiene la función de convertir la radiación solar que recibe en calor, el cual transfiere a los tubos por donde pasa el líquido o fluido de transporte (Garzón & Ramírez, 2015).
- **Aislamiento:** elemento que encierra el colector, con el fin de disminuir las pérdidas de calor entre la superficie absorbente y el ambiente, a su vez que lo protege del medio ambiente.

La circulación del líquido dentro del colector y hacia el sistema de acumulación se puede realizar mediante dos formas, por circulación forzada o por efecto tipo termosifón. La circulación forzada implica la utilización de bombas que permitan la circulación del líquido, mientras que los de tipo termosifón corresponde a sistemas diseñados donde la circulación ocurrirá por efecto de la convección natural del fluido o por gravedad, esto debido a la variación en la temperatura que ocurre en el mismo, como se observa en la Figura 1.5.



**Figura 1.5.** Colector solar de tipo termosifón (Paz, 2005)

Cuando el líquido que circula por el colector corresponde a una sustancia diferente al agua que se desea utilizar como son soluciones anticongelantes o aceites derivados de petróleo, se utilizan sistemas con un intercambiador, los cuales por lo general son serpentines construidos en tubo de cobre de alrededor de 1.27 cm (½ pulgada) como el de la Figura 1.6 (Paz, 2005).



**Figura 1.6.** Colector solar con sistema de intercambio de calor (Paz, 2005)

### 1.3 Eficiencia de colectores planos

La eficiencia en sistemas de colección solar está dada en términos de la radiación solar de tipo directa que recibe y se define como se muestra en la ecuación 1, donde  $\dot{Q}_u$  corresponde al flujo de calor útil,  $G$  a la radiación solar directa,  $A_c$  al área del colector solar y  $\eta$  a la eficiencia instantánea (ISO, 2013).

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{GA_c} \quad (1)$$

Donde el calor útil se puede calcular para sistemas en estado estacionario de la forma en que se muestra en la ecuación 2, donde  $\dot{m}$  corresponde al flujo másico,  $C_p$  a la capacidad calorífica a presión constante,  $T_s$  a la temperatura a la salida del colector y  $T_e$  a la temperatura a la entrada del colector solar.

$$\dot{Q}_u = \dot{m}C_p(T_s - T_e) \quad (2)$$

Para utilizar este modelo se debe exponer el colector solar a la radiación solar y medir las temperaturas a la entrada y salida del colector, temperatura ambiente, radiación solar que incide sobre la placa y velocidad del viento, con el fin de tener una representación adecuada del desempeño térmico determinado del equipo (Garzón & Ramírez, 2015).

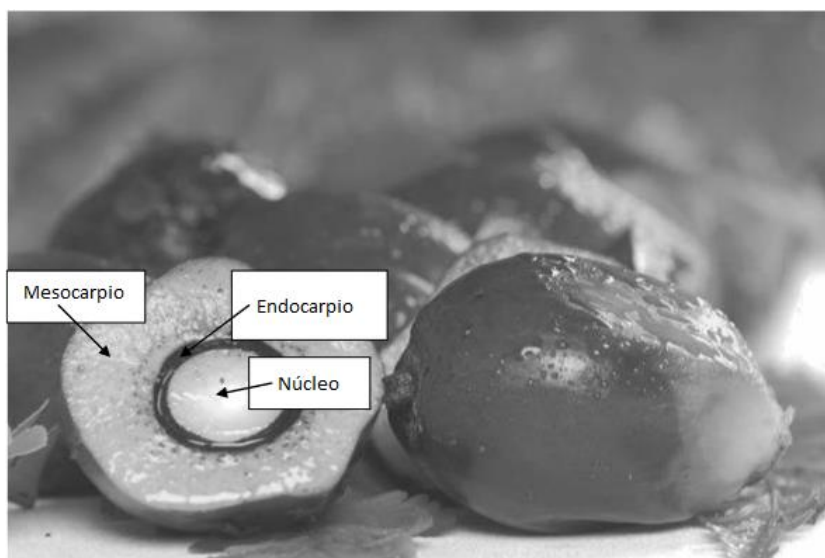


En cuanto a equipos comerciales, los colectores solares planos presentan eficiencias que van desde 50 % a 60 % con rangos moderados de temperatura de aplicación (40 °C a 60 °C) (Chamsa-ard, Sukchai, Sonsaree, & Sirisamphanwong, 2014).

## 1.4 Propiedades del aceite de palma y biodiésel

### 1.4.1 Aceite de palma

El aceite de palma es obtenido a partir del fruto de la planta de palma africana, conocida también como palma aceitera de las especies *Elaeis guineensis* y *Tenera*, la cual originalmente era utilizada como planta ornamental, y su primer uso comercial en plantaciones a pequeña escala fue en el año 1917 en países del este de África (Kole, Joshi, & Shonnard, 2012). La planta empieza a cosechar frutos entre 2.5 y 3 años luego de ser plantada. Luego, la planta continuará produciendo frutos alrededor de 25 años, con un óptimo de producción en los primeros 10 años en que empieza a producir. Del fruto obtenido, aproximadamente el 49 % en peso del aceite de palma se encuentra en el mesocarpio y 50 % en peso en el núcleo de la semilla, tal y como se observa en la Figura 1.7.



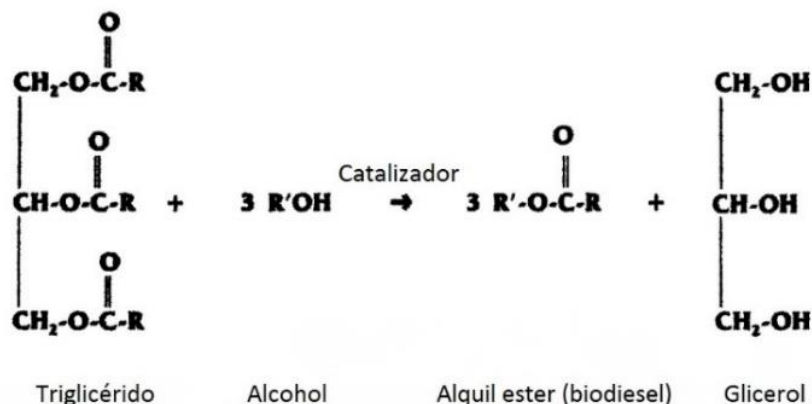
**Figura 1.7.** Fruto de la palma aceitera (Kole et al., 2012).

Una vez extraído y luego refinado, el aceite posee una densidad que varía en el rango entre 0.9077 g/mL a 0.8799 g/mL, esto para aceite crudo a una temperatura entre 35 °C y 75 °C. La viscosidad del aceite decrece desde 39.03 cP hasta 8.70 cP en el mismo ámbito de

temperaturas anterior. En estudios realizados se ha encontrado que mayoritariamente, se encuentran ácidos grasos con cadenas carbonadas de entre 12 y 14 carbonos en el aceite de palma, donde los ácidos grasos mayoritarios son el láurico, mirístico, palmítico y oleico, siendo el ácido láurico el predominante con un 48 % en peso aproximadamente (Applewhite, 1994).

### 1.4.2 Biodiésel

La mayor parte de los componentes en el aceite de origen animal y vegetal son los triglicéridos. Para poder obtener biodiésel, las grasas vegetales y animales se utilizan en reacciones de transesterificación, en donde estas grasas reaccionan en presencia de un catalizador (usualmente una base fuerte) con un alcohol (por lo general metanol) para obtener el correspondiente éster de alquilo (para el caso en que se usa metanol, sería éster metílico), como se observa en la Figura 1.8 (Knothe, Van Gerpen, & Krahl, 2005).



**Figura 1.8.** Reacción de transesterificación (Knothe et al., 2005).

El biodiésel ha ganado mucha atención en los años recientes debido al creciente interés en la protección ambiental, pues es obtenido a partir de recursos renovables y, más importante, es un combustible de combustión limpia, por lo tanto no contribuye al incremento en la emanación de CO<sub>2</sub> a la atmósfera (Kole et al., 2012). Además, presenta una elevada lubricidad, baja toxicidad, y un punto de inflamabilidad superior, en comparación al diésel común (Tomes, Lakshmanan, & Songstad, 2011). Adicionalmente, es posible obtener este

combustible a partir de aceites usados de cocina o grasas animales, los cuales cuentan con largas cadenas de ácidos grasos (Pauly, Kouakou, Habrioux, & Le Mapihan, 2014).

Algunas desventajas que posee el biodiésel corresponden al alto costo de la materia prima, baja estabilidad oxidativa, menor contenido energético por unidad de volumen y en algunos casos, mayor contenido de emisiones de NO<sub>x</sub> (DeOliveira, Quirino, Suarez, & Prado, 2006; Knothe, 2008; Tomes et al., 2011).

Con respecto a los requerimientos que debe cumplir el biodiésel para ser usado como combustible se tienen principalmente dos estándares a nivel mundial, los cuales son la norma ASTM D6751 en Estados Unidos y la EN 14214 para la Unión Europea. En estas normas se detallan los requerimientos mínimos o máximos que debe tener un biodiésel para que pueda ser comercializado en los mercados que se rigen bajo estos estándares (Tomes et al., 2011). Algunas de las propiedades de mayor importancia de acuerdo con la norma ASTM D6751 se detallan en el Cuadro 1.1.

**Cuadro 1.1.** Propiedades del biodiésel según la norma ASTM D6751 (ASTM International, 2008).

<b>Parámetro</b>	<b>Valor límite</b>	<b>Unidad</b>
Contenido de metanol	0.2 máximo	% volumen
Agua y sedimentos	0.050 máximo	% volumen
Punto de inflamabilidad	93 mínimo	°C
Viscosidad cinemática	1.9-6.0	mm <sup>2</sup> /s
Cenizas de azufre	0.020 máximo	% masa
Contenido de azufre	0.0015 máximo	% masa
Número de cetano	47 mínimo	Adimensional
Acidez	0.50 máximo	mg KOH/g
Glicerina libre	0.020	% masa
Glicerina total	0.240	% masa

En cuanto a aplicaciones distintas a procesos de combustión, se tiene que el biodiésel se podría utilizar como solvente sustituto de derivados de petróleo, como por ejemplo en el caso de formulaciones de agroquímicos, debido a su baja toxicidad y rápida degradación lo cual minimiza el impacto hacia los suelos y el medio ambiente en general, además de que los

ácidos grasos de éster alquílico son biodegradables, presentan altos puntos de inflamabilidad y una baja volatilidad, lo cual los vuelve atractivos como sustitutos de solventes peligrosos (Castellón, Lutz, & Mata, 2006; Glória Pereira & Mudge, 2004; Tomes et al., 2011; Wildes, 2002).

Adicionalmente, la norma europea EN 14213 establece el uso de biodiésel como reemplazo de aceites de calentamiento derivados de petróleo, ya sea en forma de mezclas o utilizando biodiésel puro (Tomes et al., 2011).

## **1.5 Parámetros de transferencia de energía térmica**

La transferencia de calor está relacionada con la razón de intercambio de calor entre cuerpos calientes y fríos llamados fuente y receptor, respectivamente. La ciencia que se basa en estos procesos de la transferencia de calor es la termodinámica, la cual trata las transiciones cuantitativas y reacomodos de energía como calor en los cuerpos de materia (Kern, 1997).

Al analizar fluidos para transporte térmico, existen tres propiedades termodinámicas principales relacionadas con la conducción de calor los cuales corresponden a la capacidad calorífica  $C_p$ , la conductividad térmica  $\lambda$  y la difusividad térmica  $\alpha$ .

### **1.5.1 Capacidad calorífica**

El calor específico mide la cantidad de energía térmica que se debe agregar, por unidad de masa para producir un incremento unitario en la temperatura. Dicho de otra manera, corresponde a la capacidad que posee un material para almacenar energía interna (Salazar, 2003).

La capacidad calorífica se encuentra dada a partir de la ecuación 3, dónde  $dQ$  corresponde a un diferencial de calor,  $m$  a la masa,  $C_p$  a la capacidad calorífica y  $dT$  a un diferencial de temperatura.

$$dQ = mC_p dT \quad (3)$$

Para el caso de los aceites de origen vegetal y biodiésel, se pueden encontrar valores como los que se muestran en el Cuadro 1.2, donde se observa que, dependiendo de la fuente de origen, o sea, los triacilgliceroles (o monoéster para el caso de biodiésel) que lo componen,

se pueden obtener valores más altos, lo cual se traduce en mayor cantidad de energía interna que puede almacenar una sustancia (Pauly et al., 2014; Rodríguez et al., 2018).

**Cuadro 1.2.** Capacidad calorífica de algunas sustancias (Rodríguez et al., 2018)

Sustancia	Capacidad calorífica, $C_p/(\text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1})$
Biodiésel Energías Biodegradables <sup>®</sup>	2.800
Biodiésel H&M <sup>®</sup>	1.700
<i>Acrocomia sp</i>	3.200
<i>Elaeis guineensis</i>	1.960
Aceite recuperado de frituras	3.400
<i>Ricinus communis</i>	1.920
Agua	4.186
Chevron SAE 30 <sup>®</sup>	1.200
Chevron MD3 <sup>®</sup>	2.400

### 1.5.2 Conductividad térmica

Este valor determina si el sólido o fluido (ya sea, líquido o gas, con sus limitaciones) es relativamente buen conductor de calor, es decir, indica la habilidad del material para conducir calor. Cuando la conductancia de una sustancia se reporta para una cantidad de material de un metro de grosor con un área de flujo de un  $\text{m}^2$ , la unidad de tiempo de un segundo y la diferencia de temperatura de 1 K, se le llama conductividad térmica (Salazar, 2003).

Cada vez que hay un gradiente de temperatura ( $\nabla T$ ) en un material con flujo de calor  $\dot{Q}$ , esta viene dada por la ley de Fourier que en el caso de materiales homogéneos e isotrópicos es como se observa en la ecuación 4, donde  $\dot{Q}$  corresponde al flujo de calor,  $\lambda$  a la conductividad térmica y  $\nabla T$  a un gradiente de temperatura.

$$\dot{Q} = -\lambda \nabla T \quad (4)$$

La conductividad térmica se considera una propiedad de transporte, pues hace referencia a la transferencia de energía en un sólido o fluido. En los primeros, el transporte de energía se da en forma de movimiento de electrones libres por vibración en la capa cristalina del material. En cuanto a los fluidos moleculares, la transferencia de calor ocurre mediante corrientes conductivas a través de las moléculas que lo componen, esto gracias a las fuerzas

intermoleculares presentes en la sustancia (Ishii, Sato, Salanne, Madden, & Ohtori, 2014; Ratna, 2012).

Existen inconvenientes con respecto a la determinación de la conductividad térmica en muchas sustancias, pues al ser un parámetro dado por unidad de área de flujo, depende de la geometría en que se encuentre, por lo que existen otros parámetros equivalentes a la conductividad térmica que aportan información relevante a la sustancia de interés, tal es el caso del parámetro  $J$  el cual por medio de un modelo de ajuste se puede obtener la conductividad térmica tal y como se observa en la ecuación 5, dónde  $J$  corresponde al flujo térmico inducido volumétrico y  $\lambda$  la conductividad térmica (Rodríguez et al., 2018).

$$J = (1.5 \pm 0.1) + (2.2 \pm 0.3)\lambda \quad (5)$$

De igual forma, en el Cuadro 1.3 se muestran valores del flujo térmico inducido volumétrico de algunas sustancias.

**Cuadro 1.3.** Flujo térmico inducido volumétrico de algunas sustancias (Rodríguez et al., 2018)

Sustancia	Flujo térmico inducido volumétrico, $J/(\text{kWm}^{-3}\text{K}^{-1})$
Biodiésel Energías Biodegradables <sup>®</sup>	2.70
Biodiésel H&M <sup>®</sup>	1.50
<i>Acrocomia</i>	2.60
<i>Elaeis guineensis</i>	1.90
Aceite recuperado de frituras	3.00
<i>Ricinus communis</i>	1.60
Agua	2.71
Chevron SAE 30 <sup>®</sup>	1.00
Chevron MD3 <sup>®</sup>	2.20

### 1.5.3 Difusividad térmica

Para un medio homogéneo e isotrópico, sin generación de calor en su interior, se tiene la ecuación 6 para el cálculo de la difusividad térmica, dónde  $t$  corresponde al tiempo y  $\alpha$  a la difusividad térmica.

$$\nabla^2 T - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

De la ecuación 6 se puede inferir que la difusividad térmica es la cantidad que mide el cambio de temperatura producido en una unidad de volumen del material (sólido, líquido o gas con sus limitantes) por la cantidad de calor que fluye por unidad de tiempo a través de una unidad de área de una capa de una unidad de espesor con diferencia de temperatura. El significado físico detrás del concepto de difusividad térmica está asociado a la velocidad de propagación de calor durante los cambios de temperatura en el tiempo. Por lo tanto, un buen difusor térmico tal como cobre o diamante se pone en contacto con un depósito térmico caliente a un tiempo igual a  $t = 0$ , alcanza su equilibrio térmico más rápido que otros malos difusores tales como polímeros y vidrios (Salazar, 2003).

## CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El objetivo principal del presente proyecto es evaluar el uso de aceite de palma y biodiésel como fluidos de transferencia de energía térmica y analizar su comportamiento en sistemas de colección termo solar ya construidos con el fin de obtener información técnico-científica que permita diseñar un prototipo de colector solar que satisfaga las necesidades de agua caliente sanitaria en el comedor de la Sede de Guanacaste de la Universidad de Costa Rica. La sección experimental se divide en dos partes principales. La primera consiste en el estudio de los líquidos orgánicos de interés y determinar los parámetros de transferencia de energía térmica. La segunda parte consiste en el diseño y construcción del prototipo de colector solar. Seguidamente se describe la metodología experimental utilizada para el desarrollo del proyecto.

### 2.1 Materiales y equipos

En el estudio de las propiedades de transporte térmico se utilizaron las sustancias que se detallan en el Cuadro 2.1.

**Cuadro 2.1.** Constantes físicas y químicas de las sustancias utilizadas (Perry & Green, 2008; Rodríguez et al., 2018)

Nombre	Capacidad calorífica, $C_p/(\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1})$	Densidad, $\rho/(\text{kgm}^{-3})$	Toxicidad
Agua	4.186	1000	N/A
Biodiésel H&M	1.700	884.0	Irritante en contacto
Biodiésel EB	2.800	884.0	con ojos, piel Irritante en
Aceite de palma	1.960	870.2	contacto con ojos



En el Cuadro 2.2 se encuentran las características de los equipos utilizados.

**Cuadro 2.2.** Equipos utilizados en el desarrollo del proyecto

Equipo	Fabricante/Modelo	Ámbito de operación	Placa UCR
Termómetro digital	Ser Scientific 800024	-200 °C a 1370 °C	--
Plantilla de calentamiento	--	0 °C – 100 °C	138400
Bomba Periférica	Maute	0.00125 m <sup>3</sup> /s (75 l/min)	--

## 2.2 Variables y factores experimentales

Para el estudio de las propiedades de transporte térmico de los fluidos de interés y del análisis del prototipo de colector solar, se definen las variables consideradas de mayor relevancia en esta investigación y se organizan de la siguiente manera:

### 2.2.1 Variables de estudio

En este caso se tienen dos variables, una para cada sección de estudio. Se tratan del flujo neto relativo de calor (eficiencia de transferencia de calor) para la primera parte, y de la eficiencia del colector para la segunda parte.

### 2.2.2 Variable de estímulo

Esta es la que se modifica en el estudio y es manipulada por el investigador. En este caso se tiene el flujo del líquido termoportador en el colector solar. Los flujos analizados fueron los siguientes:

- **Flujo 1:** 0.178 kg/s y 0.144 kg/s para el agua, cuando la válvula está completamente abierta y a media apertura, respectivamente.
- **Flujo 2:** 0.157 kg/s y 0.127 kg/s para la mezcla de biodiésel, cuando la válvula está completamente abierta y a media apertura, respectivamente.

### 2.2.3 Variables fijas

Se tienen las condiciones ambientales, como la temperatura y presión. Cabe resaltar que ambas condiciones si bien se mantienen fijas para cada medición, pueden variar entre mediciones debido a que se realizan en días diferentes.

Se tienen además los parámetros geométricos del tubo de PVC y de vidrio, donde se realiza la primera parte del estudio, dichos parámetros son el diámetro y altura de ambos tubos.

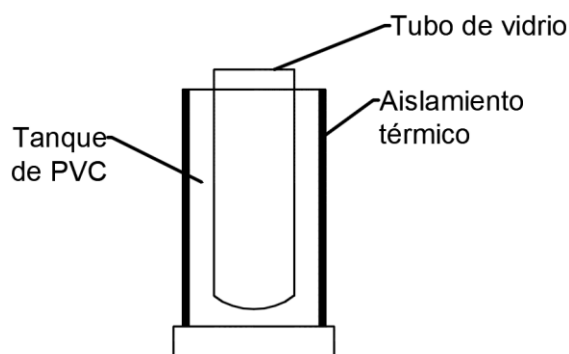
Se tiene como variable fija el volumen y masa de los líquidos usados en la primera parte del estudio.

### 2.2.4 Variable de respuesta

Para la primera parte se tienen la temperatura de los fluidos y el tiempo. Para el estudio del colector solar se tiene la temperatura del fluido calentado solarmente y del agua, así como el tiempo y la radiación solar.

## 2.3 Diagrama experimental

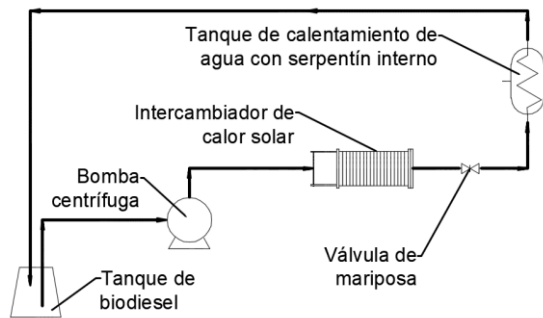
La Figura 2.1 muestra el diagrama experimental utilizado para el estudio de las propiedades térmicas de los fluidos analizados y en la Figura 2.2 se tiene una imagen del sistema construido. En la Figura 2.3 se tiene el diagrama del colector termosolar, además, en la Figura 2.4 se tiene el prototipo de colector solar construido.



**Figura 2.1.** Diagrama experimental del equipo para determinación de propiedades térmicas de los fluidos



**Figura 2.2.** Equipo construido para la determinación de las propiedades térmicas de los fluidos de interés



**Figura 2.3.** Diagrama experimental del colector termosolar



**Figura 2.4.** Prototipo construido del colector termosolar

## **2.4 Procedimiento experimental**

El procedimiento experimental se divide en dos partes, el estudio de las propiedades térmicas de los fluidos de interés y el diseño, construcción y pruebas del colector termo solar.

### **2.4.1 Estudio de las propiedades térmicas de los fluidos de interés**

Para realizar el estudio de las propiedades térmicas del agua, aceite de palma, biodiésel H&M y Energías Biodegradables, así como la mezcla de ambos se utilizó el sistema mostrado en la Figura 2.1.

Primeramente, se utilizó el tanque de PVC sin aislamiento al cual se le agregaron alrededor de 4.8 L de agua la cual fue calentada aparte en una plantilla a una temperatura cercana a la ebullición, seguidamente, se vierte el agua caliente en el tanque al cual se le colocaron 3 sensores de temperatura, uno al fondo, otro al medio y el último en la parte superior cuidando que este último quede sumergido en el agua caliente. Se empieza a correr el tiempo y se

toman datos de temperatura en cada posición cada 1 min hasta llegar a los 5 min, seguidamente y hasta los 10 min se toman datos cada 2.5 min, posteriormente, se toman datos cada 5 min hasta llegar a 50 min, seguidamente se toman datos cada 10 min hasta alcanzar los 90 min, después se toman datos cada 15 min o 30 min hasta terminar la medición, alrededor de 200 min o 300 min inclusive o hasta que se observe que al graficar el promedio de los 3 valores de temperatura con respecto al tiempo al final se obtenga una parte plana sin variación. Dichas mediciones se realizan por triplicado. Una vez recolectados los datos de temperatura y tiempo se realizaron con ayuda del software qtiplot 0.9.8.9<sup>®</sup> las gráficas de decaimiento de la temperatura, la cual se ajustó a una ecuación exponencial como la de la Ecuación 7 para obtener los valores de conductividad térmica del material.

$$\frac{dQ}{dt} = \lambda A(T - T_{amb}) \quad (7)$$

Luego, se realizó el procedimiento anterior, pero agregando un aislante que se obtiene de la Escuela de Química para finalmente obtener el nuevo valor del coeficiente de conductividad térmica.

Posteriormente, se armó el equipo de la Figura 2.1 para poder realizar las mediciones en cuestión. Para esto se agregan aproximadamente 4.8 L de agua dentro del tanque de PVC, en una plantilla de calentamiento se calientan 1.7 L del fluido de interés a una temperatura entre los 80 °C y 95 °C, una vez alcanzada dicha temperatura se vierte el líquido caliente dentro del tubo de vidrio que se encuentra sumergido en el tanque de PVC. Dentro del tanque de PVC se colocan dos sensores de temperatura, uno en el fondo y el otro cercano al borde superior, de igual forma se colocan sensores dentro del tanque de vidrio.

Una vez agregado el líquido caliente se inicia la toma de tiempo. Para la sección inicial se toma una medición de temperatura cada 1 min durante los primeros 10 min. Entre 10 min y 20 min las mediciones se realizan cada 2.5 min, posteriormente y hasta los 60 min se toman datos cada 5 min, de 60 min a 90 min cada 10 min y de 90 min en adelante se toman cada 15 min o 30 min, así hasta alcanzar los 200 min aproximadamente. Para cada líquido se realizan 5 mediciones.

Con los datos recopilados anteriormente para cada fluido estudiado, se obtienen mediante la curva de enfriamiento de Newton y de los parámetros de ajuste de cada modelo de transferencia obtenido el flujo neto relativo de calor.

#### **2.4.2 Diseño y construcción del prototipo de colector solar**

Para el diseño del equipo, se utiliza un sistema de lámina plana pues es la que se encuentra mayoritariamente instalada a nivel nacional en las residencias (Lizana, 2015), además, para el serpentín que irá dentro del tanque de agua de la Figura 2.3 se utilizan las ecuaciones generales de diseño y cálculo de intercambiadores de calor del texto de Kern (Kern, 1997), las demás partes se construyen partiendo del espacio disponible en la azotea de la Escuela de Química para llevar a cabo el experimento. Para esto se utilizan materiales resistentes al calor como tubería en cPVC (tubo de PVC forrado en cobre) y una bomba para agua caliente. Adicionalmente, se toma en consideración lo expuesto en la norma ISO/FDIS 9806 para escoger la ubicación y ángulo de inclinación del equipo una vez instalado.

Para la placa de absorción se utiliza un radiador usado de carro donado por la Sección de Transportes de la Universidad de Costa Rica, el cual se utilizan sus dimensiones para el cálculo del número de vueltas del serpentín de cobre.

#### **2.4.3 Toma de datos en el prototipo de colector solar**

Una vez armado el equipo de la Figura 2.3, se procede a realizar la toma de temperaturas. Para esto se colocan sensores de temperatura en la tubería a la entrada de la bomba, otro en el tanque de agua y uno más en la tubería a la salida del tanque de agua. Se enciende la bomba y se toma en el tiempo de 0 min los 3 valores de temperatura en las 3 posiciones, seguidamente se toman datos de temperatura cada 30 min hasta obtener datos durante 3 h ó 4 h. Adicionalmente se cuenta con los datos de radiación solar facilitados por el Centro de Geofísicas de la Universidad de Costa Rica (CIGEFI). Estas mediciones se realizan para dos flujos distintos, uno utilizando la válvula de mariposa completamente abierta (flujo 1) y la otra con la válvula abierta a la mitad (flujo 2), se realiza cada medición por triplicado utilizando el fluido orgánico, así como por duplicado y con la válvula completamente abierta utilizando agua como fluido de calentamiento solar.

Con los datos obtenidos anteriormente y de los modelos matemáticos se obtiene la eficiencia del colector solar.

## CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 3.1 Evaluación del aceite de palma y biodiésel como fluidos de transferencia de energía térmica

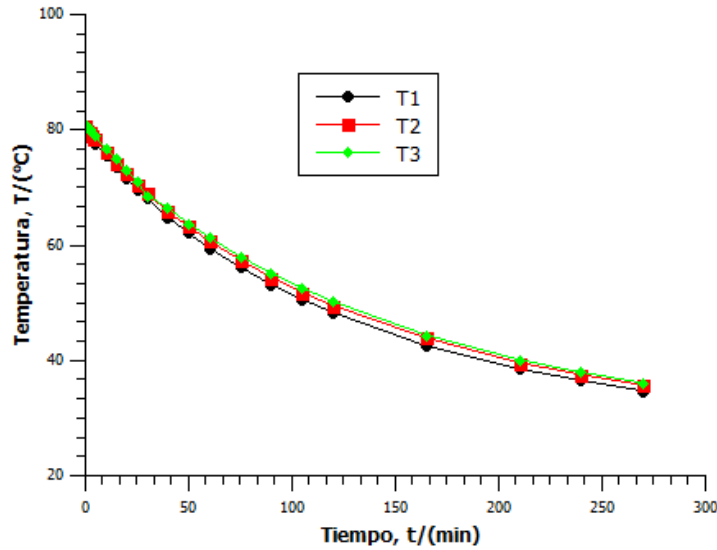
Como primera parte de la experimentación se realizó el estudio de las propiedades de transporte térmico de los fluidos de interés; aceite de palma, biodiésel H&M, biodiésel Energías Biodegradables, agua como referencia y la mezcla 50:50 en volumen de ambas muestras de biodiésel. Para esto se planteó un diseño de tanque de PVC donde se pudiera contener un tubo de vidrio que contuviera el líquido orgánico caliente y así determinar los parámetros relevantes para el proyecto.

Inicialmente, se realizó la determinación de la conductividad térmica del tanque de PVC mediante la obtención de la curva de enfriamiento de Newton, usando agua como fluido, al graficar la temperatura del agua con respecto al tiempo se obtiene una tendencia similar a la forma integrada de la ecuación de Newton, propuesta por Rodríguez et al. (2018), como se observa por ejemplo en la Figura 3.1, la cual corresponde a una de las corridas realizadas para el tanque sin aislamiento.

Para estas corridas se obtuvo una conductividad térmica de  $17.630 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  que, en comparación al valor obtenido cuando se le colocó aislante al tanque de PVC que fue de  $9.002 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ , resulta en una disminución de las pérdidas de calor hacia el ambiente del 51 % aproximadamente con el uso del aislante, hecho por el cual se realiza la investigación con el mismo.

Como primer ensayo se tiene el sistema agua caliente hacia agua fría. Los datos de las 5 mediciones realizadas se muestran en la Figura 3.2.

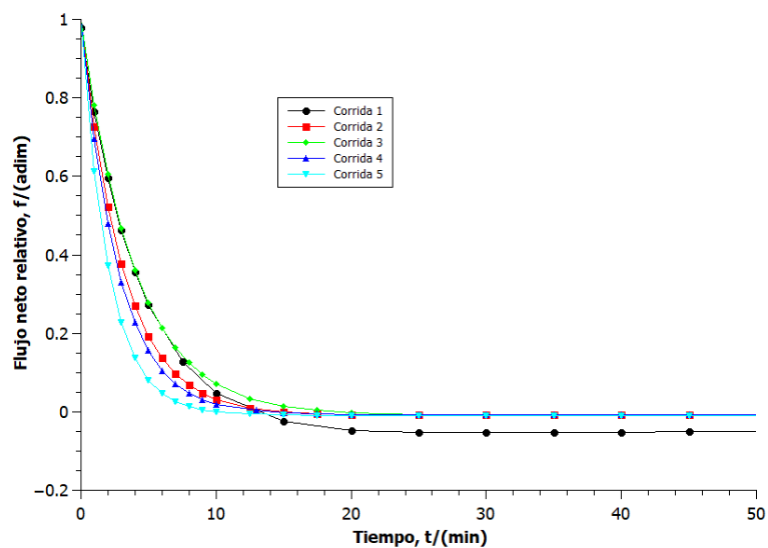




**Figura 3.1.** Corrida 1 agua caliente a ambiente sin aislamiento en el tanque

Se observa que el flujo neto relativo presenta un comportamiento de decaimiento exponencial, que se corresponde con el modelo de Newton mostrado en Rodríguez et al. (2018). Además, se observa que la transferencia de calor del líquido caliente hacia el líquido frío empieza a ser despreciable alrededor de los 10 min a 15 min, pues a partir de este momento empieza a ser mayor la pérdida hacia el ambiente. Esto se debe principalmente a la capacidad del agua de almacenar y de transferir energía, la cual se puede ver reflejada en su valor de capacidad calorífica el cual es alto en comparación con la de derivados de petróleo como los que se presentan en el Cuadro 1.2. Dicha diferencia se debe al tipo de fuerzas intermoleculares presentes en la molécula de agua, puente de hidrógeno, en comparación con las fuerzas de dispersión de London, que aunque son abundantes en moléculas de gran tamaño como algunos ácidos grasos e hidrocarburos, no llegan a compensar su valor con respecto a los 4 puentes de hidrogeno (2 internos y 2 externos) que puede formar el agua (Bruice, 2016). Debido a esto, es que se tiene un elevado valor de capacidad calorífica, lo cual resulta en que el tiempo de transferencia de calor no sea mayor, pues este parámetro es un indicativo de la capacidad de almacenar energía interna de una sustancia, por lo que se puede decir que el agua prefiere “guardar” la energía térmica obtenida en el calentamiento con la plantilla que cederla al agua fría contenida en el tanque. Adicionalmente, se tiene el valor de  $J$  mostrado en el Cuadro 1.3, el cual es mayor al de lubricantes comerciales derivados

de petróleo, lo cual según Salazar, A. (2003) además de ser una sustancia con gran capacidad de almacenamiento de energía interna por su alto valor de  $C_p$ , la energía que llega a transferir por unidad de volumen es mayor a medida que el gradiente de temperatura entre ambos líquidos sea mayor, lo cual se ve reflejado en la Figura 3.2 donde se observa que rápidamente se da un decaimiento del flujo neto relativo de calor en los primeros 10 min de la corrida (Rodríguez et al., 2018; Salazar, 2003). De igual forma sucede con la conductividad térmica, puesto que al conocer el valor del parámetro  $J$  es posible obtener la conductividad térmica a partir del modelo de la ecuación 5 y que es de  $0.55 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  que, igualmente es mayor al de algunos derivados de petróleo de uso común en sistemas de transferencia de calor como el Chevron MD3® ( $0.186 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  utilizando el modelo propuesto por Rodríguez-Acevedo *et al*, 2018)

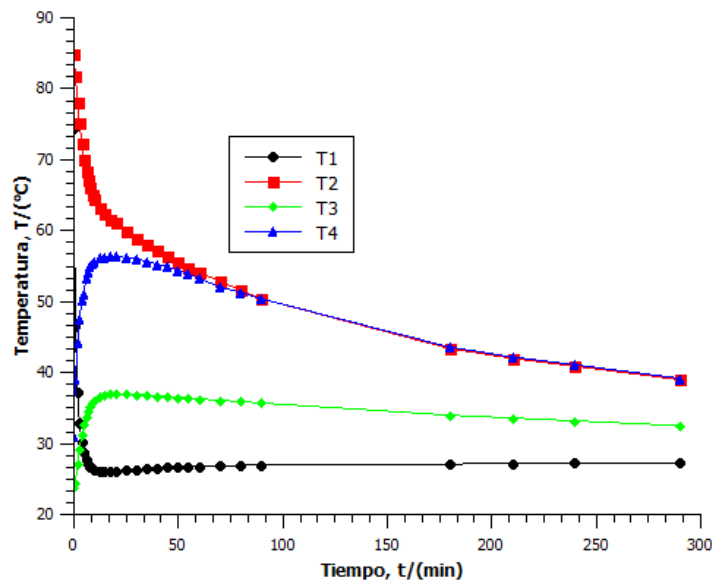


**Figura 3.2.** Flujo neto relativo de calor en función del tiempo para el agua

En cuanto a las diferentes corridas realizadas, en la Figura 3.2 se observa que la corrida 3 obtuvo el mayor tiempo de transferencia neta de calor de un líquido al otro, seguido por la corrida 1 y en menor valor se tiene la corrida 5, este resultado concuerda con lo expuesto anteriormente, pues en las corridas 1 y 3 la temperatura inicial promedio del líquido caliente es de  $74 \text{ }^\circ\text{C}$ , mientras que en la corrida 5 es cercana a  $75 \text{ }^\circ\text{C}$ , como se observa en las Figuras A.11, A.13 y A.15 respectivamente. Al ser mayor la temperatura inicial, mayor será el gradiente de temperatura con el agua a temperatura ambiente que se encuentra en el tanque

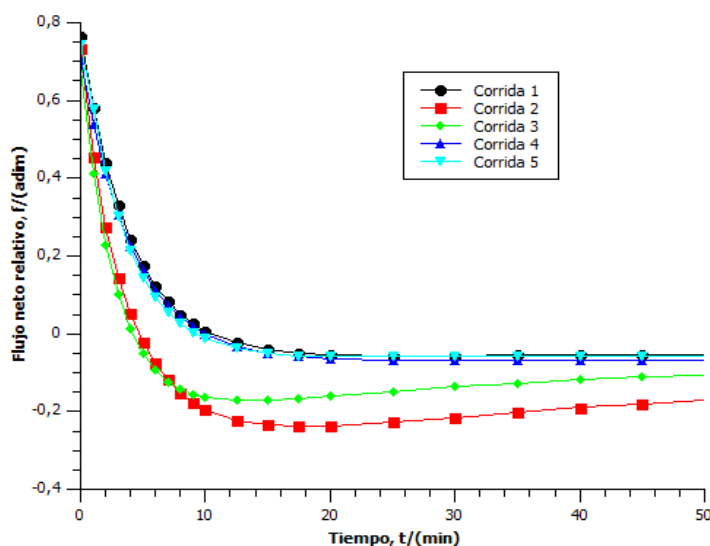
de PVC, por lo que la transferencia se dará con mayor rapidez y por ende mayor la pérdida hacia al ambiente por las paredes del tanque.

Finalmente, se tiene que en las corridas 2 y 5 donde la temperatura inicial del agua caliente fue mayor (78.3 °C y 79 °C según se muestra en las Figuras A.11 y A.12 respectivamente) la temperatura que logró alcanzar el agua en el tanque de PVC fue superior a 40 °C e inclusive superior a 45 °C como sucedió en la corrida 5, como se muestra en la Figura 3.3 por lo que si bien en un tiempo corto ya se empiezan a tener pérdidas significativas hacia el ambiente, se logra ceder gran cantidad de calor por lo que si se logra aislar de forma adecuada el sistema, se puede llegar a utilizar esta configuración para aplicaciones que requieran de agua caliente como son los Sistemas de Agua Caliente Sanitaria.



**Figura 3.3.** Corrida 5 agua caliente a agua fría con aislamiento

Para el caso del aceite de palma, se obtienen los resultados expuestos en la Figura 3.4 para los valores de eficiencia (flujo relativo) neta de transferencia de calor.



**Figura 3.4.** Flujo neto relativo de calor en función del tiempo para el aceite de palma

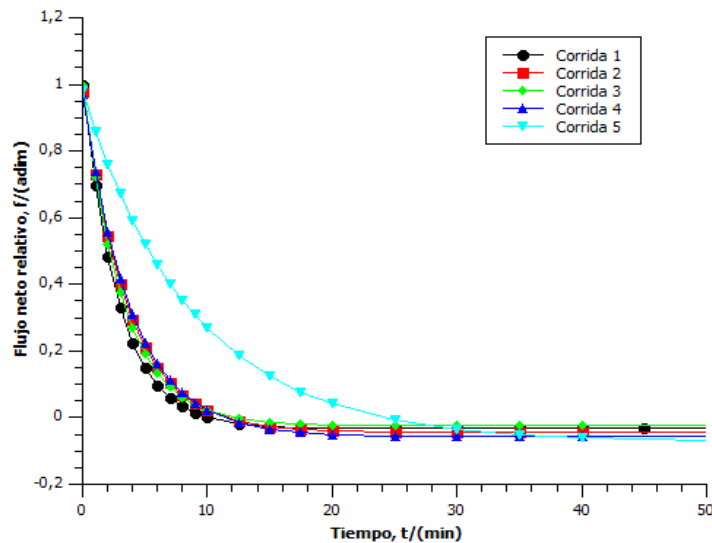
Al igual que con los datos obtenidos para el agua, se obtienen curvas de decaimiento exponencial característico para sistemas que siguen la Ley de Enfriamiento de Newton.

Se puede ver en la Figura 3.4 cómo sucede igual que en el caso del agua, a partir de los 10 min aproximadamente se empieza a tener pérdida de calor en mayor significancia hacia el ambiente, caso que sucede en las corridas 1, 4 y 5. En las corridas 2 y 3 se obtienen valores de pérdida después de los 5 min aproximadamente, hecho que podría deberse a errores experimentales como mal colocación de los sensores o fallo de los mismos, pues las 5 corridas realizadas presentan temperaturas iniciales promedio del aceite caliente similares, como se observa en las Figuras A.16, A.17, A.18, A.19 y A.20 respectivamente.

Al comparar los resultados del aceite de palma con respecto al agua de referencia, se tienen resultados similares en cuanto a la eficiencia neta de transferencia de calor, lo cual implica que no existe diferencia entre utilizar un tipo de fluido u otro para este tipo de aplicaciones, pues en promedio se obtuvieron resultados similares (pérdida de calor significativa al ambiente alrededor de los 10 min). Esto puede deberse a que la molécula de aceite de palma está compuesta mayoritariamente de ácido palmítico y ácido oleico, los cuales son ácidos grasos de cadena larga (16 y 18 carbonos respectivamente) (Mancini et al., 2015). Además, el ácido oleico es una molécula insaturada, lo cual le aporta rigidez a la molécula y afecta su

capacidad de transferir calor hacia moléculas adyacentes y posteriormente su conducción al entorno, resultado que se ve reflejado en los valores de  $C_p$  y  $J$ , los cuales se observan en los Cuadros 1.2 y 1.3, respectivamente, además de la conductividad térmica la cual se obtiene de la ecuación 5 y da como resultado  $0.182 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ , valores que contrastados con el agua son menores, por lo cual se considera finalmente al aceite de palma como un mal conductor volumétrico y por unidad de área de transferencia de calor.

Con respecto al biodiésel H&M, se obtienen resultados similares a los obtenidos en el caso del aceite de palma, en 10 min o menos la eficiencia del proceso empieza a mostrar valores negativos, tal como se observa en la Figura 3.5. Esto con excepción a la corrida 5 la cual presenta un resultado atípico que puede ser debido a fallas en la colocación o funcionamiento de los sensores de temperatura.



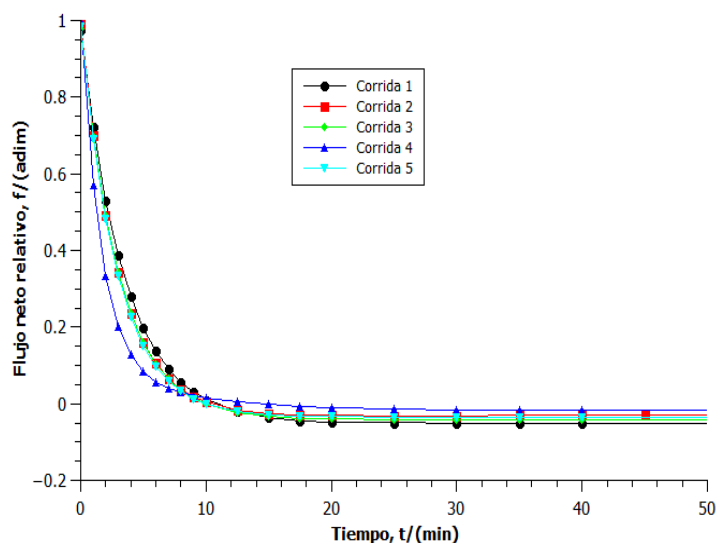
**Figura 3.5.** Flujo neto relativo de calor en función del tiempo para el Biodiésel H&M

Si se observan los valores de capacidad calorífica y del coeficiente  $J$  para el biodiésel H&M de los Cuadros 1.2 y 1.3 respectivamente, se observa que no difieren mucho en magnitud con respecto al aceite de palma, además de que este biodiésel está compuesto principalmente a partir de grasas animales, ricas en ácidos grasos de cadena larga como el ácido esteárico y el oleico que poseen 18 átomos de carbono cada uno (National Research Council, 1976), que al igual que en el aceite de palma, empiezan a perder movilidad y más bien se vuelven rígidas

a nivel molecular, lo cual disminuye los valores de estos dos parámetros mencionados anteriormente y por ende, la eficiencia de transferencia de calor hacia el agua contenida en el tanque, resultados que se observan en la Figura 3.5.

Por otra parte, al comparar las primeras 4 corridas realizadas para el biodiésel H&M, se tiene que independientemente de cual sea la temperatura promedio inicial del mismo, la eficiencia de transferencia hacia el agua resulta igual, pues se empiezan a tener pérdidas significativas hacia el ambiente después de los 10 min, además, se observa que en las Figuras A.21, A.22, A.23 y A.24 si se logra precalentar el biodiésel por encima de las 100 °C, se puede obtener agua a temperaturas cercanas a los 40 °C, que al igual a lo sucedido con el aceite de palma, no son superiores a las del sistema agua caliente-agua fría, hecho que podría deberse a la baja capacidad calorífica de este biodiésel, como se observa en el Cuadro 1.2, el cual produce que se obtenga una baja eficiencia de transferencia de calor.

Seguidamente, se realiza el análisis al biodiésel de Energías Biodegradables (EB), donde se obtienen los resultados mostrados en la Figura 3.6.



**Figura 3.6.** Flujo neto relativo de calor en función del tiempo para el Biodiésel EB

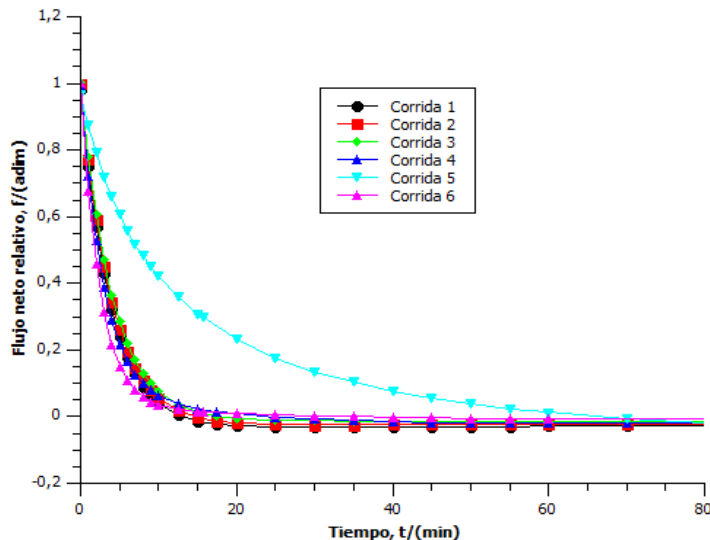
Para el caso de este biodiésel, se tienen resultados mejores al biodiésel H&M en cuanto al tiempo en que el flujo neto relativo de transferencia de calor resulta positivo, pues se observa en la Figura 3.6 como en las corridas 1 y 4 se obtiene un comportamiento ligeramente menos

pronunciado que en las demás corridas, resultando así en un tiempo mayor donde la transferencia es mayor a los 10 min que fue en promedio el alcanzado al utilizar el biodiésel H&M.

Por otro lado, al comparar los parámetros térmicos de este biodiésel con el agua y las demás sustancias utilizadas, se observa en los Cuadros 1.2 y 1.3 que este fluido posee valores cercanos al agua en cuanto a capacidad calorífica, al coeficiente  $J$  y la conductividad térmica ( $0.55 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  calculado mediante la ecuación 5), hecho que resulta por su alto contenido de aceite recuperado de cocina (mayoritariamente aceite vegetal) y además de aceite de coyol según lo indicado por la empresa productora, lo cual repercute en su elevado valor en dichos parámetros, pues este tipo de ácidos grasos resultan en cadenas insaturadas de carbono como es el caso del ácido  $\alpha$ -linolénico, presente mayoritariamente en el aceite de coyol (Oliveira et al., 2016), lo cual aumenta su grado de movimiento y en el caso del aceite recuperado, al contenido de agua que pueda tener lo cual eleva de igual forma los valores de  $C_p$  y  $J$  y finalmente obtener tiempos mayores de transferencia de calor efectivo hacia el agua.

Por otra parte, si se observan las Figuras A.26, A.27, A.28, A.29 y A.30 se observa que si bien la temperatura promedio alcanzada por el agua es menor a la obtenida en el sistema agua caliente-agua fría, la eficiencia del proceso resulta mayor, por lo que, si se logra alcanzar una temperatura inicial del biodiésel EB superior a las  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , se puede considerar este fluido como un apto candidato en la utilización de sistemas de intercambio de calor.

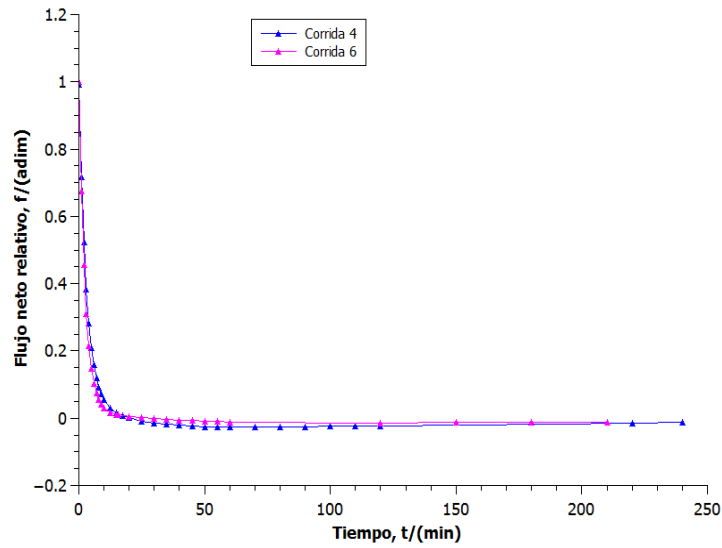
Finalmente, en la Figura 3.7 se muestran las 6 corridas realizadas para la mezcla de biodiésel, 6 debido a que como se puede ver, la corrida 5 presenta un comportamiento distinto a las demás, esto debido a que durante el desarrollo de las mediciones de temperatura, uno de los sensores ubicado en el fondo del tubo de vidrio falló, por lo que los resultados utilizados para el cálculo de la eficiencia fueron solamente los del sensor restante, por lo cual se obtiene dicha curva.



**Figura 3.7.** Flujo neto relativo de calor en función del tiempo para la mezcla de biodiésel

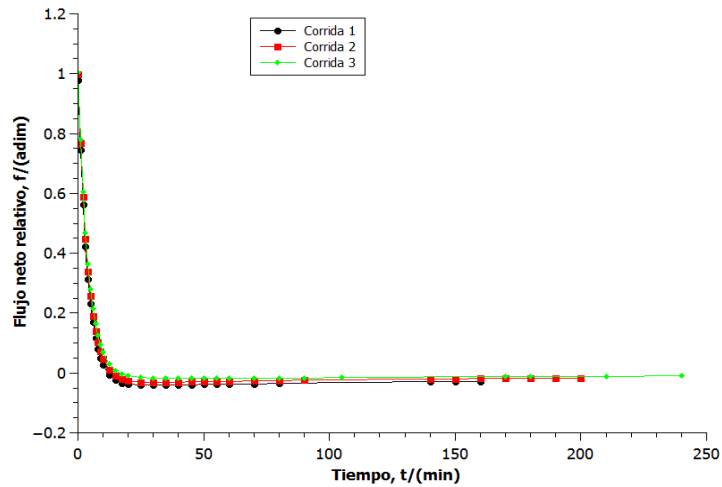
Al igual que las corridas anteriores, se puede ver en la Figura 3.7 como todas las mediciones realizadas siguen la tendencia de una curva con decaimiento exponencial. Seguidamente, al ser una mezcla 50:50 en volumen de ambos biodiésel se supone una capacidad calorífica promedio entre ambos valores, al igual que el parámetro  $J$ ,  $2.25 \text{ kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$  y  $2.1 \text{ kWK}^{-1}\text{m}^{-3}$  respectivamente y conociendo este último se procede a calcular con la ecuación 5 la conductividad térmica, obteniendo un valor de  $0.28 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ , conociendo esta información y al compararla con el de las demás sustancias utilizadas resulta en valores que podrían suponer un comportamiento similar al biodiésel EB, sin embargo, al observar la Figura 3.7 se obtienen curvas donde el flujo neto relativo se mantiene en valores mayores a cero aun después de pasados los 15 min, por lo que resulta importante separar la curva en dos partes, una donde la temperatura inicial del biodiésel es superior a los  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  y otra donde es menor a este valor, esto con el fin de observar y poder explicar este comportamiento obtenido. Las dos curvas se muestran en las Figuras 3.8 y 3.9.





**Figura 3.8.** Flujo neto relativo de calor en función del tiempo para las corridas a temperatura alta de la mezcla de biodiésel

En la Figura 3.8 se observa que las 2 corridas mostradas siguen una misma tendencia, además de que se empiezan a ver pérdidas pasados los 20 min, con excepción de la corrida 6 donde sucede al transcurrir 35 min, lo cual repercute en que el agua contenida en el tanque externo alcance temperaturas de aproximadamente  $39\text{ }^{\circ}\text{C}$ , que si bien es inferior al sistema de referencia agua caliente-agua fría, presenta una eficiencia de transferencia mayor a este sistema de referencia.



**Figura 3.9.** Flujo neto relativo de calor en función del tiempo para las corridas a baja temperatura de la mezcla de biodiésel

Ahora bien, en la Figura 3.9 se tienen las corridas donde la temperatura promedio inicial del biodiésel fue inferior a 90 °C y donde el proceso empieza a mostrar pérdidas al pasar los 10 min, por lo que se obtiene un resultado importante al utilizar este tipo de mezcla. A temperaturas superiores a los 100 °C del biodiésel es posible obtener una eficiencia del proceso de transferencia de calor tal que el proceso empiece a mostrar pérdidas significativas hacia el ambiente por encima de 20 min, tal como sucede en las corridas 4 y 6 como se observa en las Figuras A.34 y A.36 respectivamente. Además, como el fin del presente análisis es utilizar uno de estos líquidos en aplicaciones termo solares, como el caso de un colector solar, resulta importante el uso de la mezcla de biodiésel, pues en zonas con alta radiación solar, es posible obtener temperaturas elevadas del biodiésel y por ende tener un alto tiempo de transferencia de calor hacia el agua lo cual se traduce en que se logre obtener agua caliente sanitaria a una temperatura elevada, minimizando los problemas de obstrucción que posee el agua misma, o de contaminación en los casos donde se utilizan derivados de petróleo.

El hecho de que la mezcla de biodiésel logre alcanzar resultados distintos a los obtenidos por ambos biodiésel de forma separada puede ser debido al tipo de sustancia obtenida, la cual probablemente logra tener un equilibrio entre los compuestos saturados e insaturados de ambos biodiésel, los cuales posiblemente formen una estructura con mayor conjugación a la que poseen los dos biodiésel por separado, puesto que el biodiésel de H&M al ser mayoritariamente de origen de grasas animales, consiste en ácidos grasos de cadena insaturada los cuales son moléculas rígidas con poca movilidad, mientras que el biodiésel EB está compuesto mayoritariamente de ácidos grasos de cadena saturada los cuales poseen mayor movilidad. Además, es posible que las insaturaciones presentes en la molécula de los ácidos grasos empiecen a romperse conforme se incrementa la temperatura, lo cual propicia la estabilidad en la mezcla y de allí que se obtengan los resultados obtenidos (Pauly et al., 2014).

Por otro lado, se tiene que esta mezcla de biodiésel presenta ventajas con respecto al agua, pues es posible utilizarlo en sistemas donde se alcancen temperaturas superiores a 100 °C, sin tener problemas de corrosión e incrustaciones, pues en las corridas realizadas, no se logró

observar formación de precipitados ya sea en el precalentamiento o durante las corridas realizadas, lo cual resulta en ahorros en términos económicos y técnicos, pues la eficiencia del proceso no se va a ver reducida en el tiempo debido a que no se va a ir oxidando o incrustando el medio conforme pase el tiempo, hecho que ocurre con el agua.

Finalmente, al ser fluidos orgánicos que poseen una viscosidad mayor a la del agua, al operar a temperaturas altas esta propiedad disminuye, por lo que la utilización de bombas simples de agua caliente resulta posible, además, se obtiene que a medida que disminuye la viscosidad del fluido, aumenta su flujo térmico inducido volumétrico, lo cual favorece aún más su utilización en este tipo de aplicaciones (colección termosolar) (Rodríguez et al., 2018).

### **3.1 Evaluación de la eficiencia de intercambio de calor en el prototipo de colector solar**

Una vez que se determinó que la mezcla de biodiésel es la sustancia a utilizar en el prototipo de colector termosolar debido a sus propiedades de transporte térmico obtenidas anteriormente, se procedió a realizar el diseño y construcción del equipo. Para esto se utilizó un sistema de colector solar de lámina plana pues según Lizana 2015 este tipo de colectores solares son los más utilizados a nivel residencial nacional, además de que se pretende obtener agua caliente sanitaria con temperatura cercana a los 40 °C – 45 °C con el fin de lograr satisfacer las necesidades de la Soda, esto según indicaron los encargados de dicho lugar quienes comentan que esta es la temperatura aproximada que se utiliza en el lavado de utensilios de cocina como platos, vasos, ollas y limpiones. Con esto se obtuvo la eficiencia de las diferentes corridas realizadas tanto para agua como referencia como la mezcla de biodiésel, las cuales se muestran en el Cuadro 3.1.

**Cuadro 3.1.** Resultados obtenidos de la eficiencia del colector solar

Sustancia	Corrida	Eficiencia, $\eta$ (%)
Agua	1 <sup>1</sup>	40.60
	2 <sup>2</sup>	45.23
	3 <sup>1</sup>	18.35
	4 <sup>1</sup>	27.15
Mezcla biodiésel	5 <sup>1</sup>	35.66
	6 <sup>2</sup>	21.11
	7 <sup>2</sup>	25.87
	8 <sup>2</sup>	18.44

<sup>1</sup> Corresponde a corridas hechas con el flujo 1: 0.178 kg/s para el agua y 0.144 kg/s para la mezcla de biodiésel

<sup>2</sup> Corresponde a corridas hechas con el flujo 2: 0.157 kg/s para el agua y 0.127 kg/s para la mezcla de biodiésel

Al observar los resultados obtenidos es clara la diferencia obtenida con respecto al uso de la mezcla de biodiésel en el colector en comparación al agua como patrón, que con el primero se logra alcanzar una eficiencia de transferencia térmica no mayor a 35 %, mientras que al utilizar el agua se logra una eficiencia superior al 40 %. Este hecho puede resultar desfavorable para el uso del biodiésel pues muestra que los sistemas comerciales actuales de calentadores logran alcanzar eficiencias alrededor del 40 %, con temperaturas de calentamiento entre 40 °C y 60 °C (Chamsa-ard et al., 2014). Pero, como lo que se desea es encontrar un fluido sustituto para el agua y los aceites derivados de petróleo se obtiene un resultado favorable, pues se logra realizar un calentamiento suficiente para suplir las necesidades de agua caliente sanitaria estimadas para la soda estudiantil de la Sede de Guanacaste de la UCR. Además, al ser el sistema utilizado un prototipo construido, se toma el valor reportado en los sistemas comerciales como un valor ideal o meta, por lo que se tiene que los resultados obtenidos no distan de este valor ideal. Adicionalmente, si se observan los datos obtenidos en los Cuadros A.11 a A.17 se tiene que, si bien las corridas fueron realizadas en San Pedro, zona con un menor índice de radiación solar comparado con la zona de Liberia, se puede asumir que en este último se podría obtener agua a una temperatura mayor. Además, se estableció un tiempo de calentamiento de 2 h que era el tiempo en que se lograba obtener

un mayor índice de radiación solar, por lo que si se logra construir este tipo de sistemas en la zona de interés se podría aprovechar el largo lapso de tiempo con que se cuenta con elevados índices de radiación solar.

Ahora bien, con respecto al uso de la mezcla de biodiésel, se tiene que de los dos flujos utilizados, se observa en el Cuadro 3.1 que la eficiencia de transferencia de calor fue mayor cuando se utilizó el sistema con la válvula completamente abierta, o sea, con el flujo 1, por lo que en términos de operación del proceso se prefiere utilizar el sistema siendo operado a su capacidad máxima dada por la bomba, la cual es de 372.85 W ( $\frac{1}{2}$  HP), con lo cual se pueden reducir costos de construcción y de mantenimiento, pues no se cuenta con una válvula que regule el flujo que pase por el colector y que genere pérdidas de calor en el sistema. Adicionalmente, se observa en el Cuadro A.17 que en la corrida 8 fue posible obtener una temperatura máxima del agua cercana a 45 °C, aunque con una baja eficiencia de transferencia en el proceso, puesto que fue el día donde se obtuvo la mayor radiación solar térmica, dato que ligado al flujo utilizado pudo causar que se obtuviera esta temperatura del agua, pues al reducir la rapidez de la mezcla de biodiésel, aumenta el tiempo de transferencia de calor efectivo entre éste y el agua y sabiendo que la mezcla de biodiésel del estudio realizado primeramente resultó ser la mejor sustancia para este tipo de aplicaciones por unidad de volumen, en un mayor tiempo dado, es de esperar que se logre dicho calentamiento, no obstante, no es un resultado que se pueda corroborar y comparar con las demás mediciones realizadas, pues al ser el proceso dependiente de las condiciones climáticas, no se logró realizar el experimento en las mismas condiciones durante todos los días del estudio.

Por otra parte, en cuanto al prototipo construido, se tiene que, si bien se necesitaba un serpentín con 70 vueltas aproximadamente, no fue posible construirlo en esas dimensiones y más bien se hizo con 23 vueltas, esto debido a complicaciones técnicas a la hora de formar la espiral y realizar los trabajos de soldadura en el tanque, hecho que repercute en el proceso, pues se disminuye el área de transferencia supuesto y así la temperatura posible a alcanzar por el agua. Ligado a esto, se tiene que la mayoría de materiales utilizados fueron obtenidos por donaciones y que no tienen aplicación en sistemas solar-térmicos, pero que resultaron satisfactorios, pues se alcanzó obtener agua a la temperatura deseada.

Finalmente, si bien al utilizar agua como fluido de transferencia resulta en un sistema más eficiente, la temperatura alcanzada por el agua caliente sanitaria no resulta mayor en comparación al biodiésel, que resultó en un sistema de menor eficiencia, pero que posee características interesantes para posteriores investigaciones, además, que con la temperatura alcanzada se logra alcanzar el objetivo de temperatura indicado por las personas encargadas de la Soda Estudiantil.

## CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

- Los datos obtenidos en el estudio de las propiedades de transporte térmico siguen el modelo de decaimiento exponencial de la Ley de Newton.
- Se obtuvieron valores de conductividad térmica para el agua, aceite de palma y la mezcla de biodiésel de  $0.55 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ,  $0.18 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  y  $0.28 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  respectivamente, utilizando una geometría de tubular.
- En el caso del sistema agua caliente a agua fría, entre mayor sea la temperatura inicial del primero, mayor será el flujo neto de transferencia de calor hacia el agua fría y por ende se darán más rápido pérdidas hacia el ambiente.
- Con excepción de las corridas realizadas para la mezcla de biodiésel, se tiene que alrededor de transcurridos 10 min del proceso, se empiezan a tener pérdidas significativas de calor en el sistema.
- Entre mayor sea la capacidad calorífica de una sustancia, mayor será su capacidad de almacenamiento de energía interna lo cual favorezca la “retención” de calor ganado por parte de una sustancia.
- Entre mayor sea el valor del flujo térmico inducido volumétrico, mayor será la capacidad de transferencia de energía térmica por unidad de volumen de una sustancia.
- En sustancias orgánicas, a medida que disminuyen las insaturaciones en la cadena carbonada, aumenta su capacidad de almacenamiento y transmisión de energía térmica por unidad de volumen.
- En la mezcla de biodiésel, al poseer propiedades intermedias, se logra una estabilidad de las propiedades térmicas estudiadas en temperaturas superiores a los  $95 \text{ }^\circ\text{C}$ , lo cual aumenta su eficiencia en el proceso de transferencia de energía térmica.
- El sistema mezcla biodiésel presenta las mejores condiciones en cuanto a tiempo efectivo de transferencia de calor hacia el agua fría.

- A medida que disminuye la viscosidad de una sustancia, aumenta el flujo térmico inducido volumétrico y por ende su capacidad de transferencia de calor por unidad de volumen.
- La eficiencia térmica del colector termosolar al utilizar agua como patrón fue de 42.92 %, mientras que al utilizar la mezcla de biodiésel fue de 24.43 % en promedio.
- Utilizando un radiador usado de carro y materiales de fácil obtención en una ferretería, es posible obtener agua caliente sanitaria con temperaturas superiores a 40 °C, usando una mezcla de biodiésel como fluido de transferencia de calor.
- Si bien el agua resulta en un sistema con mayor eficiencia térmica que la mezcla de biodiésel, la temperatura del agua caliente sanitaria alcanzada por este último es mayor.

## **4.2 Recomendaciones**

- ✓ Modificar el sistema de tanque de PVC para el estudio de las propiedades térmicas tal que permita el movimiento de ambos líquidos.
- ✓ Replicar el estudio de las propiedades de transporte térmico a más fluidos orgánicos de origen renovable.
- ✓ Estudiar el efecto de la proporción de los biodiésel utilizados en la mezcla en el estudio de sus propiedades térmicas.
- ✓ Desarrollar un estudio de estabilidad térmica de la mezcla de biodiésel.
- ✓ Llevar a cabo una caracterización de los ácidos grasos presentes en ambos biodiésel, con el fin de determinar el % de composición de éstos y así lograr predecir mejor sus propiedades de transporte térmico.
- ✓ Realizar el estudio con el prototipo de colector termosolar en una zona donde se tenga mayor índice de radiación solar.
- ✓ Comparar el prototipo de colector solar utilizado con la mezcla de biodiésel con sistemas comerciales actuales utilizando el mismo líquido como fluido de transporte.



## CAPÍTULO 5. NOMENCLATURA

### Acrónimos

EB Energías Biodegradables

### Griegas

$\alpha$	Difusividad térmica	$\text{mm}^2\text{s}^{-1}$
$\delta$	Se refiere a diferencial parcial	Adimensional
$\rho$	Densidad	$\text{kg}/\text{m}^3$
$\lambda$	Conductividad térmica	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
$\eta$	Eficiencia	Adimensional
$\nabla$	Operador nabra	Adimensional
$\mu$	Viscosidad	$\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$

### Mayúsculas

$A$	Área	$\text{m}^2$
$C_p$	Capacidad calorífica	$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
$G$	Radiación solar directa	$\text{Wm}^{-2}$
$H_r$	Radiación solar	$\text{Wm}^{-2}$
$J$	Flujo térmico inducido volumétrico	$\text{kWm}^{-3}\text{K}^{-1}$
$\dot{Q}$	Flujo de calor	W
$P$	Presión	Pa
$Re$	Número de Reynolds	Adimensional
$T$	Temperatura	K
$U$	Coficiente de transferencia de calor	$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$
$V$	Volumen	$\text{m}^3$

### Minúsculas

$d$	Se refiere a diferencial	Adimensional
$f$	Flujo neto relativo	Adimensional

<i>h</i>	Altura	m
<i>m</i>	Masa	Kg
<i>ṁ</i>	Flujo másico	kg/s
<i>t</i>	Tiempo	S

### **Superíndices**

\* Corrección

### **Subíndices**

1	Indica 1
2	Indica 2
3	Indica 3
<i>c</i>	Se refiere al colector solar
<i>C</i>	Indica limpio
<i>D</i>	Indica global
<i>e</i>	Indica entrada o externo
<i>i</i>	Indica interno
<i>lleno</i>	Se refiere a lleno
<i>max</i>	Indica máximo
<i>p</i>	Indica pérdidas
<i>PVC</i>	Se refiere a PVC
<i>prom</i>	Indica promedio
<i>s</i>	Indica salida
<i>u</i>	Indica útil
<i>V</i>	Se refiere a vidrio
<i>vacío</i>	Se refiere a vacío

## CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA

- Acuña, E., Meza, C., Monge, F., Moya, G., Ramírez, R., & Tat, K. (2018, mayo). *Energía solar en Costa Rica (2014-2017)*.
- Applewhite, T. H. (Ed.). (1994). *Proceedings of the World Conference on Lauric Oils: Sources, processing, and applications*. Champaign, Ill: AOCS Press.
- ASTM International. (2008). ASTM Standard specification for biodiesel fuel (B100) blend stock for distillate fuels. En *Annual Book of ASTM Standards*. West Conshohocken.
- Attmann, O. (2010). *Green architecture: Advanced technologies and materials*. New York: McGraw-Hill.
- Beaty, H. W., & Fink, D. G. (Eds.). (2013). *Standard handbook for electrical engineers* (16. ed). New York, NY: McGraw-Hill.
- Bruice, P. Y. (2016). *Organic chemistry* (8a ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson.
- Castellón, E., Lutz, G., & Mata, J. F. (2006). The soft-solid model for liquids. Application to biodiesel and other materials of technological interest. *Journal of Physical Organic Chemistry*, 19(11), 744–747. <https://doi.org/10.1002/poc.1068>
- Chamsa-ard, W., Sukchai, S., Sonsaree, S., & Sirisamphanwong, C. (2014). Thermal Performance Testing of Heat Pipe Evacuated Tube with Compound Parabolic Concentrating Solar Collector by ISO 9806—1. *Energy Procedia*, 56, 237–246. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.154>
- DeOliveira, E., Quirino, R. L., Suarez, P. A. Z., & Prado, A. G. S. (2006). Heats of combustion of biofuels obtained by pyrolysis and by transesterification and of biofuel/diesel blends. *Thermochimica Acta*, 450(1–2), 87–90. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2006.08.005>

- Enteria, N., & Akbarzadeh, A. (2014). *Solar energy sciences and engineering applications*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Garzón, J., & Ramírez, J. (2015). *Determinación de la eficiencia térmica instantánea y la temperatura de salida del colector solar PSHC-1C, del sistema de entrenamiento en energía solar térmica, ubicado en la Fundación Universitaria los Libertadores*. Fundación Universitaria los Libertadores, Bogotá, Colombia.
- Glória Pereira, M., & Mudge, S. M. (2004). Cleaning oiled shores: Laboratory experiments testing the potential use of vegetable oil biodiesels. *Chemosphere*, 54(3), 297–304. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(03\)00665-9](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00665-9)
- Ishii, Y., Sato, K., Salanne, M., Madden, P. A., & Ohtori, N. (2014). Thermal conductivity of simple liquids: Origin of temperature and packing fraction dependences. *The Journal of Chemical Physics*, 140(11), 114502. <https://doi.org/10.1063/1.4868438>
- ISO. (2013). *ISO/FDIS 9806 Solar energy—Solar thermal collectors—Test methods*.
- Josht, B., & Weigl, T. (2014). *La irradiación solar como factor importante para la factibilidad de un proyecto de energía fotovoltaica*. Presentado en II Congreso Nacional sobre fuentes alternativas de energía y materiales “Dr. Adrián Chaverri Rodríguez”.
- Kern, D. Q. (1997). *Process heat transfer*. New Delhi; Sydney: Tate McGraw-Hill Publishing Company.
- Knothe, G. (2008). “Designer” Biodiesel: Optimizing Fatty Ester Composition to Improve Fuel Properties †. *Energy & Fuels*, 22(2), 1358–1364. <https://doi.org/10.1021/ef700639e>

- Knothe, G., Van Gerpen, J. H., & Krahl, J. (Eds.). (2005). *The biodiesel handbook*. Champaign, Ill: AOCS Press.
- Kole, C., Joshi, C. P., & Shonnard, D. (Eds.). (2012). *Handbook of bioenergy crop plants*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Leblanc, J., Akbarzadeh, A., Andrews, J., Lu, H., & Golding, P. (2011). Heat extraction methods from salinity-gradient solar ponds and introduction of a novel system of heat extraction for improved efficiency. *Solar Energy*, 85(12), 3103–3142. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.06.005>
- Lizana, F. (2015). Desarrollo de sistemas de agua caliente sanitaria en Costa Rica a partir de la energía solar. *Tecnología en Marcha*, 28(1), 3–14.
- Lutz, G., Chavarría, M., Arias, M. L., & Mata, J. (2006). Microbial degradation of palm (*Elaeis guineensis*) biodiesel. *Revista biología tropical*, 54(1), 59–63.
- Mancini, A., Imperlini, E., Nigro, E., Montagnese, C., Daniele, A., Orrù, S., & Buono, P. (2015). Biological and Nutritional Properties of Palm Oil and Palmitic Acid: Effects on Health. *Molecules*, 20(9), 17339–17361. <https://doi.org/10.3390/molecules200917339>
- McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriott, P. (2005). *Unit operations of chemical engineering* (7a ed.). Boston: McGraw-Hill.
- Nandwani, S. S. (2016). Thirty-Five Years of Experience with Research, Promotion and Use of Solar Cookers to Save Conventional Fuels and Reduce Carbon Emission. En A. Sayigh (Ed.), *Renewable Energy in the Service of Mankind Vol II* (pp. 851–858). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-18215-5\\_77](https://doi.org/10.1007/978-3-319-18215-5_77)

- National Research Council. (1976). *Fat Content and Composition of Animal Products: Proceedings of a Symposium*. <https://doi.org/10.17226/22>
- Oliveira, A. I. T. de, Mahmoud, T. S., Nascimento, G. N. L. do, Silva, J. F. M. da, Pimenta, R. S., & Morais, P. B. de. (2016). Chemical Composition and Antimicrobial Potential of Palm Leaf Extracts from Babaçu (*Attalea speciosa*), Buriti (*Mauritia flexuosa*), and Macaúba (*Acrocomia aculeata*). *The Scientific World Journal*, 1–5. <https://doi.org/10.1155/2016/9734181>
- Pauly, J., Kouakou, A. C., Habrioux, M., & Le Mapihan, K. (2014). Heat capacity measurements of pure fatty acid methyl esters and biodiesels from 250 to 390 K. *Fuel*, 137, 21–27. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.07.037>
- Paz, J. (2005). *Colectores solares planos: Tratamiento teórico* (1a ed., Vol. 1). Ciudad Juárez, Chihuahua: Instituto de Ingeniería y Tecnología.
- Perry, R. H., & Green, D. W. (Eds.). (2008). *Perry's chemical engineers' handbook* (8a ed.). New York: McGraw-Hill.
- Quinteros, D. (2012). *Estudio de la eficiencia del sistema solar térmico en el barrio San Valentín, Comuna de los Prado*. Universidad de Santiago de Chile, Santiago.
- Ratna, D. (2012). Thermal properties of thermosets. En *Thermosets* (pp. 62–91). <https://doi.org/10.1533/9780857097637.1.62>
- Rodríguez, F., Fiore, S., Zúñiga, M., Miranda, B., & Mata, J. (2018). Newton's Cooling Rate Constant of Liquids for the Relative Assessment for Heat Transport. *International Journal of Renewable Energy & Biofuels*, 2018, 8.
- Salazar, A. n. (2003). On thermal diffusivity. *European Journal of Physics*, 24(4), 351–358. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/24/4/353>

- Skipka, K. J., & Theodore, L. (2014). *Energy resources: Availability, management, and environmental impacts*. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1201/b16782>
- Tomes, D., Lakshmanan, P., & Songstad, D. (Eds.). (2011). *Biofuels*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7145-6>
- U.S Department of Energy. (2017, junio 14). Environmental Justice Strategy. Recuperado de [https://energy.gov/sites/prod/files/nepapub/nepa\\_documents/RedDont/G-DOE-EJ\\_Strategy.pdf](https://energy.gov/sites/prod/files/nepapub/nepa_documents/RedDont/G-DOE-EJ_Strategy.pdf)
- Wildes, S. (2002). Methyl soyate: A new green alternative solvent. *Chemical Health and Safety*, 9(3), 24–26. [https://doi.org/10.1016/S1074-9098\(02\)00292-7](https://doi.org/10.1016/S1074-9098(02)00292-7)

## Apéndice A: Datos experimentales

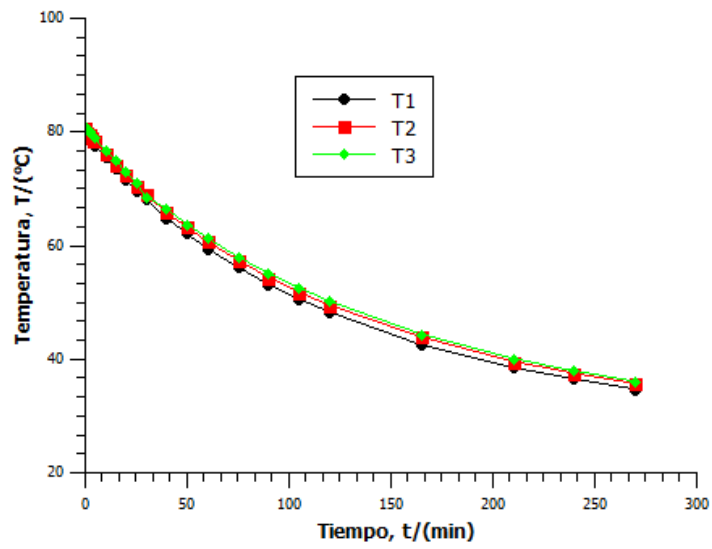


Figura A.1. Corrida 1 agua caliente hacia ambiente sin aislamiento

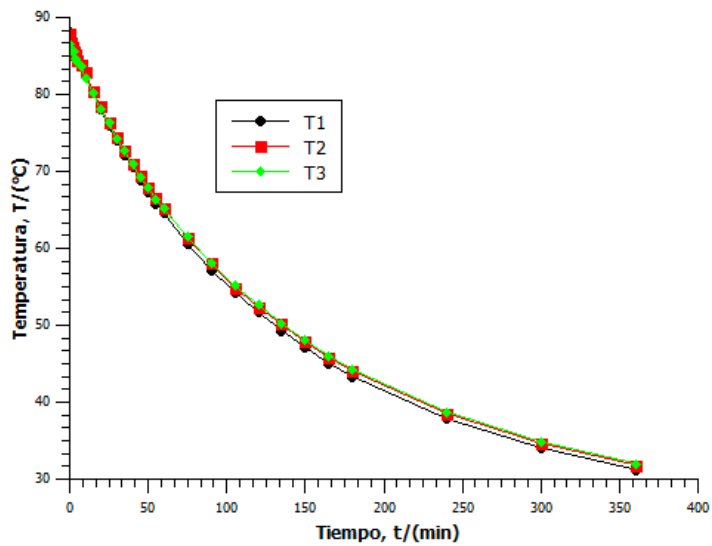
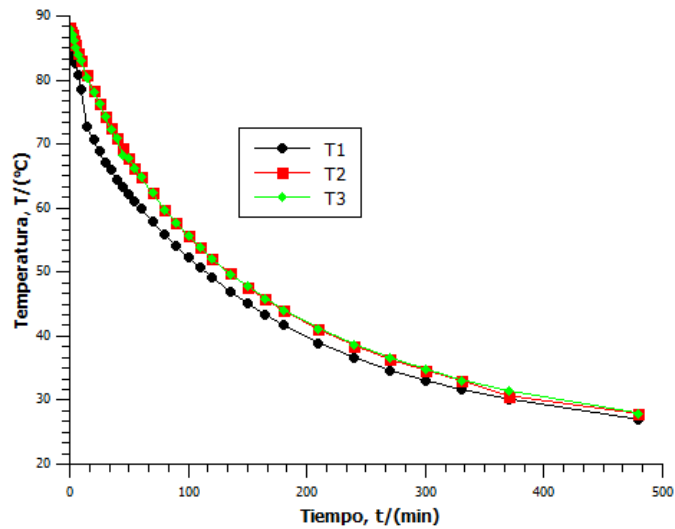


Figura A.2. Corrida 2 agua caliente hacia ambiente sin aislamiento

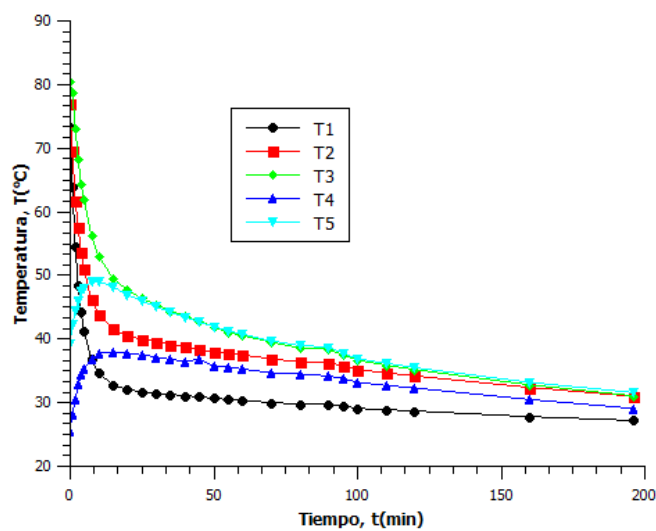




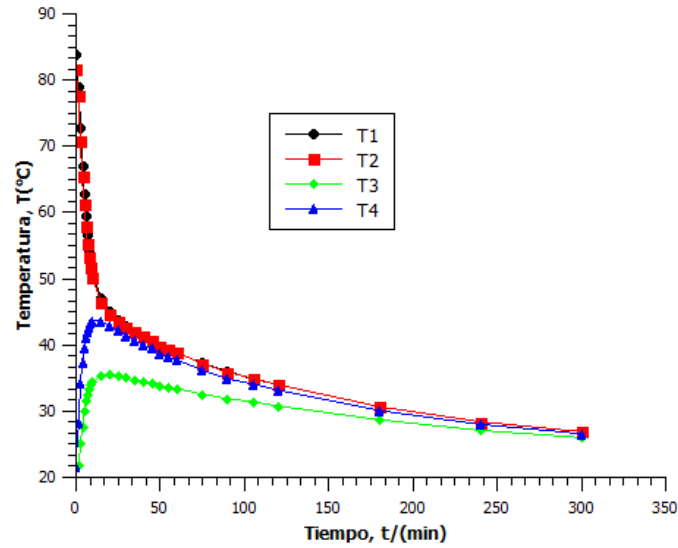
**Figura A.3.** Corrida 3 agua caliente hacia ambiente sin aislamiento

**Cuadro A.1.** Información básica de las corridas de agua caliente a ambiente

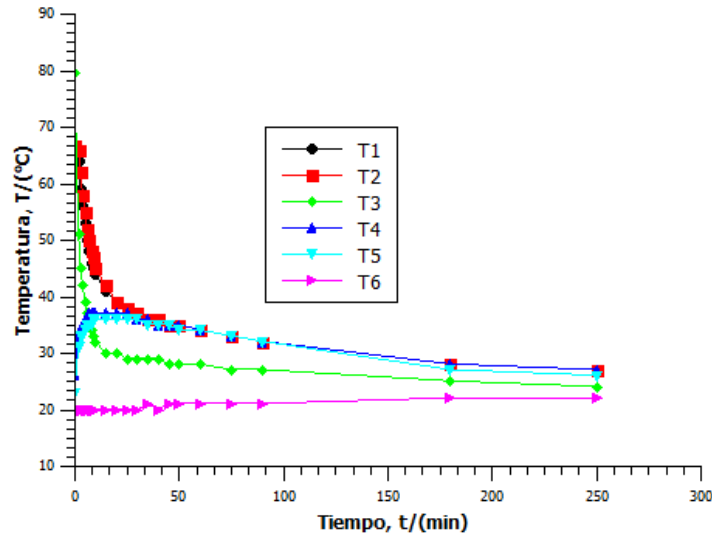
Corrida	Temperatura ambiente,	Volumen de agua,
	$T_{amb}/(^{\circ}C)$	$V_{agua}/(L)$
1	27.0	4.0
2	25.5	4.0
3	24.7	4.0



**Figura A.4.** Corrida 1 agua caliente a agua fría sin aislamiento



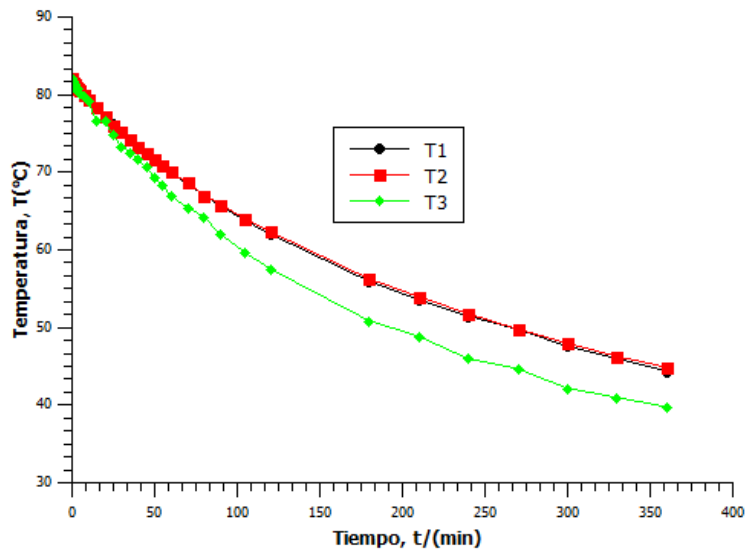
**Figura A.5.** Corrida 2 agua caliente a agua fría sin aislamiento



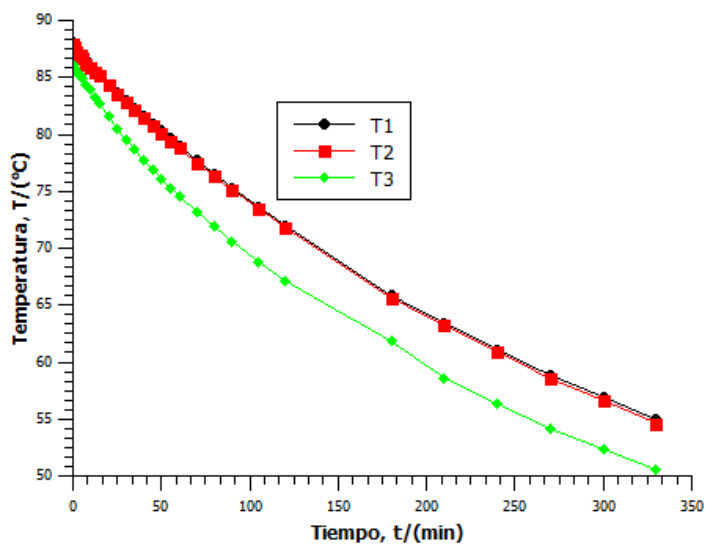
**Figura A.6.** Corrida 3 agua caliente a agua fría sin aislamiento

**Cuadro A.2.** Información básica de las corridas de agua hacia agua sin aislamiento

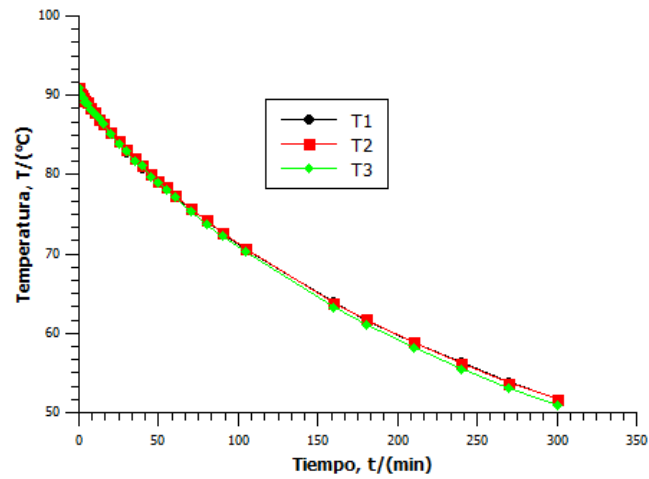
Corrida	Volumen, $V_{PVC}$ /(L)	Volumen, $V_{vidrio}$ /(L)	Altura, $h_{PVC}$ /(cm)	Altura, $h_{vidrio}$ /(cm)
1	4.6	1.6	65.1	56.8
2	5.2	1.4	72.0	52.0
3	5.0	1.2	72.0	53.0



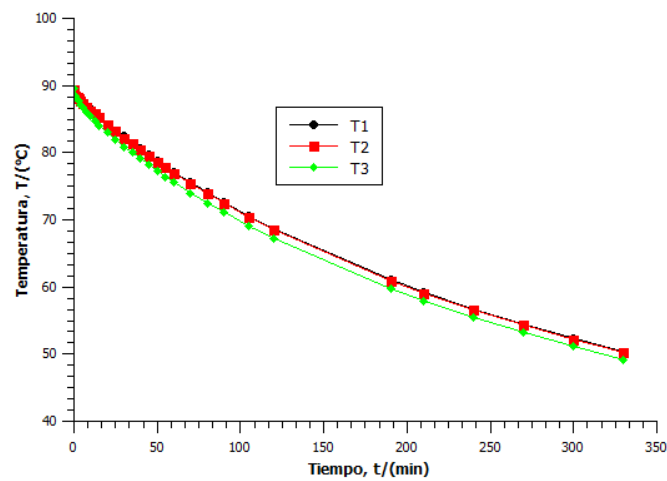
**Figura A.7.** Corrida 1 agua caliente hacia ambiente con aislamiento



**Figura A.8.** Corrida 2 agua caliente hacia ambiente con aislamiento



**Figura A.9.** Corrida 3 agua caliente hacia ambiente con aislamiento



**Figura A.10.** Corrida 4 agua caliente hacia ambiente con aislamiento

**Cuadro A.3.** Información básica de las corridas de agua a ambiente con el tanque aislado

Corrida	Temperatura ambiente, $T_{amb}/(^{\circ}C)$	Altura de la columna de líquido, $l/(cm)$
1	24.5	64
2	26.0	61
3	22.5	47
4	25.0	46

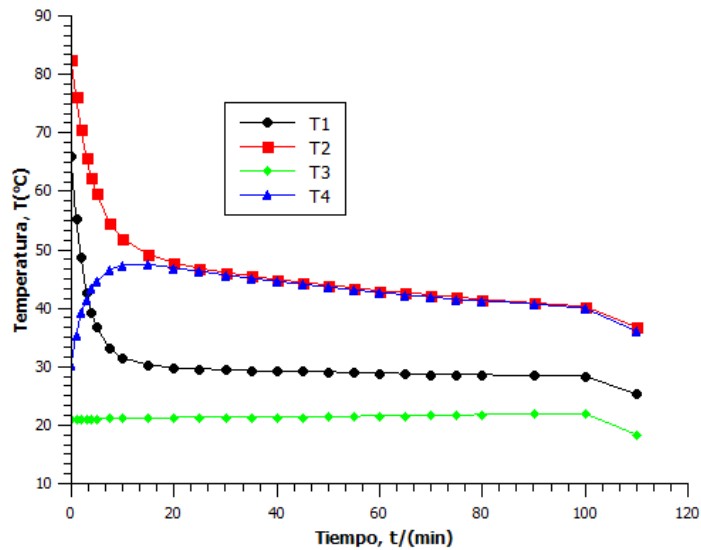


Figura A.11. Corrida 1 agua caliente a agua fría con aislamiento

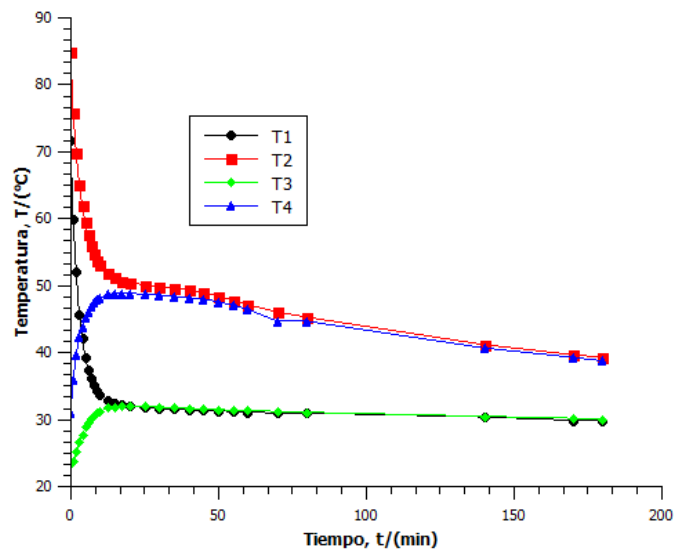


Figura A.12. Corrida 2 agua caliente a agua fría con aislamiento

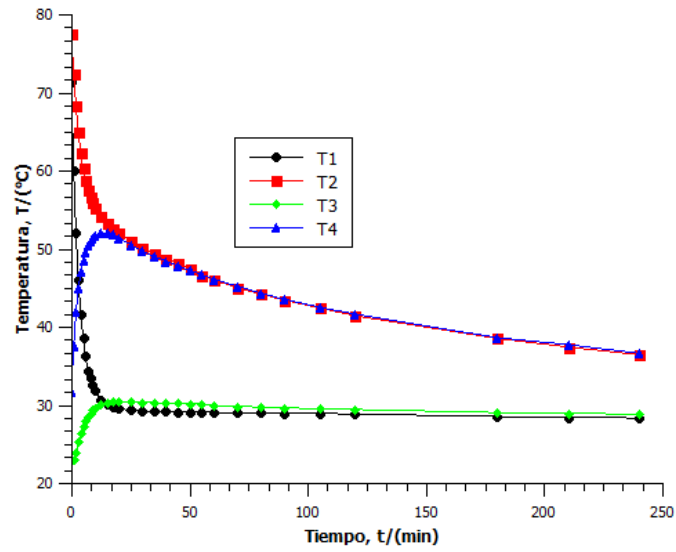


Figura A.13. Corrida 3 agua caliente a agua fría con aislamiento

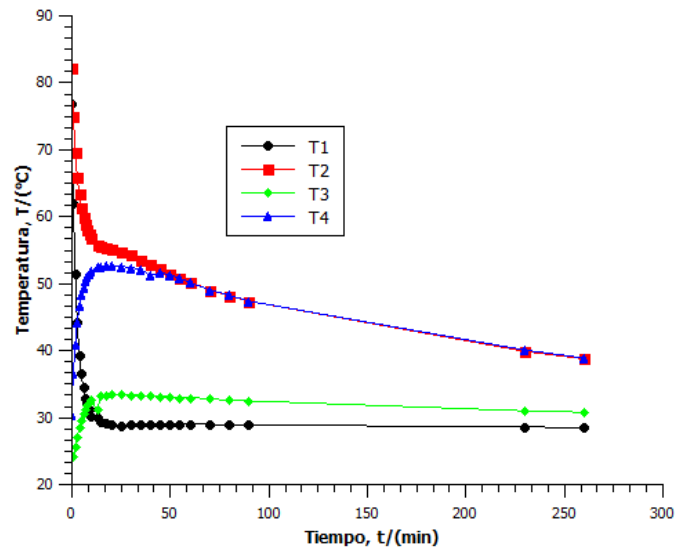


Figura A.14. Corrida 4 agua caliente a agua fría con aislamiento

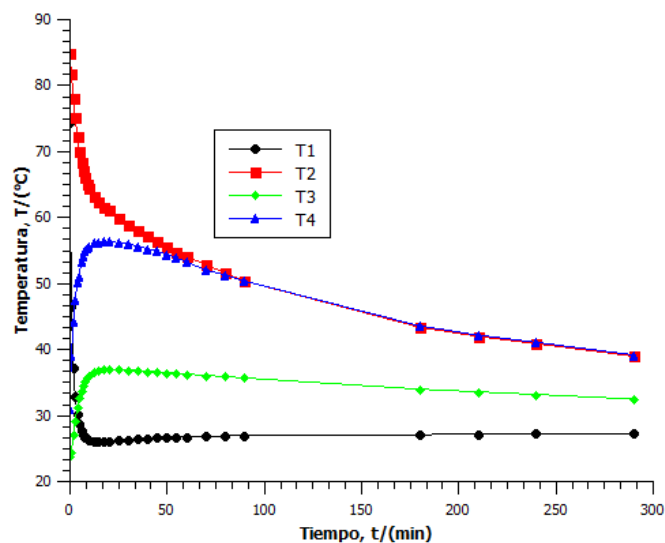


Figura A.15. Corrida 5 agua caliente a agua fría con aislamiento

Cuadro A.4. Información básica de las corridas de agua caliente a agua con aislamiento

Corrida	Temperatura, $T_{amb}/(^{\circ}C)$	Altura, $h_{PVC}/(cm)$	Volumen, $V_{vidrio}/(L)$
1	22.5	59.0	1.7
2	25.0	71.5	1.7
3	25.5	69.5	1.7
4	25.5	69.5	1.7
5	25.5	69.5	1.7

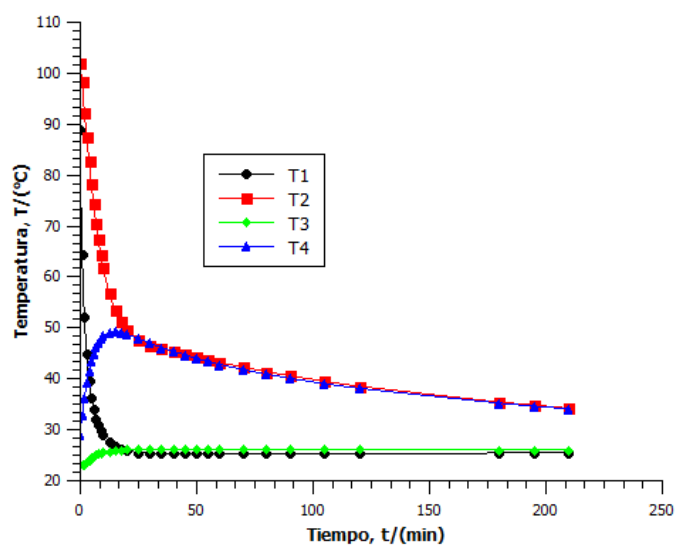
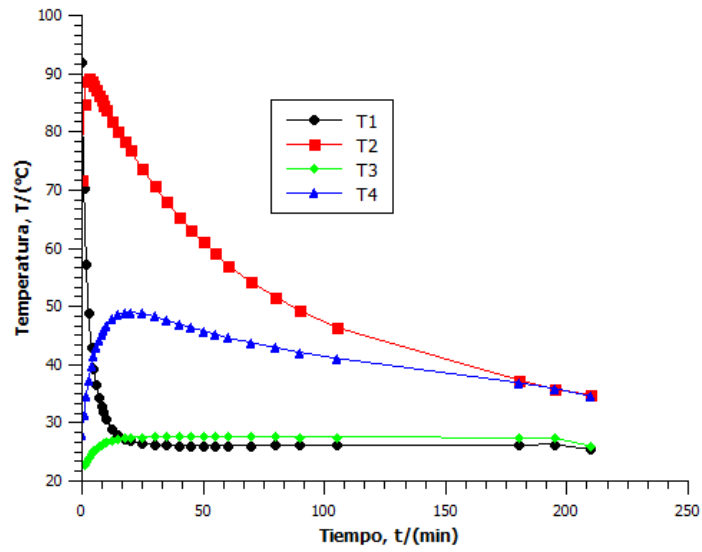
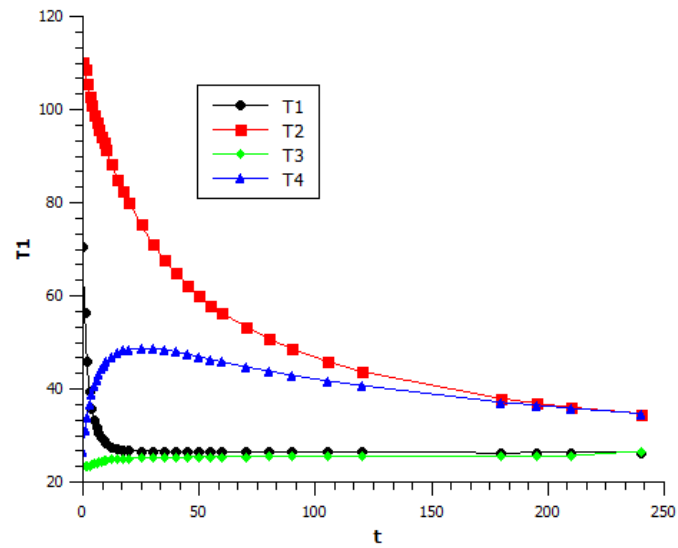


Figura A.16. Corrida 1 aceite caliente a agua fría con aislamiento



**Figura A.17.** Corrida 2 aceite caliente a agua fría con aislamiento



**Figura A.18.** Corrida 3 aceite caliente a agua fría con aislamiento



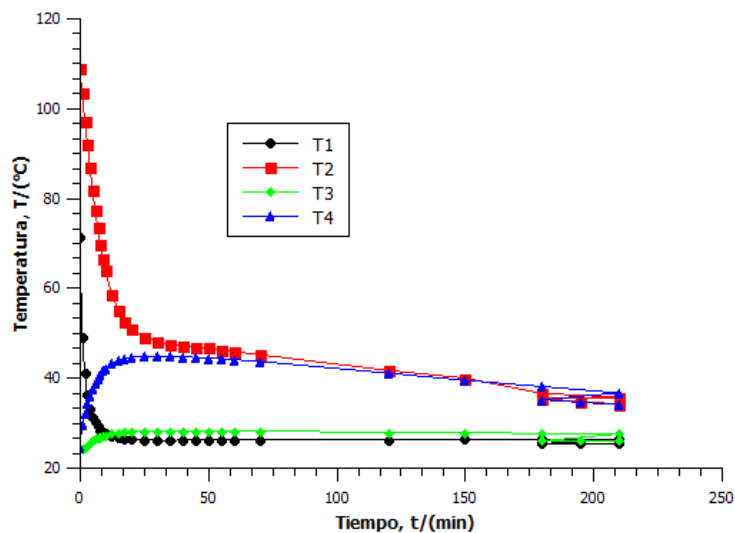


Figura A.19. Corrida 4 aceite caliente a agua fría con aislamiento

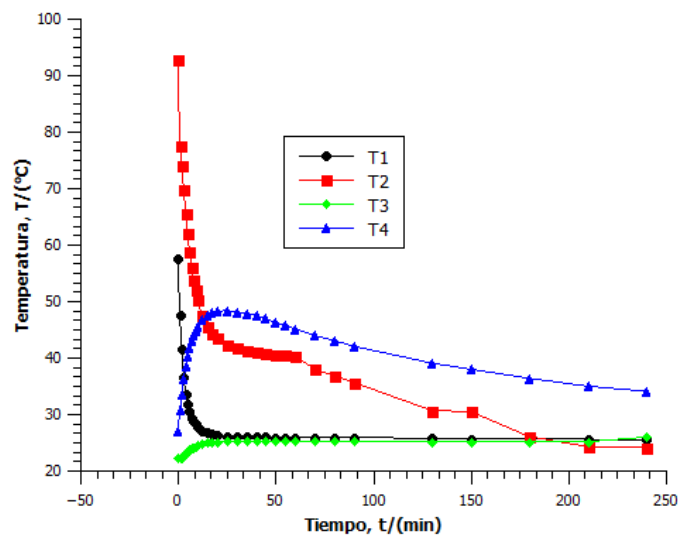


Figura A.20. Corrida 5 aceite caliente a agua fría con aislamiento

**Cuadro A.5.** Información básica de las corridas aceite caliente a agua fría con aislamiento

Corrida	Temperatura, $T_{amb}/(^{\circ}C)$	Altura, $h_{pvc}/(cm)$	Volumen, $V_{vidrio}/(L)$
1	25.0	56.3	1.7
2	26.8	56.2	1.7
3	25.0	55.8	1.7
4	26.5	55.0	1.7
5	24.0	54.5	1.7

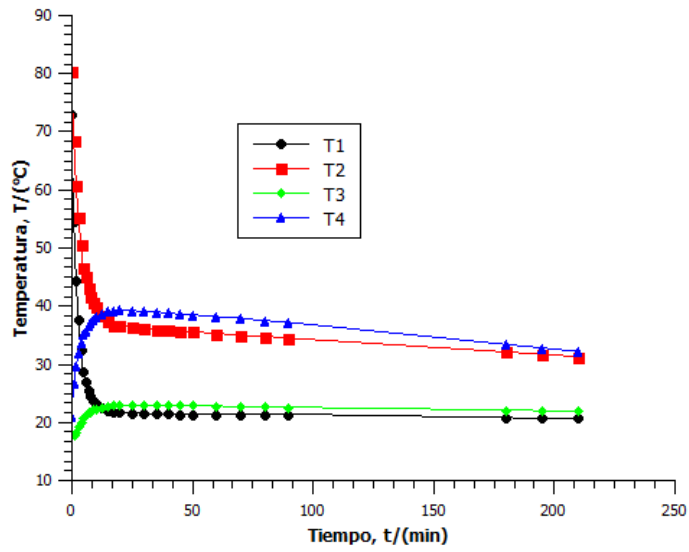


Figura A.21. Corrida 1 biodiésel H&M a agua fría con aislamiento

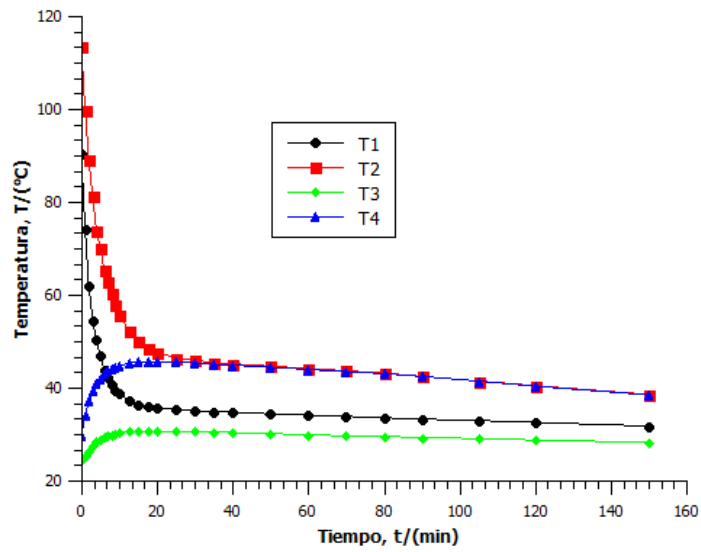
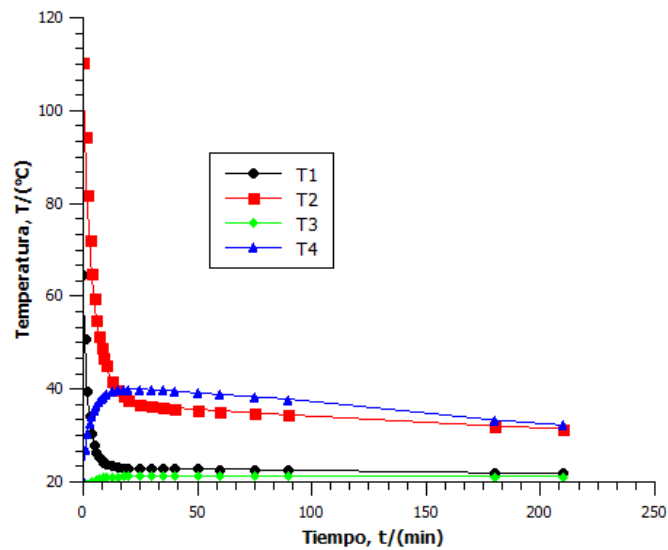
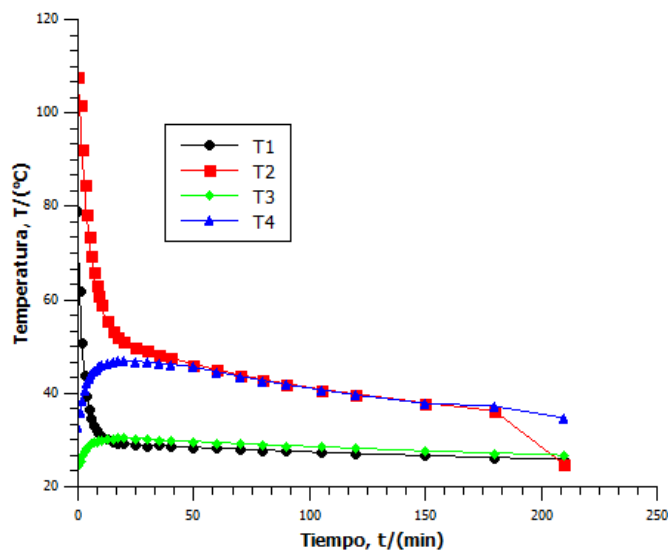


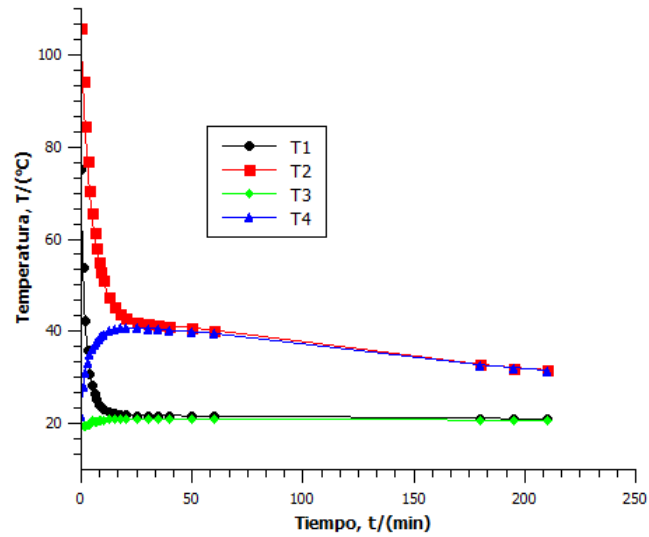
Figura A.22. Corrida 2 biodiésel H&M a agua fría con aislamiento



**Figura A.23.** Corrida 3 biodiésel H&M a agua fría con aislamiento



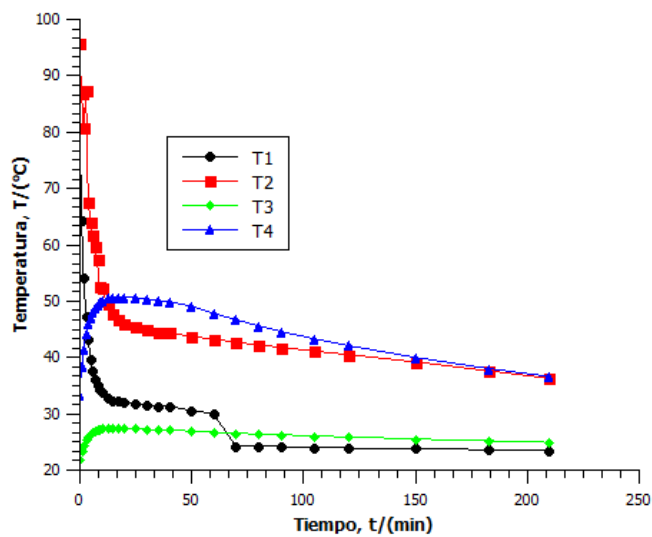
**Figura A.24.** Corrida 4 biodiésel H&M a agua fría con aislamiento



**Figura A.25.** Corrida 5 biodiésel H&M a agua fría con aislamiento

**Cuadro A.6.** Información básica de las corridas de biodiésel H&M a agua fría con aislamiento

Corrida	Temperatura, $T_{amb}/(^{\circ}C)$	Altura, $h_{pvc}/(cm)$	Volumen, $V_{vidrio}/(L)$
1	18.5	73.5	1.7
2	19.0	73.7	1.7
3	19.0	73.0	1.7
4	19.0	73.5	1.7
5	18.0	72.7	1.7



**Figura A.26.** Corrida 1 biodiésel EB a agua fría con aislamiento

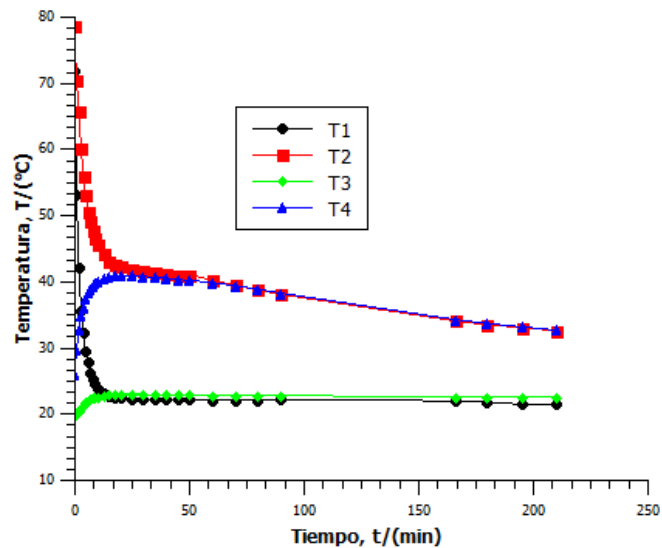


Figura A.27. Corrida 2 biodiésel EB a agua fría con aislamiento

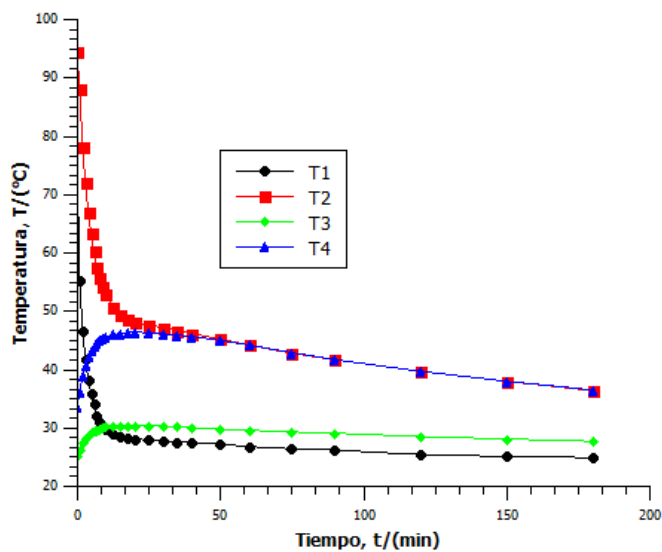


Figura A.28. Corrida 3 biodiésel EB a agua fría con aislamiento

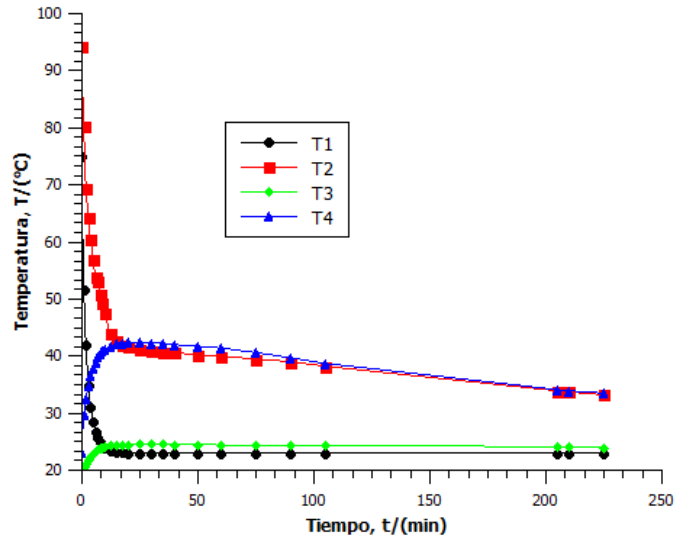


Figura A.29. Corrida 4 biodiésel EB a agua fría con aislamiento

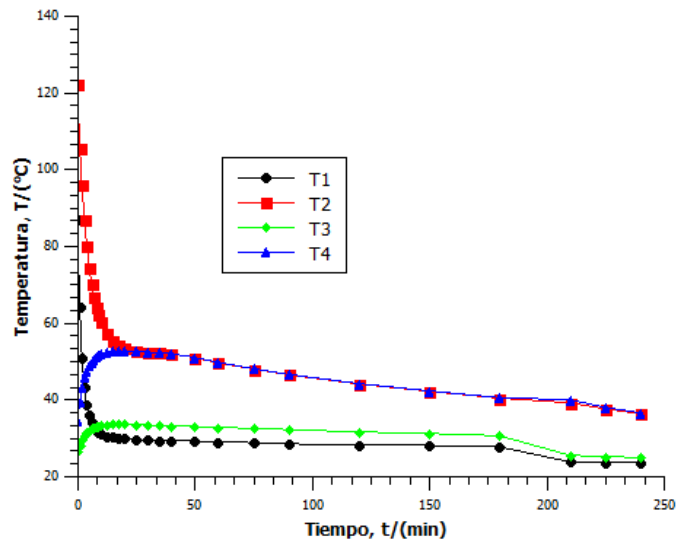
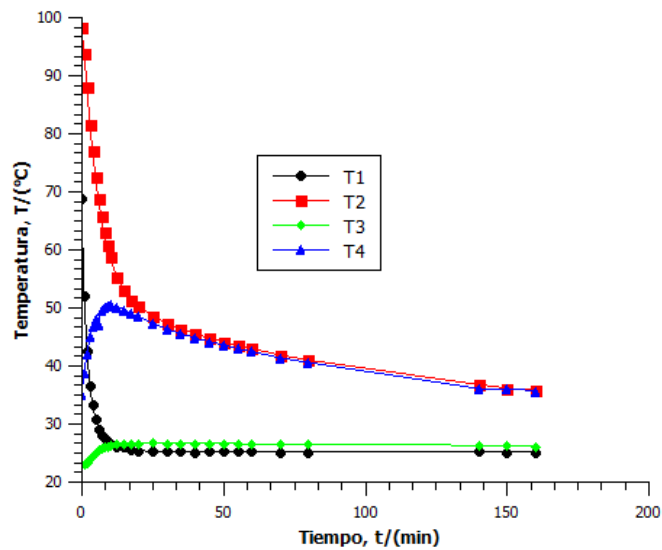


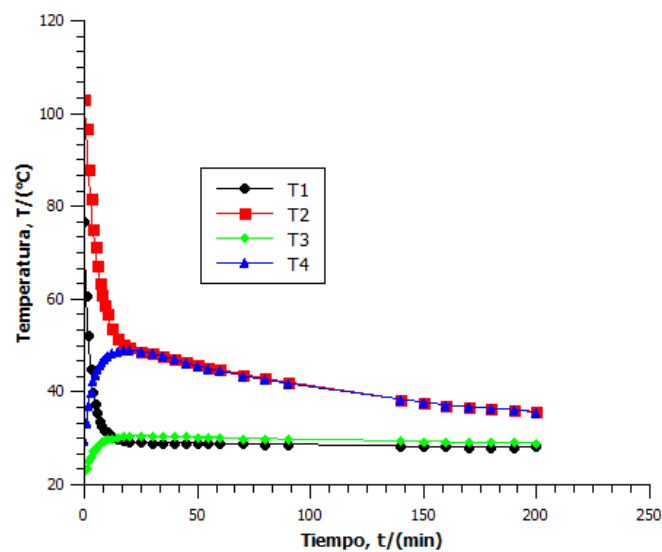
Figura A.30. Corrida 5 biodiésel EB a agua fría con aislamiento

Cuadro A.7. Información básica de las corridas de biodiésel EB a agua con aislamiento

Corrida	Temperatura, $T_{amb}/(^{\circ}C)$	Altura, $h_{pvc}/(cm)$	Volumen, $V_{vidrio}/(L)$
1	19.0	72.7	1.7
2	20.0	72.6	1.7
3	21.0	72.7	1.7
4	22.5	72.0	1.7
5	23.0	71.8	1.7



**Figura A.31.** Corrida 1 biodiésel mezcla a agua fría con aislamiento



**Figura A.32.** Corrida 2 biodiésel mezcla a agua fría con aislamiento

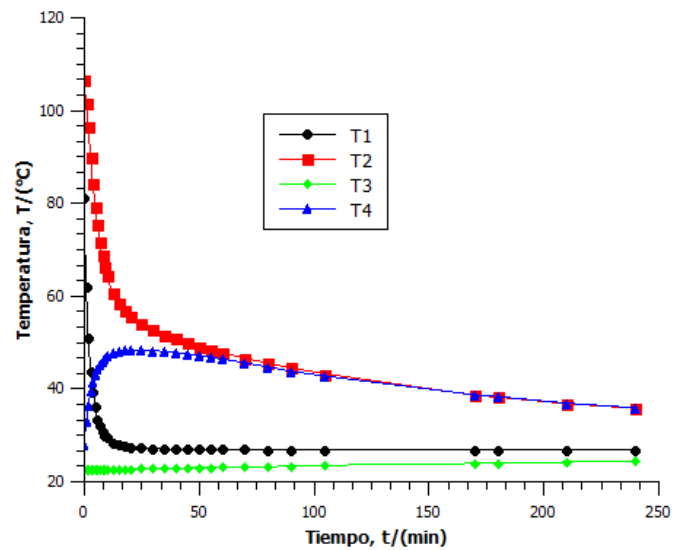


Figura A.33. Corrida 3 biodiésel mezcla a agua fría con aislamiento

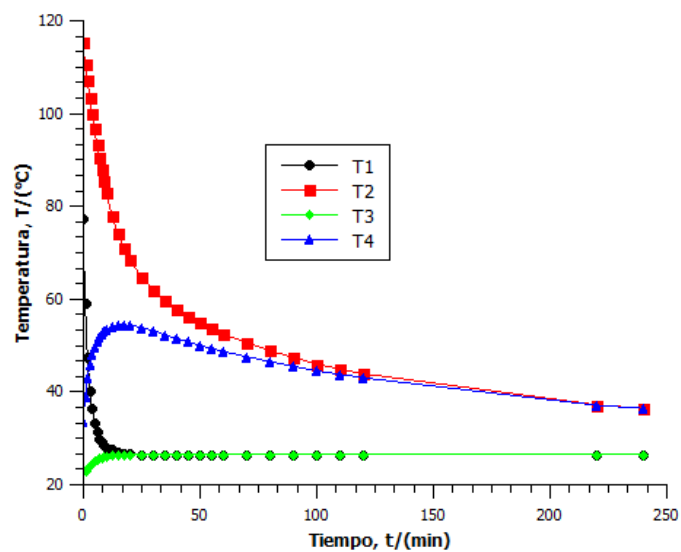


Figura A.34. Corrida 4 biodiésel mezcla a agua fría con aislamiento



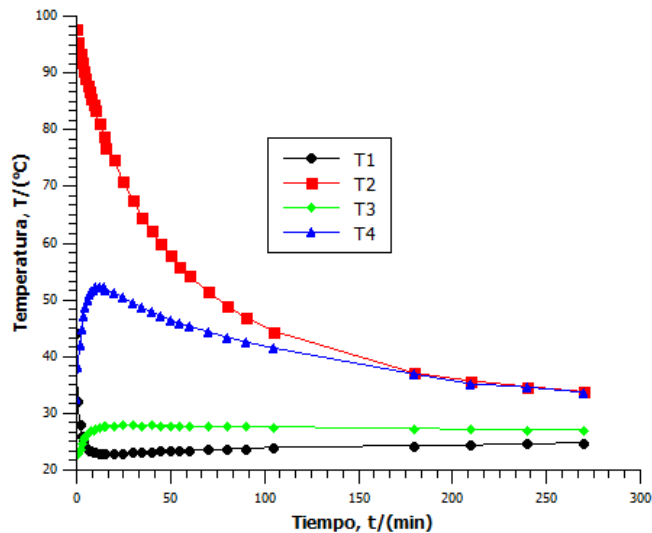


Figura A.35. Corrida 5 biodiésel mezcla a agua fría con aislamiento

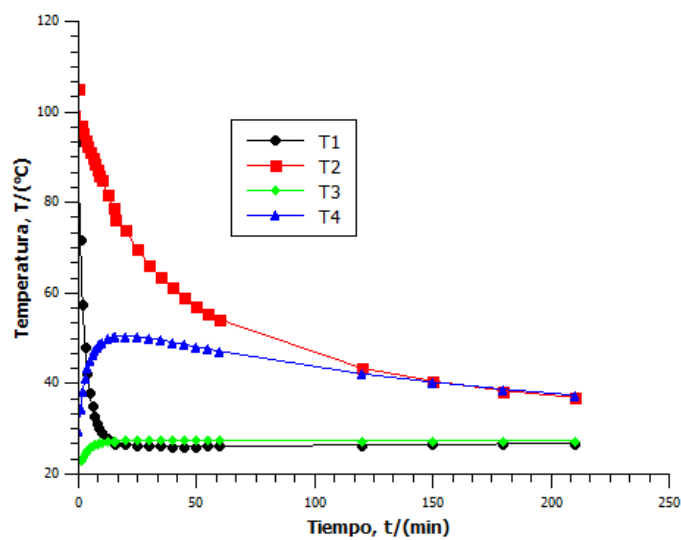


Figura A.36. Corrida 6 biodiésel mezcla a agua fría con aislamiento

Cuadro A.8. Información básica de las corridas de biodiésel mezcla a agua fría con aislamiento

Corrida	Temperatura, $T_{amb}/(^{\circ}C)$	Altura, $h_{pvc}/(cm)$	Volumen, $V_{vidrio}/(L)$
1	23.5	61.0	1.7
2	25.5	61.0	1.7
3	26.0	60.7	1.7
4	25.5	59.5	1.7
5	25.5	59.5	1.7
6	27.0	58.5	1.7

**Cuadro A.9.** Determinación de la densidad de la mezcla de biodiésel

Temperatura, T/(°C)	Masa picnómetro lleno, $m_{lleno}/(g)$
17.0	66.8792
18.0	66.8468
19.2	66.8052
20.0	66.7909
21.0	66.7682
22.0	66.7487
23.0	66.7296
25.0	66.6940
26.2	66.6709
27.4	66.6482
28.6	66.6283
29.2	66.6021
30.2	66.5852
31.0	66.5644
32.0	66.5377
<b>Masa picnómetro vacío, <math>m_{vacío}/(g)</math></b>	44.7106

**Cuadro A.10.** Corrida 1 del colector solar

Hora	Temperatura, T/(°C)		
	Tanque biodiésel	Retorno biodiésel	Tanque agua
11:45	24.8	22.9	24.2
12:15	28.4	27.8	27.7
12:45	30.6	30.6	30.1
01:15	29.5	29.7	29.3
01:45	31.2	31.4	30.9
<b>T<sub>amb</sub> inicial</b>	22.14		

**Cuadro A.11.** Corrida 2 del colector solar

<b>Hora</b>	<b>Temperatura, T/(°C)</b>		
	<b>Tanque biodiésel</b>	<b>Retorno biodiésel</b>	<b>Tanque agua</b>
12:07	23.6	23.4	23.3
12:37	27.4	27.1	27.4
01:07	29.6	29.2	28.8
01:37	27.8	27.3	27
02:07	26.8	26.5	26.1
<b>T<sub>amb</sub> inicial</b>	20.35		

**Cuadro A.12.** Corrida 3 del colector solar

<b>Hora</b>	<b>Temperatura, T/(°C)</b>		
	<b>Tanque biodiésel</b>	<b>Retorno biodiésel</b>	<b>Tanque agua</b>
09:50	27.9	26.4	23.5
10:20	30.1	30.4	30.1
10:50	31.6	31.8	31.3
11:20	32.6	32.5	32.4
11:50	34.5	34.7	33.9
12:20	36.0	36.1	36.0
12:50	36.8	36.6	36.4
01:20	40.3	40.3	36.9
<b>T<sub>amb</sub> inicial</b>	24.12		

**Cuadro A.13.** Corrida 4 del colector solar

<b>Hora</b>	<b>Temperatura, T/(°C)</b>		
	<b>Tanque biodiésel</b>	<b>Retorno biodiésel</b>	<b>Tanque agua</b>
10:20	22.6	22.6	21.9
10:50	27.8	27.8	27.2
11:20	32.5	32.7	31.8
11:50	35.3	35.4	34.4
12:20	37.8	38.0	37.1
12:50	39.5	39.6	39.0
01:20	41.6	41.6	41.0
02:30	40.3	40.3	40.2
<b>T<sub>amb</sub> inicial</b>	21.16		

**Cuadro A.14.** Corrida 5 del colector solar

Hora	Temperatura, T/(°C)		
	Tanque biodiésel	Retorno biodiésel	Tanque agua
09:55	25.0	25.6	22.1
10:25	34.3	34.2	31.7
10:55	38.1	38.1	35.3
11:25	40.0	40.2	39.7
11:55	40.5	40.5	40.3
<b>T<sub>amb</sub> inicial</b>		25.4	

**Cuadro A.15.** Corrida 6 del colector solar

Hora	Temperatura, T/(°C)		
	Tanque biodiésel	Retorno biodiésel	Tanque agua
09:50	25.6	25.4	23.0
10:20	29.5	29.7	28.9
10:50	31.9	32.0	31.8
11:20	33.0	33.2	32.8
11:50	34.1	34.2	33.8
12:05	34.9	35.1	34.5
12:20	34.1	34.1	33.7
01:50	36.5	36.6	36.6
02:20	37.4	37.7	37.0
<b>T<sub>amb</sub> inicial</b>		23.00	

**Cuadro A.16.** Corrida 7 del colector solar

Hora	Temperatura, T/(°C)		
	Tanque biodiésel	Retorno biodiésel	Tanque agua
10:00	24.3	24.4	22.2
10:30	30.2	30.4	29.2
11:00	32.7	32.8	32.2
11:30	35.1	35.2	34.0
12:00	37.2	37.4	36.8
12:30	38.2	38.3	37.7
02:00	38.4	38.8	38.4
02:30	37.9	38.4	38.4
<b>T<sub>amb</sub> inicial</b>		22.71	

**Cuadro A.17.** Corrida 8 del colector solar

Hora	Temperatura, T/(°C)		
	Tanque biodiésel	Retorno biodiésel	Tanque agua
09:30	26.9	26.7	24.2
10:00	33.1	33.1	31.8
10:30	38.2	38.2	37.2
11:00	42.1	42.3	41.1
11:30	44.5	44.2	43.3
12:00	45.4	45.4	44.8
01:05	43.9	44.0	44.0
<b>T<sub>amb</sub> inicial</b>	23.93		

**Cuadro A.18.** Resultados obtenidos de la curva de enfriamiento del agua dentro del tanque de agua del colector solar

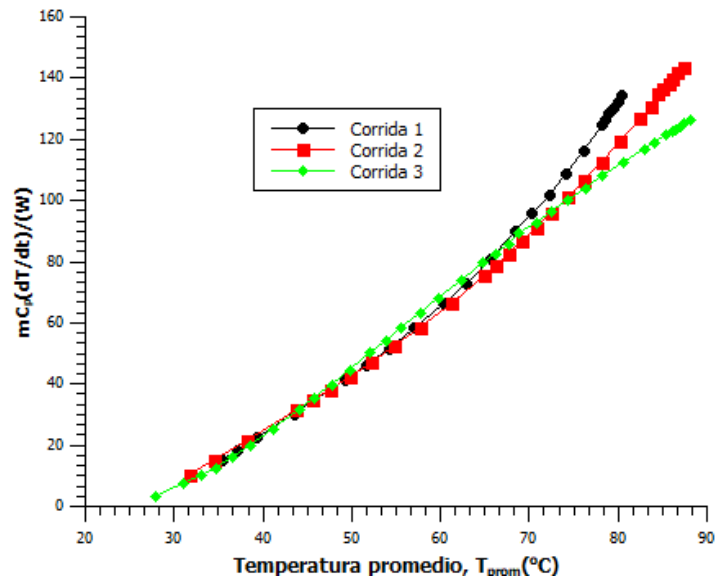
Tiempo, t/(min)	Temperatura, T <sub>1</sub> /(°C)	Temperatura, T <sub>2</sub> /(°C)
0.0	67.2	67.1
1.0	62.8	66.4
2.0	62.1	65.8
3.0	61.4	65.6
4.0	61.0	65.2
5.0	60.8	64.8
7.5	60.3	64.0
10.0	60.1	63.4
12.5	59.6	63.0
15.0	59.1	62.4
20.0	58.2	61.5
25.0	57.3	60.8
30.0	56.5	60.0
35.0	55.8	59.3
40.0	55.0	58.6
50.0	53.8	57.2
60.0	52.6	55.8
75.0	50.9	53.8
90.0	49.2	51.9
105.0	47.2	49.6
120.0	45.2	47.3

## Apéndice B: Resultados intermedios

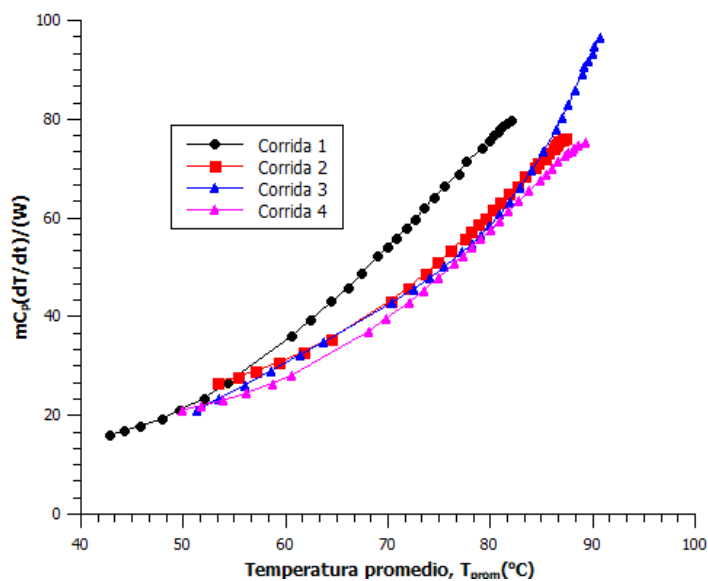
**Cuadro B.1.** Resultados del ajuste matemático realizado para la determinación de la conductividad térmica del tanque

Corrida	Área, A/(m <sup>2</sup> )	Ecuación de ajuste	Conductividad térmica, $\lambda$ /(Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> )
1 <sup>1</sup>	0.145	$y=3.057x-33.926$	21.1
2 <sup>1</sup>	0.145	$y=2.478x-16.132$	17.1
3 <sup>1</sup>	0.145	$y=2.142x-0.542$	14.8
1 <sup>2</sup>	0.221	$y=1.872x-85.492$	8.5
2 <sup>2</sup>	0.211	$y=1.824x-83.966$	8.6
3 <sup>2</sup>	0.162	$y=1.545x-62.587$	9.5
4 <sup>2</sup>	0.159	$y=1.491x-60.173$	9.4

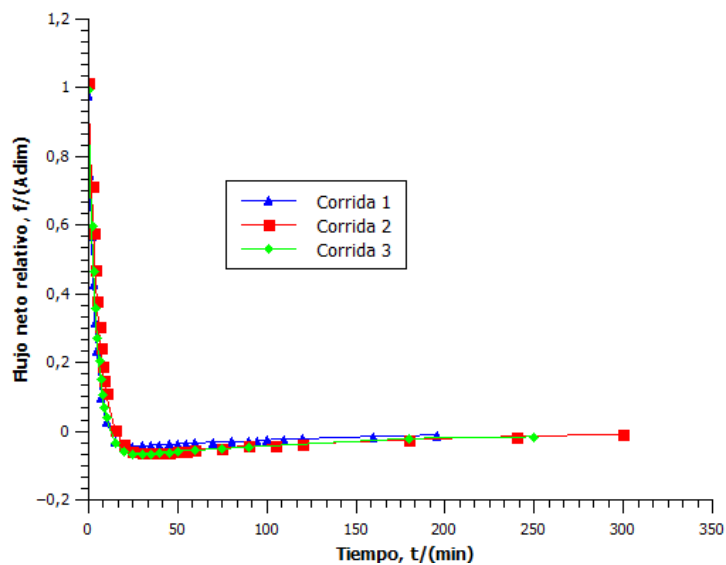
<sup>1</sup> Se refiere al tanque de PVC y <sup>2</sup> al tanque con el aislamiento



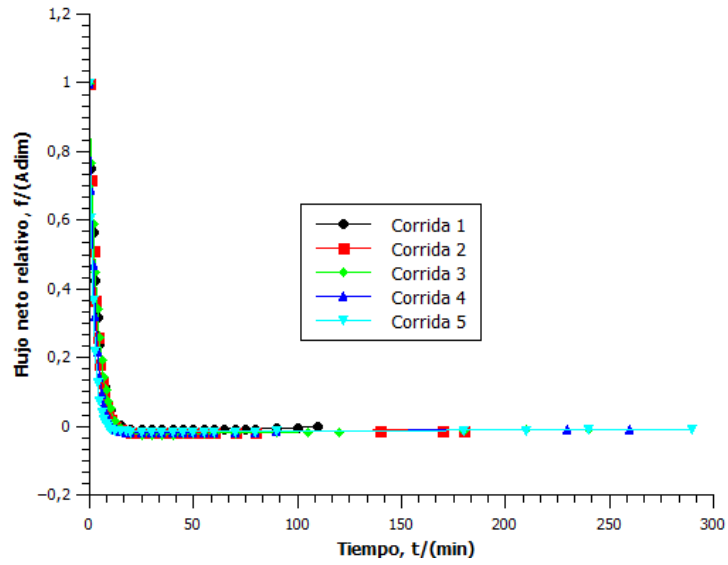
**Figura B.1.** Determinación de la conductividad térmica del tanque de PVC



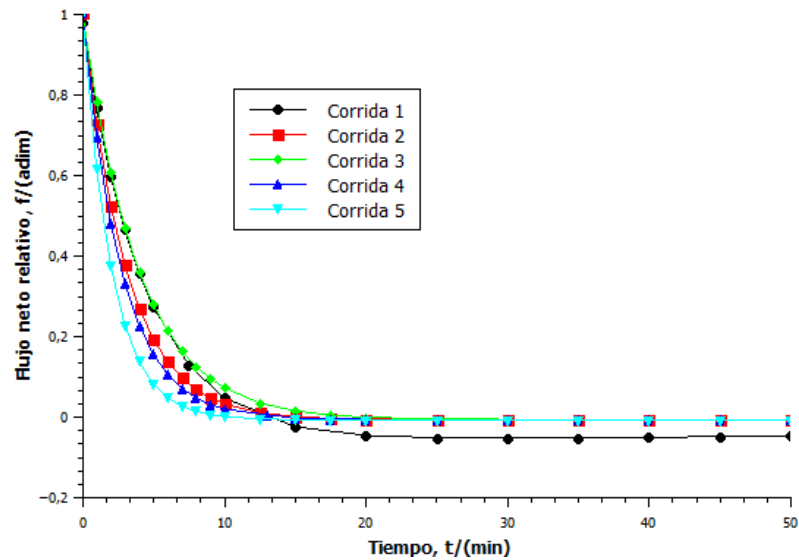
**Figura B.2.** Determinación de la conductividad térmica del tanque de PVC con aislamiento



**Figura B.3.** Flujo neto relativo en función del tiempo para las corridas de agua hacia agua sin aislamiento en el tanque

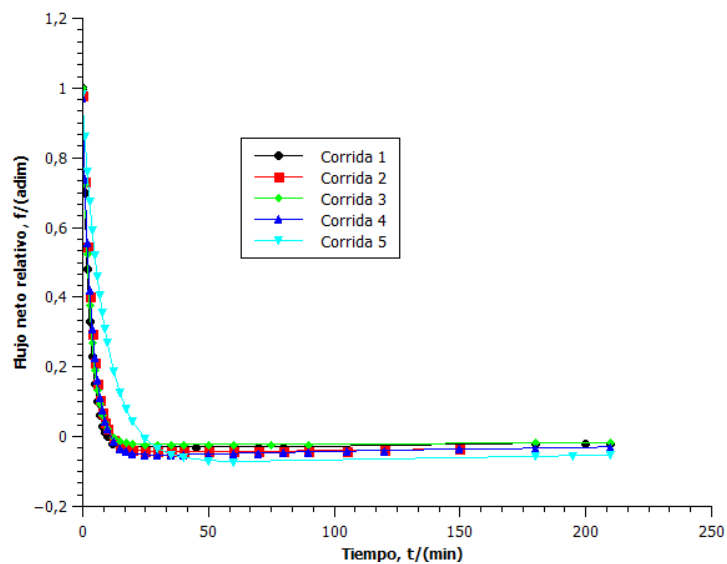


**Figura B.4.** Flujo neto relativo en función del tiempo para las corridas de agua hacia agua con aislamiento en el tanque

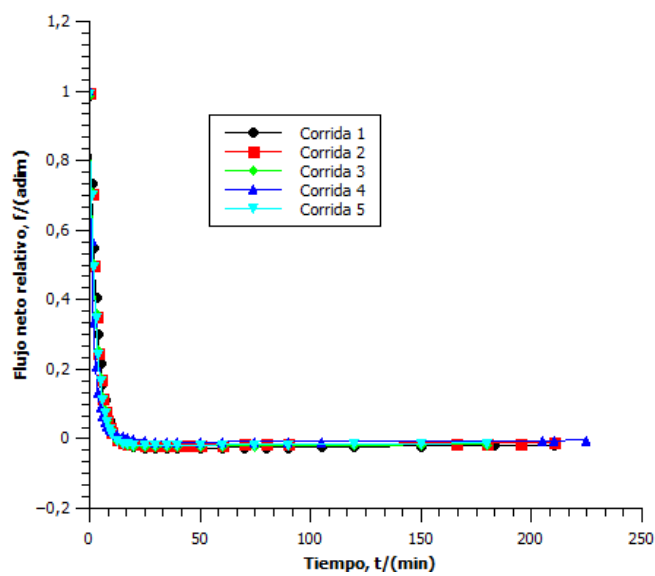


**Figura B.5.** Flujo neto relativo en función del tiempo para las corridas de aceite hacia agua con aislamiento en el tanque

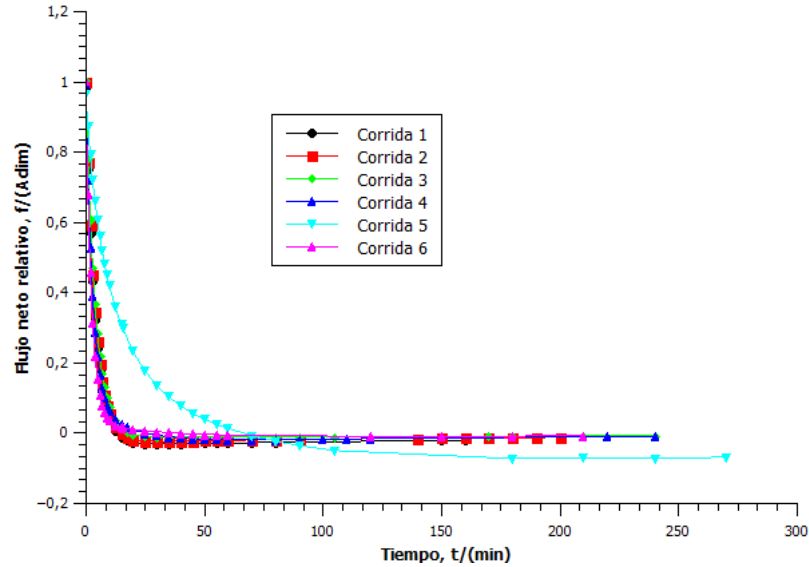




**Figura B.6.** Flujo neto relativo en función del tiempo para las corridas de biodiésel H&M hacia agua con aislamiento en el tanque



**Figura B.7.** Flujo neto relativo en función del tiempo para las corridas de biodiésel EB hacia agua con aislamiento en el tanque



**Figura B.8.** Flujo neto relativo en función del tiempo para las corridas de biodiésel mezcla hacia agua con aislamiento en el tanque

**Cuadro B.2.** Análisis de la eficiencia térmica del prototipo de colector solar en la corrida 1

Hora	Calor útil, $Q_{util}/(W)$	Radiación solar, $H_r/(Wm^{-2})$	Pérdidas, $Q_p/(W)$
11:45	163762	427	109.97
12:15	278236	369	296.80
12:45	190790	431	424.92
01:15	-63597	238	382.22
01:45	127194	319	467.63
<b>Sumatoria</b>	<b>696385</b>	<b>1784</b>	<b>1681.53</b>
<b><math>Q_{util}</math> (W)</b>	<b>96.49</b>		
<b>Eficiencia, <math>\eta</math>(%)</b>	<b>40.60</b>		

**Cuadro B.3.** Análisis de la eficiencia térmica del prototipo de colector solar en la corrida 2

Hora	Calor útil, $Q_{util}/(W)$	Radiación solar, $H_r/(Wm^{-2})$	Pérdidas, $Q_p/(W)$
12:07	234513.2	345	157,48
12:37	325933.6	312	376,34
01:07	111294,4	211	451,08
01:37	-143092,8	92	354,99
02:07	-71546,4	90	306,95
<b>Sumatoria</b>	<b>457102</b>	<b>1050</b>	<b>1646,83</b>
<b><math>Q_{util}</math> (W)</b>	<b>63,26</b>		
<b>Eficiencia, <math>\eta</math>(%)</b>	<b>45,23</b>		

**Cuadro B.4.** Análisis de la eficiencia térmica del prototipo de colector solar en la corrida 3

Hora	Calor útil, $Q_{util}/(W)$	Radiación solar, $H_r/(Wm^{-2})$	Pérdidas, $Q_p/(W)$
09:50	-49287,5	968	-33,10
10:20	524673,6	274	319,22
10:50	95395,2	170	383,28
11:20	87445,6	323	442,00
11:50	119244,0	405	522,08
12:20	166941,6	312	634,18
12:50	31798,4	665	655,53
01:20	39748,0	171	682,22
<b>Sumatoria</b>	1015958,88	3288	3605,42
<b><math>Q_{util}</math> (W)</b>	80,35		
<b>Eficiencia, <math>\eta</math>(%)</b>	18,35		

**Cuadro B.5.** Análisis de la eficiencia térmica del prototipo de colector solar en la corrida 4

Hora	Calor útil, $Q_{util}/(W)$	Radiación solar, $H_r/(Wm^{-2})$	Pérdidas, $Q_p/(W)$
10:20	58827,0	356	39,50
10:50	421328,8	413	322,43
11:20	365681,6	398	567,98
11:50	206689,6	400	706,78
12:20	214639,2	371	850,91
12:50	151042,4	338	952,33
01:20	158992,0	320	1059,10
02:30	-63596,8	184	1016,39
<b>Sumatoria</b>	1513603,84	2780	5515,43
<b><math>Q_{util}</math> (W)</b>	100,54		
<b>Eficiencia, <math>\eta</math>(%)</b>	27,15		

**Cuadro B.6.** Análisis de la eficiencia térmica del prototipo de colector solar en la corrida 5

Hora	Calor útil, $Q_{util}/(W)$	Radiación solar, $H_r/(Wm^{-2})$	Pérdidas, $Q_p/(W)$
09:55	-265516,6	587	-178,30
10:25	763161,6	902	334,17
10:55	286185,6	759	526,35
11:25	349782,4	808	761,23
11:55	47697,6	392	793,26
<b>Sumatoria</b>	1181310,56	3448	2236,71
<b><math>Q_{util}</math> (W)</b>	163,76		
<b>Eficiencia, <math>\eta</math>(%)</b>	35,66		

**Cuadro B.7.** Análisis de la eficiencia térmica del prototipo de colector solar en la corrida 6

Hora	Calor útil, $Q_{\text{útil}}/(\text{W})$	Radiación solar, $H_r/(\text{Wm}^{-2})$	Pérdidas, $Q_p/(\text{W})$
09:50	0,0	430	0,00
10:20	469026,4	419	314,95
10:50	230538,4	162	469,76
11:20	79496,0	61	523,14
11:50	79496,0	302	576,53
12:05	55647,2	133	613,89
12:20	-63596,8	217	571,19
01:50	230538,4	492	726,00
02:20	31798,4	217	747,35
<b>Sumatoria</b>	1112944	2433	4542,81
<b><math>Q_{\text{útil}}</math> (W)</b>	68,42		
<b>Eficiencia, <math>\eta</math>(%)</b>	21,11		

**Cuadro B.8.** Análisis de la eficiencia térmica del prototipo de colector solar en la corrida 7

Hora	Calor útil, $Q_{\text{útil}}/(\text{W})$	Radiación solar, $H_r/(\text{Wm}^{-2})$	Pérdidas, $Q_p/(\text{W})$
10:00	-40543,0	304	-27,22
10:30	556472,0	392	346,45
11:00	238488,0	303	506,60
11:30	143092,8	351	602,68
12:00	222588,8	286	752,15
12:30	71546,4	275	800,20
02:00	55647,2	195	837,56
02:30	0,0	120	837,56
<b>Sumatoria</b>	1247292,24	2226	4655,98
<b><math>Q_{\text{útil}}</math> (W)</b>	76,71		
<b>Eficiencia, <math>\eta</math>(%)</b>	25,87		

**Cuadro B.9.** Análisis de la eficiencia térmica del prototipo de colector solar en la corrida 8

<b>Hora</b>	<b>Calor útil, <math>Q_{util}/(W)</math></b>	<b>Radiación solar, <math>H_r/(Wm^{-2})</math></b>	<b>Pérdidas, <math>Q_p/(W)</math></b>
09:30	21463,9	633	14,41
10:00	604169,6	557	420,12
10:30	429278,4	876	708,38
11:00	310034,4	905	916,57
11:30	174891,2	914	1034,01
12:00	119244,0	920	1114,08
01:05	-63596,8	215	1071,38
<b>Sumatoria</b>	1595484,72	5020	5278,95
<b><math>Q_{util}</math> (W)</b>	123,27		
<b>Eficiencia, <math>\eta/(\%)</math></b>	18,44		

## Apéndice C: Muestra de cálculos

### C.1. Cálculo del área del tanque

Se utiliza la siguiente ecuación:

$$A = 2 * \pi * r * l \quad (C.1)$$

Dónde r corresponde al radio del tanque, que para el tanque de PVC se tiene un valor de 0.055 m y l corresponde a la altura de la columna de líquido que para la corrida 1 en el tanque de agua sin aislamiento se tiene un valor de 0.42 m. Con esto se obtiene un área para el tanque de PVC de

$$A = 2 * \pi * 0.055 * 0.42 = 0.145 \text{ m}^2$$

Resultado que se encuentra en el Cuadro B.1, fila 2, columna 2.

### C.2. Determinación de la conductividad térmica $\lambda$ del tanque

Se utiliza el siguiente modelo lineal para ajustar los datos experimentales utilizando el software qtiplot®:

$$\dot{Q} = mC_p \left( -\frac{dT_{prom}}{dt} \right) = \lambda A (T_{prom} - T_{amb}) \quad (C.2-1)$$

$$mC_p \left( -\frac{dT_{prom}}{dt} \right) = \lambda A (T_{prom} - T_{amb}) \quad (C.2-2)$$

Donde la temperatura promedio se obtiene de la siguiente forma

$$T_{prom} = \sum_{i=0}^n \frac{T_i}{n} \quad (C.2-3)$$

Tomando los valores de temperatura de la Figura A.1, para tiempo  $t=0$  min se obtiene.

$$T_{prom} = \frac{80.1 + 80.5 + 81.0}{3} = 80.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Utilizando el software qtiplot se ajustan los datos promedios de temperatura en el eje y de tiempo en el eje x al siguiente modelo:

$$T_{prom} = A_0 e^{\left(\frac{-t}{x_0}\right)} + A_1 e^{\left(\frac{-t}{x_1}\right)} + b \quad (C.2-4)$$

Dónde  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $x_0$  y  $x_1$  corresponde a coeficientes de la ecuación de ajuste y  $b$  a la pendiente de la ecuación de ajuste.

Seguidamente, el software automáticamente ajusta los datos al modelo dado y calcula la derivada con respecto al tiempo para cada punto (tiempo).

Para determinar el flujo de calor se utiliza la siguiente ecuación:

$$\dot{Q} = mC_p \left( -\frac{dT_{prom}}{dt} \right) \quad (C.2-5)$$

Con una masa de agua de 4 kg (asumiendo una densidad de agua de  $1 \text{ kgL}^{-1}$ ) y un valor de  $C_p=4.186 \text{ kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$  se obtienen todos los valores para cada diferencial de temperatura.

Seguidamente, el software ajusta los datos de la ecuación C.2-2 a una línea recta, donde la pendiente obtenida corresponde a los valores de la conductividad térmica del material, multiplicado por el área del tanque.

Ajustando los datos de la ecuación modelo C.2-2 con el software qtiplot® se obtiene para la corrida 1 del tanque de PVC:

$$mC_p \left( -\frac{dT_{prom}}{dt} \right) = 3.057(T_{prom} - T_{amb}) - 33.926$$

Donde se obtiene un valor de pendiente que corresponde a  $\lambda A$ , con un área  $A=0.145 \text{ m}^2$  para el tanque de PVC Se obtiene un valor de  $h$  de:

$$\lambda = \frac{3.057}{0.145} = 21.1 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Resultado que se encuentra en el Cuadro B.1, fila 2, columna 4.

### C.3. Determinación de la rapidez neta de transferencia de calor

Se utiliza la siguiente ecuación:

$$f = \frac{\left( \frac{dQ}{dt} \right)_{Neto}}{-\left( \frac{dQ}{dt} \right)_{V,0}} \quad (C.3-1)$$

Dónde el flujo de calor dentro del tubo de vidrio se calcula de la siguiente forma:

$$\left(-\frac{dQ}{dt}\right)_V = mC_p \left(-\frac{dT}{dt}\right)_V \quad (\text{C.3-2})$$

Los datos del diferencial de temperatura con respecto al volumen se ajustan en el software qtiplot® siguiendo la forma de la ecuación C.2-4, asimismo, el software calcula la derivada para cada tiempo obtenido.

Para la transferencia entre agua caliente a agua fría, utilizando 1.6 kg de agua caliente y los datos del cambio de temperatura con respecto al tiempo para tiempo  $t=0$  de la corrida 1 del sistema agua caliente-agua fría con aislamiento en el tanque se tiene:

$$\left(-\frac{dQ}{dt}\right)_V = 1.6 * 4.186 * 9.085 = 1014.101 \text{ W}$$

Ahora, para la determinación del flujo de calor en el tanque externo se utiliza la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_{PVC} = \lambda A (T_{prom} - T_{amb}) \quad (\text{C.3-3})$$

Dónde la temperatura promedio se ajusta utilizando el software qtiplot® con la ecuación C.2-4 y realizando el cálculo para la corrida 1 del sistema agua caliente-agua fría con el tanque aislado se obtiene:

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_{PVC} = 16.7 * 0.225(32.3 - 26) = 23.669 \text{ W}$$

Ahora, se calcula en flujo de calor neto en el sistema de la siguiente forma:

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_{Neto} = -\left(\frac{dQ}{dt}\right)_V - \left(\frac{dQ}{dt}\right)_{PVC} \quad (\text{C.3-4})$$

Ahora se procede a calcular el valor del flujo neto relativo y utilizando los datos para tiempo  $t=0$  de la corrida 1 para agua caliente a agua fría se obtiene:

$$f = \frac{990,432}{1014,101} = 0.997 \text{ W}$$

Resultado que se encuentra en la Figura B.3.



#### C.4. Determinación de la capacidad calorífica de la mezcla de biodiésel

Al ser una mezcla 50:50 en volumen de ambos biodiésel utilizados, se utiliza un valor promedio de ellos (Kern, 1997).

$$C_{p_{mezcla}} = \frac{C_{p_{H\&M}} + C_{p_{EB}}}{2} \quad (C.4)$$

$$C_{p_{mezcla}} = \frac{1.7+2.8}{2} = 2.25 \text{ kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$$

#### C.5. Determinación del coeficiente J de la mezcla de biodiésel

Al igual que la conductividad térmica, se utiliza un promedio entre ambos biodiésel

$$J_{p_{mezcla}} = \frac{J_{p_{H\&M}} + J_{p_{EB}}}{2} \quad (C.5)$$

$$J_{p_{mezcla}} = \frac{2.70+1.50}{2} = 2.1 \text{ kWm}^{-3}\text{K}^{-1}$$

#### C.6. Determinación del número de vueltas del serpentín

Se asumen las siguientes propiedades físicas del agua a calentar, con una temperatura mínima de 25 °C y máxima de 40 °C (Kern, 1997)

Densidad ( $\rho$ )	25 °C	997.0429 kg/m <sup>3</sup>
	40 °C	992.2136 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad ( $\mu$ )	25 °C	0.893x10 <sup>-3</sup> kgm <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>
	40 °C	0.654 x10 <sup>-3</sup> kgm <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>
$C_p$	25 °C	4.1796 kJ/kgK
	40 °C	4.1786 kJ/kgK
Conductividad térmica ( $\lambda$ )	25 °C	0.610 W/mK
	40 °C	0.632 W/mK

Propiedades físicas del biodiésel: (Se asume una temperatura promedio de calentamiento de 40 °C)

Densidad	883.7192 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad	6.1595x10 <sup>-3</sup> kgm <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>
$C_p$	2.1000kJ/kgK
Conductividad térmica	0.2336 W/mK

Para el tanque de almacenamiento de agua se tiene:

Altura  $h = 38.1$  cm

Diámetro  $d = 28.575$  cm

Para calcular el volumen del tanque se utiliza la siguiente fórmula:

$$V_T = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 h \quad (\text{C.6-1})$$

$$V_T = \pi \left(\frac{0.28575}{2}\right)^2 (0.381) * 1000 = 24.43 \text{ L}$$

Para calcular el área exterior del tanque se utiliza la siguiente fórmula:

$$A_T = \pi \frac{d^2}{2} + \pi dh \quad (\text{C.6-2})$$

$$A_T = \pi \frac{d^2}{2} + \pi dh = 0.47 \text{ m}^2$$

Para calcular el número de Reynolds se utiliza la siguiente fórmula:

$$Re = \frac{4\rho Q}{\pi d\mu} \quad (\text{C.6-3})$$

$$Re = \frac{4(992.2136)(6.94 \times 10^{-7})}{\pi(0.26)(0.893 \times 10^{-3})} = 3.44$$

Esto asumiendo un “flujo” de agua  $Q$  de 15 L/6 h ( $6.94 \times 10^{-7}$  m<sup>3</sup>/s)

De la figura 28 del texto de Kern se tiene:

$$j_H = 35$$

Además,  $\left(\frac{c\mu}{k}\right)^{1/3} = \left(\frac{4.1786 \times 0.654}{0.632}\right)^{1/3} = 1.629$ ; y  $\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} = 1.0$  para el caso del agua

$$h_{io} = j_H \frac{k}{DI} \left(\frac{c\mu}{k}\right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} = 121.71 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

Para el serpentín se tiene:

Se utiliza tubo flexible de cobre de 1/2" y se asume un flujo de 500 L/h ( $1.39 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ )

DI = 13.39 mm, DE = 15.88 mm, Área de flujo  $1.407 \times 10^{-4} \text{ m}^2$  (McCabe, Smith, & Harriott, 2005)

$$\text{Número de Reynolds: } Re = \frac{4(883.7192)(1.39 \times 10^{-4})}{\pi(13.39 \times 10^{-3})(6.1595 \times 10^{-3})} = 1896$$

De la Figura 20.2 del texto de Kern se tiene:

$$j_H = 45$$

Además,  $\left(\frac{c\mu}{k}\right)^{1/3} = 0.38$ ; y  $\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} = 1.37$

$$h_c = j_H \left(\frac{c\mu}{k}\right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} = 408.7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Se obtiene un coeficiente limpio de transferencia de calor de la siguiente forma:

$$U_c = \frac{h_c h_{io}}{h_c + h_{io}} \quad (\text{C.6-4})$$

$$U_c = \frac{(408.7)(121.71)}{408.7 + 121.71} = 93.78 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Para líquidos orgánicos industriales se tiene un coeficiente de ensuciamiento  $R_d = 0.001$

$$\text{Por lo tanto: } \frac{1}{R_d} = h_d = \frac{1}{0.001} = 1000$$

Ahora se calcula el coeficiente global de transferencia de calor  $U_D$ :

$$U_D = \frac{U_c h_d}{U_c + h_d} \quad (\text{C.6-5})$$

$$U_D = \frac{(93.78)(1000)}{93.78 + 1000} = 85.74 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Ahora se calcula el área de transferencia de calor:

$$Q = U_D A \Delta T \rightarrow A = \frac{Q}{U_D \Delta T} = \frac{\dot{m}_B C_{p_B} \Delta T_B}{U_D \Delta T_W} \quad (\text{C.6-6})$$

$$A = \frac{\left[ \frac{4.86 \times 10^{-5}}{883.7192} \right] (2.1)(60 - 45)}{(85.74)(40 - 25)(1000)} = 1.35 \times 10^{-12} \text{ m}^2$$

De la estación del CIGEFI, para el día 18 de marzo de 2018 se tuvieron las siguientes condiciones meteorológicas:

$$T_{\text{máx}} = 26.3 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Radiación solar máxima } \omega = 1106 \text{ W/m}^2$$

$$\omega = \sigma T_1^4 \rightarrow T_1 = 373.72 \text{ K}$$

Se calcula el calor de radiación de la siguiente forma:

$$Q = \varepsilon \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{C.6-7})$$

$$Q = (0.015)(5.67 \times 10^{-8})(0.40 * 0.40)(373.72^4 - 298.15^4) = 1.579 \text{ W}$$

$$A = \frac{1.579}{(9.816)(40 - 25)} = 0.0107 \text{ m}^2$$

$$\text{Número de vueltas teóricas del serpentín: } \frac{0.0107}{1.407 \times 10^{-4}} = 76 \text{ vueltas}$$