 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01- 27

# **METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO DE TERMOSIFONES BIFÁSICOS PARA APLICACIÓN EN SISTEMA DE INTERCAMBIO DE CALOR**

Mateo Zamora Sánchez


Nicolás López Galvis

INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

Bernardo Herrera Múnera

**INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO**

**19 de octubre de 2018**


	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## RESUMEN

---

Los tubos de calor y termosifones son considerados como tipos de intercambiadores que transmiten de manera rápida y eficiente el calor con pequeñas diferencias de temperatura. Según la literatura encontrada, este tipo de dispositivos pueden ser utilizados o implementados en actividades de sistemas de intercambio de calor. De acuerdo a lo anterior, este proyecto de grado tiene como objetivo construir termosifones bifásicos para luego ser acoplados a un equipo térmico del Laboratorio de Energía Térmica del Instituto Tecnológico Metropolitano-ITM sede Fraternidad. Esta idea surge porque en el laboratorio existe la necesidad de realizar pruebas experimentales a un intercambiador de calor por medio de termosifones con nanofluido como elemento de trabajo y debido al mal estado en que se encuentran los elementos que conforman el sistema actualmente, se da como solución al problema elaborar unos dispositivos nuevos. Dentro del trabajo escrito, se encuentra la metodología utilizada para la construcción de los termosifones, la cual es asequible a nuestros conocimientos y que se logró teniendo como punto de referencia proyectos que se relacionen con la manufactura de los mismos. En la metodología esta descrito como se realizaron y que elementos se utilizaron para el proceso de corte, sellado, vacío y carga de los tubos, como también la preparación del nanofluido. Los materiales utilizados en el desarrollo del trabajo y el nanofluido fueron suministrados por la Universidad, además se contó la ayuda del personal del laboratorio de Energía Térmica ya que cuenta con la experiencia de elaborar e implementar este tipo de termosifones y fluidos.


*Palabras clave: Termosifón, tubos de calor, recuperación de calor, intercambiador de calor, fluido de trabajo, manufactura.*

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## RECONOCIMIENTOS

---

Queremos agradecer principalmente a nuestras familias por el incondicional apoyo que nos brindaron durante esta maravillosa experiencia universitaria. También queremos darle las gracias a los docentes Bernardo Herrera, Karen Cacua y Pedro Alvarado por el apoyo, la colaboración brindada y por aportarnos toda su experiencia en el tema, por ultimo deseamos agradecerle a la Universidad y especialmente al laboratorio de Energía Térmica del ITM por darnos la oportunidad de participar en el proyecto, financiar los materiales utilizados y por facilitarnos sus instalaciones para la aplicación del mismo.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

# ACRÓNIMOS

---

*Al* Aluminio

*cm* Centímetros

*CNC* Control Numérico Por Computadora

*CO<sub>2</sub>* Dióxido de Carbono

*HP* Heat Pipe

*HX* Heat Exchanger

*In* Inch (Pulgadas)

*HPHX* Heat Pipe Heat Exchanger

*HVAC* Heating, Ventilation and Air Conditioning

*ITM* Instituto Tecnológico Metropolitano

*kPa* Kilopascales

*mbar* Milibar

*ml* Mililitros

*mm* Milímetros

*nm* Nanométrico

*PET* Polyethylene Terephthalate

*TS* Termosifón


*TSB* Termosifón Bifásico

*TPCT* Two-phase closed Thermosyphons

*TSHX* Thermosyphons Heat Exchanger


*V* Voltios

*°C* Grados Celsius


 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN .....	10
1.1.	OBJETIVO GENERAL.....	12
1.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
2.	MARCO TEÓRICO .....	13
2.1.	GENERALIDADES FUNDAMENTALES DE LOS TERMOSIFONES BIFÁSICOS .....	13
2.2.	CARCASA DEL TERMOSIFON.....	17
2.3.	FLUIDO DE TRABAJO.....	18
2.3.1.	NANOFLUIDO .....	20
2.4.	LÍMITES DE OPERACIÓN .....	20
2.4.1.	LÍMITE SÓNICO .....	21
2.4.2.	LÍMITE VISCOSO .....	21
2.4.3.	LÍMITE DE ARRASTRE .....	21
2.4.4.	LÍMITE DE EBULLICIÓN.....	22
2.5.	PROCESO DE MANUFACTURA .....	22
2.5.1.	ELECCIÓN DEL MATERIAL DE LA CARCASA .....	23
2.5.2.	SELECCIÓN DEL FLUIDO DE TRABAJO .....	23
2.5.3.	PROCESO DE VACÍO Y DESGASIFICACIÓN .....	24
2.5.4.	PROCESO DE CARGA DEL FLUIDO .....	24
2.5.5.	SELLADO DE LOS TUBOS .....	25
2.5.6.	LIMPIEZA DE LOS TUBOS .....	26
2.5.7.	ENSAMBLE .....	27
2.6.	INTERCAMBIADORES DE CALOR CON TERMOSIFONES.....	27
2.6.1.	INTERCAMBIADOR DE DOBLE TUBO .....	29
2.6.2.	INTERCAMBIADOR DE CORAZA Y TUBOS .....	30
2.6.3.	INTERCAMBIADOR DE CALOR COMPACTO .....	31
2.6.4.	INTERCAMBIADOR DE CALOR REFRIGERADO POR AIRE .....	31

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.7.	INTERCAMBIADORES DE CALOR CON TERMOSIFONES BIFÁSICOS .....	32
2.8.	ESTADO DEL ARTE .....	34
3.	METODOLOGÍA .....	39
3.1.	CARACTERIZACIÓN DE LOS TERMOSIFONES ANTIGUOS.....	39
3.2.	LINEAMIENTOS PARA CONSTRUCCIÓN DE TERMOSIFONES NUEVOS .....	40
3.3.	CORTE DE TUBERIA, UMBILICAL Y TAPAS .....	40
3.4.	LIMPIEZA.....	45
3.5.	UNIÓN DE RACORES Y SOLDADURA DE LOS TUBOS .....	46
3.6.	PROCESO DE VACÍO.....	50
3.7.	RELACIÓN DE LLENADO .....	53
3.8.	PREPARACIÓN DEL NANOFLUIDO .....	54
3.9.	LLENADO DE LOS TUBOS .....	57
3.10.	PRUEBAS EXPERIMENTALES .....	59
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	61
5.	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO.....	67
	REFERENCIAS.....	70

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Principio de funcionamiento TS .....	14
Fig. 2. Tubo de calor con malla .....	15
Fig. 3. Funcionamiento de forma inversa de HP .....	15
Fig. 4. Tubo de calor, solución para una laptop .....	16
Fig. 5. Tubo de calor usado en un procesador .....	17
Fig. 6. Intercambiador de calor de flujo paralelo .....	28
Fig. 7. Intercambiador de calor de contraflujo .....	29
Fig. 8. Intercambiador de calor de flujo cruzado.....	29
Fig. 9. Intercambiador de calor de doble tubo.....	30
Fig. 10. Intercambiador de calor de coraza y tubos .....	30
Fig. 11. Intercambiador de calor refrigerado por aire.....	31
Fig. 12. Intercambiador de calor con termosifones .....	33
Fig. 13. Intercambiador de calor con zonas separadas .....	33
Fig. 14. Esquema del sistema .....	39
Fig. 15. Corte de tubería .....	41
Fig. 16. Corte de umbilical .....	41
Fig. 17. Tubería cortada .....	42
Fig. 18. Umbilical cortado .....	42
Fig. 19. Cilindrado de la barra de cobre .....	43
Fig. 20. Perforación de la barra para tapa de umbilical. ....	43
Fig. 21. Tronzado para obtener tapas .....	44
Fig. 22. Tapas para umbilical .....	44
Fig. 23. Tapas para lado inferior del tubo.....	45
Fig. 24. Limpieza de tubería.....	45
Fig. 25. Aplicación de Acetona.....	46
Fig. 26. Enjuague del ácido con agua desionizada .....	46
Fig. 27. Unión de racores con llave boca fija .....	47
Fig. 28. Racores acoplado y con silicona de alta temperatura .....	47
Fig. 29. Soldadura con Gas Mapp y Harris de plata.....	48
Fig. 30. Piscina de soldadura .....	49
Fig. 31. Tubería soldada con tapas y umbilical .....	49
Fig. 32. Limpieza con ácido para remover oxido proveniente de la soldadura .....	50



 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Fig. 33. Oxido y hollín removido .....	50
Fig. 34. Bomba de vacío marca VACUUBRAND .....	51
Fig. 35. Gráfica del vacío generado .....	51
Fig. 36. Termosifón acoplado para proceso de vacío .....	52
Fig. 37. Vacío obtenido en los termosifones. ....	53
Fig. 38. Pinza quirúrgica para evitar que se pierda el vacío .....	53
Fig. 39. Prueba de termosifón para relación de llenado .....	54
Fig. 40. Agitación magnética.....	55
Fig. 41. Nanotubo de carbono comercial. ....	56
Fig. 42. Nanotubo mezclado y pesado con fluido base .....	56
Fig. 43. Dispersión con ultrasonido .....	57
Fig. 44. Nanofluido Obtenido .....	57
Fig. 45. Proceso de llenado con nanofluido .....	58
Fig. 46. Estrangulación del umbilical después de llenado el termosifón .....	59
Fig. 47. Termopares conectados para prueba de calentamiento .....	60
Fig. 48. Calentamiento del termosifón .....	60
Fig. 49. Gráfica relación de llenado .....	62
Fig. 50. Umbilical sellado, termosifón hermético.....	63
Fig. 51. Grafica de la temperatura del evaporador de la prueba experimental. ....	64
Fig. 52. Grafica de la temperatura del condensador de la prueba experimental. ....	65
Fig. 53. Intercambiador de calor con termosifones acoplados .....	66




	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Datos de compatibilidad para fluidos de trabajo y materiales de contenedores. .	18
Tabla 2. Propiedades físicas del cobre. ....	18
Tabla 3. Fluidos de trabajo para tubos de calor .....	19
Tabla 4. Medidas obtenidas de los termosifones antiguos.....	40

## LISTA DE ECUACIONES

Ecuación (1). Número de Merit .....	23
Ecuación (2). Volumen evaporador .....	54
Ecuación (3). Volumen total de llenado .....	54
Ecuación (4). Resistencia térmica .....	54
Ecuación (5). Peso de nanopartícula .....	55

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22


# 1. INTRODUCCIÓN

---

En la actualidad, las industrias buscan tener sistemas energéticos eficientes debido al aumento considerable del uso de la energía en procesos cuyo factor principal sea el mismo. De ahí surge la necesidad de crear proyectos que satisfagan las necesidades industriales en factores como: aprovechamiento de las pérdidas energéticas, diseños eficientes y de bajo costo, además que contribuyan al impacto ambiental que se genera en los procesos que desperdician energía. Lo anterior fundamenta la importancia para el desarrollo de sistemas que mejoren los procesos energéticos, siendo la recuperación de energía en forma de calor un método viable para obtener técnicas que aprovechen las pérdidas energéticas, ya que en muchos procesos industriales se necesita de energía térmica para obtener productos por medio de equipos tales como: hornos, calderas, generadores de vapor, motores de combustión interna, que por lo general desperdician la energía que producen los gases de escape en la salida del proceso.

Cuando hablamos de energía térmica, se trata de la transformación de trabajo mecánico de una máquina o equipo en forma de calor que se ve reflejado en el ambiente. Existen dispositivos recuperadores de calor altamente efectivos en procesos que se relacionen con la transferencia de calor, dichos elementos son nombrados como heat pipe o tubos de calor, donde su principio de funcionamiento se basa en la transferencia de calor latente de vaporización. A partir de esta premisa se piensa que la implementación de estos elementos en sistemas que se involucren en el área térmica pueden generar grandes soluciones en el campo descrito anteriormente.

El presente trabajo tiene como objetivo principal la construcción y montaje de termosifones bifásicos para ser adecuados a un intercambiador de calor donde recibe los


 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

gases de combustión de un motor. A este sistema se le realizarán estudios de rendimiento térmico en el laboratorio de Energía Térmica del ITM, ya que estos equipos pueden ser utilizados como sistemas de recuperación de calor en procesos que involucren la producción de vapor sabiendo que estos pueden ser reutilizados en el mismo u otro proceso, del mismo modo la construcción de estos aportan al desarrollo de aplicaciones de termosifones en procesos industriales. El cumplimiento de este objetivo se logrará teniendo en los siguientes objetivos específicos:

- Determinar las condiciones que debe tener la elaboración y la instalación de los termosifones para ser incorporados en un intercambiador de calor.
- Construir termosifones que se adapten al sistema de intercambio de calor existente en el Laboratorio de Ciencias Térmicas, procurando condiciones óptimas de vacío.
- Adaptar un sistema de llenado y sellado de los termosifones construidos para garantizar el vacío del tubo y prevenir la infiltración de gases no condensables.

Este trabajo está compuesto por un primer capítulo llamado marco teórico donde en las primeras secciones se encuentra detalladamente las generalidades de los tubos de calor teniendo un enfoque más puntual en los termosifones bifásicos (TSB). Algunas de estas generalidades son: la definición de los tubos de calor, principio de funcionamiento, material del contenedor, fluido de trabajo, límites de operación, proceso de manufactura, presentación teórica de intercambiadores de calor con termosifones bifásicos y, para finalizar este capítulo, hay una sección donde se puede encontrar el estado del arte de esos dispositivos.

El segundo capítulo es la metodología. En este se encuentra la explicación del paso a paso del desarrollo del diseño, construcción y montaje de los termosifones bifásicos al sistema de intercambio de calor.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Posteriormente, el tercer capítulo está compuesto por los resultados del proyecto, donde luego de realizar las evaluaciones experimentales del funcionamiento de los termosifones se describe cual fue el resultado obtenido y si se logró los objetivos propuestos.


Finalmente, se culmina el trabajo con las conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros relacionados con el tema.

### 1.1. OBJETIVO GENERAL

Elaborar e implementar termosifones con nanofluidos para evaluaciones experimentales en un sistema de intercambio de calor.

### 1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las condiciones que debe tener la elaboración y la instalación de los termosifones para ser incorporados en un intercambiador de calor.
- Construir termosifones que se adapten al sistema de intercambio de calor existente en el Laboratorio de Ciencias Térmicas, procurando condiciones óptimas de vacío.
- Adaptar un sistema de llenado y sellado de los termosifones construidos para garantizar el vacío del tubo y prevenir la infiltración de gases no condensables.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 2. MARCO TEÓRICO

---

### 2.1. GENERALIDADES FUNDAMENTALES DE LOS TERMOSIFONES BIFÁSICOS

Los tubos de calor (HP, por sus siglas en ingles) y los termosifones bifásicos (TSB) son dispositivos relativamente simples utilizados para el transporte de energía térmica en forma de calor en zonas con diferentes temperaturas (Silverstein, 1992). Tanto tubos de calor como los termosifones están denominados como recuperadores de calor altamente efectivos ya que se basan en la transferencia de calor latente de vaporización, es decir, aprovechan los cambios de fase de un fluido para transportar calor de un proceso a otro de una manera eficiente, sin requerir grandes diferencias de temperatura (Copete & Herrera, 2011).

El tubo de calor es similar en algunos aspectos al termosifón bifásico por lo que describir el funcionamiento de uno implica el del otro (D. Reay & Kew, 2006), además el termosifón bifásico es comúnmente llamado tubo de calor asistido por gravedad o tubo de calor sin malla (Faghri, 1995), mientras que los tubos de calor son un tipo especial de termosifón que usan la capilaridad para el movimiento del fluido en su interior (Copete & Herrera, 2011).

EL principio de operación de los termosifones se divide básicamente en dos estados los que se describen como evaporización y condensación ( Fig. 1). Todo el proceso se logra debido a un fluido interno que contiene el tubo, el cual tiene la capacidad de cambiar de fase (gas, líquido). Ahora bien, explicando el proceso de operación, este se da debido a una energía externa en forma de calor que ingresa al sistema por el lado inferior del tubo llamado evaporador haciendo que el fluido de trabajo se evapore, luego el vapor debido a su alta presión se traslada hacia la parte superior del tubo donde la temperatura es menor y así logra condensarse para regresar al inicio del proceso con ayuda de la gravedad a comenzar de nuevo el ciclo (Copete & Herrera, 2011; D. Reay & Kew, 2006).


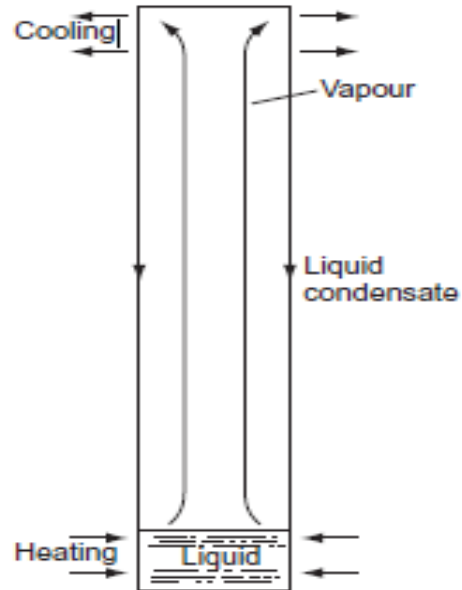
	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Fig. 1. Principio de funcionamiento TS. Fuente: (D. Reay & Kew, 2006)



La principal diferencia entre los tubos de calor y los termosifones radica en el elemento adicional que posee el primero mencionado en el interior de su carcaza. Se hace referencia a la implementación de una malla capilar donde se adhiere a las paredes internas del tubo creando una separación entre el vapor y el líquido. A partir de esto, el fluido que se evapora en la zona caliente del tubo circula dentro del espacio generado por la malla para que transporte el vapor (Fig. 2), al llegar a la zona fría, éste se condensa y retorna por la capilaridad de la malla al inicio del ciclo (Copete & Herrera, 2011). Los tubos de calor por el simple hecho de poseer dicha malla tienen la posibilidad de ser acoplados a un sistema térmico de forma inversa u horizontalmente (Fig. 2) y (Fig. 3) despreciando la gravedad (D. Reay & Kew, 2006), lo que difiere de los TSB, los cuales como se mencionó anteriormente tienen que hacer uso obligatoriamente de la gravedad para su funcionamiento.


	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Fig. 2. Tubo de calor con malla. Fuente: (D. Reay & Kew, 2006)

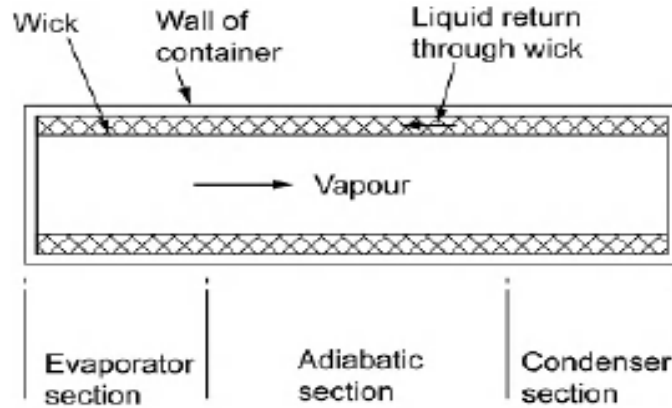
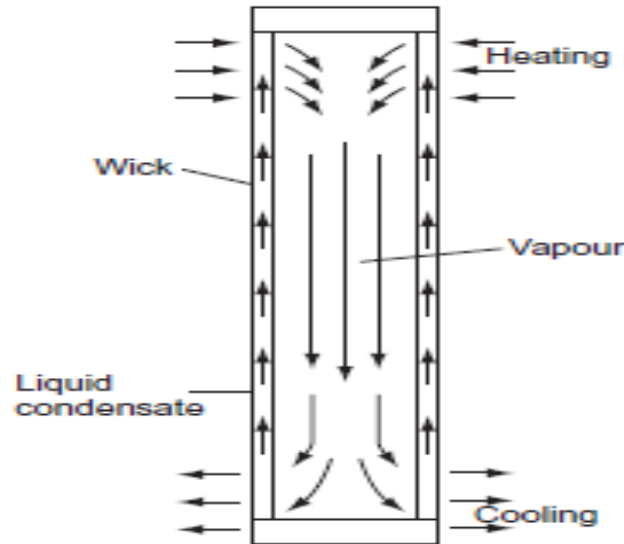



Fig. 3. Funcionamiento de forma inversa de HP. Fuente: (D. Reay & Kew, 2006)



La implementación de alguno de estos dos dispositivos (HP o TS) pueden generar ventajas relevantes debido a que el tiempo de respuesta térmica es menor que el de otros dispositivos de transferencia de calor, esto debido al ciclo bifásico (vapor-liquido) en el que operan los tubos de calor y termosifones (Peterson, 1994), además, son dispositivos pasivos que no requieren de un sistema de bombeo externo para proporcionar la circulación del fluido y la transferencia de calor, por lo que lo lleva a ser sistemas simples y confiables (Weisend, 2012).

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Los termosifones en algunos casos pueden transferir el calor de manera más eficiente que la transferencia térmica en conducción sólida, esto es debido a que los materiales con los que se diseñan estos dispositivos tienen buena conductividad térmica a temperaturas bajas (Weisend, 2012), adicionalmente, tienen la capacidad de transferir el calor de un extremo a otro 500 o 1000 veces más rápido que a través de metal sólido (Orr, 2002).

Los HP y TS por su facilidad de elaboración, diseño simple, bajo costo y porque no necesitan longitudes extensas para realizar su proceso, no han sido aplicados únicamente en intercambiadores de calor, sino que también en diversos campos que no cuenten con el espacio suficiente para implementar dispositivos recuperadores de calor de gran tamaño. Nombrando algunas de estas áreas son: calefacción de automóviles, control de temperatura en máquinas de moldeo, cocción, refrigeración y descongelamiento de alimentos, refrigeración de motores de combustión interna, colectores solares, control de temperatura y enfriamiento y refrigeración de circuitos y componentes electrónicos, siendo este último uno de los campos con bastante aplicación de esta tecnología de recuperación de calor (Fig. 4; Fig. 5.).

*Fig. 4. Tubo de calor, solución para una laptop. Fuente: (Rajesh, 2015).*






	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Fig. 5. Tubo de calor usado en un procesador. Fuente: (Rajesh, 2015).



## 2.2. CARCASA DEL TERMOSIFON

La carcasa o también llamado contenedor es el elemento encargado de aislar el fluido de trabajo con el ambiente exterior del tubo. Es de suma importancia que este tenga una construcción adecuada, ya que no puede tener fugas de vapor en ninguna zona de la estructura. En caso de que exista una, inmediatamente se obtiene pérdidas del fluido y de presión en el sistema por lo que afecta su funcionamiento.

Existe una gran cantidad de materiales disponibles para el diseño del contenedor, algunos de estos son: cobre, acero inoxidable, níquel, aluminio y titanio (Shabgard et al., 2015); todos estos cuentan con características diferentes por lo que todos los materiales no son óptimos para una misma aplicación, además se debe tener en cuenta que hay una serie de parámetros que se deben de cumplir el momento de elegirlos, estos son: alta conductividad térmica, alta resistencia al calor, resistencia a altas presiones, baja porosidad, compatibilidad con el fluido (Tabla 1), buena mojabilidad, ductilidad maleabilidad y resistente a la corrosión (D. Reay & Kew, 2006). Normalmente los tubos de calor y termosifones se fabrican con cobre debido a su alta conductividad térmica inherente (Tabla 2) (Chan, Siqueiros, Ling-Chin, Royapoor, & Roskilly, 2015).


 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Tabla 1. Datos de compatibilidad para fluidos de trabajo y materiales de contenedores. Fuente: (Duque, 2004).

MATERIAL	FLUIDO DE TRABAJO					
	Agua	Acetona	Amoniaco	Metanol	Dow-A	Dow-E
Cobre	RU	RU	NU	RU	RU	RU
Aluminio	GC	RL	RU	NR	D	NR
Acero Inoxidable	GT	PC	RU	GT	RU	RU
Níquel	PC	PC	RU	RL	RU	RL
Refrasil	RU	RU	RU	RU	RU	

Donde RU: Recomendado por uso exitoso; RL: Recomendado por la literatura; PC: Probablemente compatible; NR: no recomendado; NU: No usado; D: desconocido; GC: generación de gas a todas las temperaturas; GT: generación de gas a elevadas temperaturas cuando hay óxido presente.


Tabla 2. Propiedades físicas del cobre. Fuente: Elaboración propia.

PROPIEDADES FÍSICAS		
Punto de ebullición.	2835 K	2565 °C
Punto de fusión	1357,77 K	1084,62 °C
Entalpia de vaporización	300 kJ/mol	
Entalpia de fusión	13.1 kJ/mol	
Calor específico	385 J/(K.kg)	
Conductividad térmica	400 W/Mk	
Velocidad del Sonido	3570 m/s (20°C)	293.15 K

### 2.3. FLUIDO DE TRABAJO

Generalmente los termosifones están compuestos por una pequeña cantidad de fluido en el interior del tubo el cual es elegido según la aplicación y el rango de temperatura para la cual se destine el tubo. Los fluidos de trabajo son los encargados de la operatividad del TS ya que se encargan transmitir la energía térmica por medio de los cambios de fase que ocurren durante su ciclo de trabajo.

Al igual que los contenedores, los fluidos de trabajo deben de tener propiedades físicas y químicas que se acomoden al sistema. La temperatura es el parámetro fundamental a la hora de la escogencia, por lo que se debe de tener en cuenta el rango útil de temperatura (Tabla 3) para no sobrepasar los límites que puede soportar el fluido, sin embargo, no se

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

debe dejar atrás propiedades tales como: compatibilidad con el material (Tabla 1), composición química (la cual no debe verse afectada al ser sometido a calor), el calor latente de vaporización de fluido debe de ser alto para que permita transferir grandes cantidades de vapor con poco flujo de masa, alta conductividad térmica, baja viscosidad para minimizar la resistencia de flujo cuando circule por las paredes del tubo y alta tensión superficial para que pueda ser atraído al contenedor con facilidad (Copete & Herrera, 2011; Giraldo & Lopera, 1988).


Tabla 3. Fluidos de trabajo para tubos de calor. Fuente: (D. Reay & Kew, 2006)

Medio	Punto de fusión (°C)	Punto de ebullición a Patm (°C)	Rango útil (°C)
Helio	-271	-261	-271 a -269
Nitrógeno	-210	-196	-203 a -160
Amoniaco	-78	-33	-60 a 100
Pentano	-130	28	-20 a 120
Acetona	-95	57	0 a 120
Metanol	-98	64	10 a 130
Flutec PP2 <sup>1</sup>	-50	76	10 a 160
Etanol	-112	78	0 a 130
Heptano	-90	98	0 a 150
Agua	0	100	30 a 200
Tolueno	-95	110	50 a 200
Flutec PP9 <sup>1</sup>	-70	160	0 a 225
Thermex <sup>2</sup>	12	257	150 a 350
Mercurio	-39	361	250 a 650
Cesio	29	670	450 a 900
Potasio	62	774	500 a 1000
Sodio	98	892	600 a 1200
Litio	179	1340	1000 a 1800
Plata	960	2212	1800 a 2300

Nota: (El rango de operación de temperatura útil es solo indicativo)

<sup>1</sup> Incluido para casos donde el aislamiento eléctrico es un requerimiento.

<sup>2</sup> También conocido como Dowtherm A, mezcla de difeniléter and difenil.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22


### 2.3.1. NANOFLUIDO

Frecuentemente se encuentra que los fluidos que se han utilizado para inyectar al interior de los termosifones son: agua, helio, tolueno, metanol, amoníaco, sodio y plata; aunque son fluidos de trabajo que sirven para obtener transferencia de calor, se ha abierto la posibilidad de investigar y crear nuevos fluidos que mejoren la eficiencia y la transferencia de calor. Los nanofluidos surgen como una posible alternativa en el ámbito de los fluidos utilizados en el campo de sistemas térmicos. La composición de estos tienen como base fluidos comunes (agua, etilenglicol, aceites y soluciones poliméricas), pero con la diferencia de que se le dispersa partículas de tamaño  $< 10\text{nm}$  para lograr incremental la conductividad térmica, estas son conocidas como nanopartículas y son mezcladas en bajas concentraciones volumétricas generalmente menores a 10% (K. Cacua, Buitrago, Pabón, Herrera, & Rentería, 2017). Existen diferentes tipos de nanopartículas que pueden ser agregadas al fluido, entre estas tenemos: metales, carburos metálicos, carbón, nanopartículas mezcladas o compuestas, además nanopartículas de óxido metálico, las cuales se encuentran entre las más aplicadas en los fluidos base (K. Cacua et al., 2017; Hossein, Mirlohi, Alhuyi, & Ghasempour, 2018).

La creación de nanofluidos tienen como objetivo potencial aumentar la eficiencia térmica en diferentes sistemas que la relacionen como lo es la transferencia de calor (D. A. Reay, Kew, & McGlen, 2014), aunque en las implementaciones de estos en pruebas experimentales se ha logrado observar que generan una respuesta positiva en rendimiento térmico, aún no han podido ser implementados en aplicaciones industriales, ya que sufren problemas de estabilidad con el tiempo en sus propiedades termofísicas, los cuales pueden afectar el funcionamiento a largo plazo (K. Cacua et al., 2017). Por tal razón, esta nanotecnología sigue siendo motivo de investigación con el fin de darle solución al problema mencionado con antelación.

### 2.4. LÍMITES DE OPERACIÓN

Como cualquier elemento de trabajo ya sea dispositivos electrónicos, máquinas industriales, motores de combustión interna, entre otros, tienen restricciones de operación que se deben de tener presentes al momento de ponerlos en funcionamiento. Así mismo es el caso de los termosifones, donde existen varios factores que pueden

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

afectar la transferencia de calor, por lo que hay que tener en cuenta y hacer cumplir unos límites de operación tanto químicos como físicos para obtener un mejor desempeño. Aunque los termosifones bifásicos puedan transportar energías mucho más altas que el mejor de los conductores metálicos, si se supera estos límites su funcionamiento se vería considerablemente afectado (Duque, 2004). Los límites de operación a los que se hace referencia son: límite sónico, límite viscoso, límite de arrastre y límite de ebullición; donde básicamente dependen de la temperatura de trabajo y la forma del tubo de calor (Copete & Herrera, 2011).

Las consideraciones que se mencionaron al momento de hablar sobre el fluido de trabajo y el material de la carcasa (compatibilidad, rangos de temperatura, conductividad térmica) pueden señalarse como restricciones de operación, como también la posición en la que se debe implementar el termosifón donde debe ser únicamente en sentido vertical con la sección del evaporador en la parte inferior.

#### 2.4.1. LÍMITE SÓNICO


Este sucede cuando al aumentar la temperatura en el evaporador el flujo de vapor será cada vez mayor, lo que conlleva a un incremento de velocidad incluso igual a la velocidad del sonido (343,2 m/s a 20 °C de temperatura). Esto, causa cambio en el modo de operación por el efecto de compresibilidad generado lo que quiere decir que los cambios de presión en el condensador no se transmitirán al evaporador (Copete & Herrera, 2011).

#### 2.4.2. LÍMITE VISCOSO

Este límite es totalmente dependiente de la temperatura ya que al inicio de operación el fluido se encuentra a baja temperatura y la presión de vapor es mínima, lo que significa alta viscosidad generando caídas de presión, por tal motivo hay que calentar más el fluido para que dicha viscosidad sea la mínima y haya mejor flujo (Copete & Herrera, 2011).

#### 2.4.3. LÍMITE DE ARRASTRE

Este límite es llamado también como tasa de adición de calor. Al haber una adición de calor en el evaporador, el vapor poseerá una mayor velocidad respecto al líquido por lo que el vapor ejerce una acción de arrastre al líquido debido a la ley de conservación de

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

cantidad de movimiento que establece que la fase más rápida tiende a aumentar su cantidad de masa a medida que pierde velocidad, dicho esto, la tensión superficial no será capaz de retener las moléculas del líquido y este se desprenderá hacia el vapor, esto causa gran probabilidad de que el proceso de vaporización-condensación se detenga porque la zona de evaporador se seca (Silverstein, 1992).


#### 2.4.4. LÍMITE DE EBULLICIÓN

Existe una tasa de transferencia de calor a partir de la cual el líquido se evapora sin alcanzar a llegar al evaporador, esta tasa de calor es conocida como el límite de ebullición (Silverstein, 1992). En otras palabras no puede haber una mayor transferencia de calor porque ya no cumpliría el límite y por ende ya no sería vapor del fluido. Esto tiene como consecuencia que no habrá retorno al condensador.

#### 2.5. PROCESO DE MANUFACTURA

Los tubos de calor y los termosifones bifásicos son generalmente más simples de fabricar que los sistemas de recuperación de calor de placa plana, sin embargo la elaboración de estos dispositivos dependen de factores como los mencionados en las secciones anteriores. La compatibilidad de fluido, los rangos de temperatura, límites de operación, el material de la carcasa, tamaño de la estructura, aplicación de los tubos, son quizás los criterios fundamentales en el transcurso de la manufactura, pero no se debe dejar al lado el proceso de limpieza de los tubos, ya que en la fabricación de los mismos se pueden generar partículas no deseadas para el sistema, además, cuando se hace esto se asegura que no existan incompatibilidades en los elementos del tubo (D. A. Reay et al., 2014). Cada uno de los criterios cuenta con una serie de modelos matemáticos para ser calculados, pero por lo general son muy complejos y dependen de muchas suposiciones, propiedades y variables. Cuando se desea plantear un diseño de estos dispositivos térmicos, lo que se pretende es calcular algunos parámetros como son la cantidad de fluido adecuada, el tamaño del tubo y tipo de malla (cuando sea el caso), y algunos límites operacionales (Paris, 2007).

Para entender con más facilidad el proceso de manufactura de los termosifones bifásicos, a continuación se describe todo los pasos que se deben de llevar a cabo:

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22


### 2.5.1. ELECCIÓN DEL MATERIAL DE LA CARCASA

El material del contener se elige de acuerdo a la aplicación en la que vayan a estar implementados los tubos, ya que las propiedades del material deben de satisfacer las exigencias del proceso. El cobre, aluminio y acero inoxidable son los materiales más aptos para sistemas de intercambio de calor, además de que tienen una gran posibilidad de cumplir las características, son muy comerciales, por lo que se pueden conseguir en diferentes dimensiones. Como se mencionó en la sección 2.2, el cobre es el material que más se adapta en su gran mayoría a todos los criterios y su uso es muy común en sistemas de intercambio de calor que operen entre 0°C a 200°C. Hablando del segundo material mencionado y del tercero, Reay, Kew y McGlen (D. A. Reay et al., 2014) dicen que aunque el aluminio (AL) posee características de buen conductor térmico, es menos común en el ámbito de los tubos de calor, pero aun así es muy utilizado en aplicaciones aeroespaciales debido a su bajo peso y que el acero inoxidable es un material que tiene muchas limitaciones en cuanto al fluido de trabajo, ya que a largo plazo puede tener problemas como generación de gases, pero, este tipo de material en muchos casos es el único que es compatible con los metales líquidos (sodio, mercurio, potasio).

### 2.5.2. SELECCIÓN DEL FLUIDO DE TRABAJO

Hablando del fluido de trabajo, se sabe que se debe de elegir siempre de acuerdo a la temperatura de operación, por lo que no puede perder las características que posee mientras esté siendo sometido a calor y a cambios de fase, adicionalmente, se debe de asegurar que el fluido compatible con la carcasa. Como se observó en la Tabla 3, existen diversos fluidos que pueden ser utilizados para este sistema, pero para saber o comparar cual es mejor fluido trabajo entre los descritos, existe un modelo matemático que entre mayor sea el resultado, da la idea de que el fluido es el más adecuado para el proceso requerido (Copete & Herrera, 2011). La ecuación (1) es conocida como el número de Merit y está dada por:

$$M = \frac{\sigma \Delta H v \rho}{\mu} \quad (1)$$

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Donde  $\sigma$ : Tensión superficial;  $\Delta H_v$ : Calor latente de evaporización;  $\rho$ : Densidad del fluido del líquido;  $\mu$ : Viscosidad del fluido líquido. Esta ecuación debe ser evaluada a la temperatura de ebullición del fluido.

### 2.5.3. PROCESO DE VACÍO Y DESGASIFICACIÓN


El proceso de vacío y de desgasificación, es un método empleado para eliminar los gases no condensables que puede tener un tubo en su interior, además para despresurizar el sistema, ya que teniendo la menor la presión posible dentro del tubo, el fluido podrá evaporarse a una menor temperatura de lo que normalmente lo hace cuando está sometido a presión atmosférica. Esta actividad puede realizarse de dos formas: por medio de una bomba de vacío, la cual como su nombre lo dice, es capaz de generar vacío conectando el termosifón a la salida de la bomba para que está succione su interior; y esta el método de hacer la desgasificación por medio de calentamiento, ya sea en equipos cerrados como los hornos o sometidos a calor a elevadas temperaturas. En termosifones implementados en sistema de baja de temperatura no es necesario realizar el proceso de desgasificación, mientras que los que se encuentran o van a ser adecuados en sistemas con temperaturas superiores a 400°C o aplicación espaciales, se les debe de realizar la desgasificación antes de cargar y sellar los tubos y después de haberle realizado la limpieza (D. A. Reay et al., 2014).

La no aplicación de algunos de estos procesos puede tener consecuencias significativas en la operación de los termosifones, superación de los límites de operación, sobrecalentamiento y secado del evaporador, reducción de la longitud efectiva del tubo e incluso daños en la estructura del material, son los principales efectos que pueden ocasionar la acumulación de los gases no condensables en su interior.

### 2.5.4. PROCESO DE CARGA DEL FLUIDO

Este proceso es uno de los más importantes durante la elaboración de los termosifones, ya que consiste en la inyección del fluido al interior del tubo. El fluido es el principal encargado de hacer que funcione los termosifones, y por ende es el encargado de que pueda lograr el intercambio de calor durante todo el ciclo de operación. Se debe de tener sumo cuidado con la cantidad de fluido que se le ingresará al tubo, por lo que cuando se hace la estimación del volumen del fluido, se recomienda hacerse el cálculo lo más exacto



	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

posible a la temperatura de operación de tubo, porque si se hace con la del medio ambiente no se obtendrá el funcionamiento esperado, ya que el fluido cargado no será el óptimo para la temperatura utilizada (Duque, 2004).


Tanto la sobrecarga como la poca cantidad del fluido de trabajo, pueden ocasionar un funcionamiento erróneo de los termosifones, por ejemplo: si se tiene una sobrecarga en el tubo, todo el líquido no podrá evaporarse con la temperatura de trabajo, por lo que retrasa el inicio del ciclo de operación y se requeriría una fuente adicional de calor para el fluido sobrante; y para evitar tener menos cantidad del fluido, Peterson (Peterson, 1994) sugiere cargar el tubo entre 10% a 20% por encima al volumen obtenido. Adicionalmente, el autor recién citado, propone algunos métodos adecuados para el proceso de carga:

- Extraer el aire del tubo y luego proceder a llenar con el fluido de trabajo en estado de vapor o líquido.
- Cuando se carga el contenedor con el fluido líquido, se calienta para generar vapor y desalojar el aire.

#### 2.5.5. SELLADO DE LOS TUBOS

El tubo debe ser sellado completamente luego de ser cargado con el fluido, asegurando así que el vacío que se le realizó y el fluido cargado, permanezcan únicamente dentro del contenedor. Este proceso normalmente se hace en dos etapas; la primera es cuando se le va a realizar el vacío al tubo, el cual debe ser sellado en ambos lados, pero uno de ellos, tendrá un orificio que permita estar conectado el tubo a la bomba de vacío, consiguiendo a este, la segunda etapa se hace cuando el tubo está cargado con el fluido. Muy importante, luego de realizar cada soldadura, inspeccionar que el tubo no posea fugas para así asegurar que el fluido no va a tener ningún contacto con el exterior y no va a ver pérdidas.

El sellado de los tubos de cobre se hace mediante soldadura con aporte de material como ser estaño o plata, puede ser cerrado mediante tapones del mismo material del tubo o prensado en los extremos. La soldadura se realiza con una pipeta de gas que sirve para calentar el tubo y así unir el material que servirá como sello, por otro lado, si se usa acero inoxidable o aluminio como material del tubo, el prensado y la soldadura de arco de argón es un buen método de sellamiento (D. A. Reay et al., 2014).

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

#### 2.5.6. LIMPIEZA DE LOS TUBOS


Cuando hablamos de procesos de manufactura de algún equipo, se sabe que durante el desarrollo se van a generar residuos de materia, grasas, óxidos que obstaculizan la circulación del fluido, por ende, se puede ver afectado el funcionamiento del sistema si estas no son retiradas, por lo que el proceso de limpieza como se mencionó anteriormente es fundamental y se debe de llevar a cabo sin excepción alguna.

La limpieza de los tubos depende del material, el proceso realizado en la fabricación y la compatibilidad del fluido, por eso se deben de tener en cuenta las mezclas adecuadas de los productos químicos que se van a utilizar como por ejemplo; Para limpiar el acero inoxidable se debe sumergir los componentes en una solución de 50% de ácido nítrico y 5% de ácido fluorhídrico, luego tiene que ser jugado con agua desmineralizada; el proceso de limpieza de níquel es similar al anterior, pero para este caso el ácido nítrico debe de llevar una solución del 25%; en cambio el cobre necesita una mezcla de 50% de ácido nítrico y 50% de ácido fosfórico; para asegurar que se tuvo una buena limpieza con estas mezclas, se puede hacer la prueba agregándole gotas de agua a la superficie, si esta se esparce inmediatamente se puede decir que se logró el objetivo (D. A. Reay et al., 2014).

Para la elaboración de los termosifones bifásicos de este proyecto se va a utilizar cobre como material referencia, algunos autores como lo es Peterson (Peterson, 1994), describe cual sería el procedimiento recomendado para este tipo de material:

- Remojar y enjuagar las superficies con acetona para remover aceites, grasas y demás.
- Remojar en solución de 50% ácido fosfórico, 50% ácido nítrico, a temperatura ambiente por 15 minutos.
- Enjuagar con fluido de trabajo puro y dejar a 50°C durante una hora.
- Repetir el enjuague con fluido de trabajo y dejar secar con aire seco o nitrógeno.

Adicionalmente, durante la limpieza, el uso de guantes quirúrgicos es de gran importancia para evitar que la piel entre en contacto con los tubos, ya que las manos tienen una gran capacidad de adherir suciedad y absorber grasa leve que puede ser transmitida a los tubos y afectar el mismo proceso.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

### 2.5.7. ENSAMBLE

Después de haber definido cada etapa del proceso de manufactura en las secciones anteriores, a continuación, se describe el orden en el que podría ser un adecuado ensamble de los termosifones bifásicos:


- Selección del material del contenedor.
- Selección del fluido de trabajo
- Fabricar los tapones del tubo.
- Limpieza del contenedor y tapones.
- Soldadura de los tapones.
- Limpieza del hollín generado.
- Verificación de fugas.
- Proceso de vacío al contenedor.
- Carga del tubo con el fluido de trabajo.
- Sellamiento completo del termosifón.
- Última limpieza (en caso de necesitarlo).

Reay, Kew y McGlen (D. A. Reay et al., 2014) mencionan en su literatura que si se desea elaborar un número considerable de tubos de calor iguales, como lo podría ser 50 unidades o más, luego de haber realizado ensayos de prototipo, se pueden omitir algunos procesos durante la fabricación, por ejemplo: la desgasificación de los elementos metálicos puede ser innecesaria, además, dependiendo del procedimiento de vacío y llenado utilizado, la desgasificación del fluido puede eliminarse como una actividad separada.

### 2.6. INTERCAMBIADORES DE CALOR CON TERMOSIFONES

Los intercambiadores de calor (HX, por sus siglas en inglés) son dispositivos utilizados para transferir energía térmica entre dos o más fluidos, entre una superficie sólida y un fluido a diferentes temperaturas, en contacto térmico y donde no existen fuentes externas de calor o interacciones de trabajo (Shah & Sekulic, 2003).

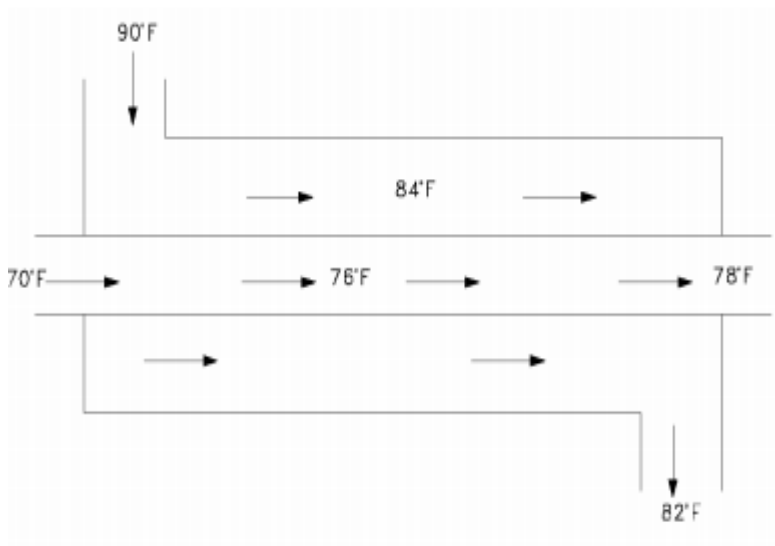
Los intercambiadores de calor son de uso común en diferentes procesos, desde sistemas domésticos de calefacción y acondicionamiento de aire hasta los procesos químicos y la

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

producción de energía en procesos industriales grandes (Cengel & Ghajar, 2011). En los últimos años, el uso de los intercambiadores de calor ha aumentado respectivamente desde los aspectos de la conservación de la energía, conversión, recuperación e implementación de nuevas fuentes energéticas, con el fin de reducir impactos ambientales que se presentan debido a diferentes tipos de contaminación sea en el aire, agua, térmica y en el tratamiento de residuos industriales (Copete & Herrera, 2011).

Para satisfacer la gran variedad de procesos en los que las industrias utilizan equipos de transferencia de calor, se han implementado diversos tipos de intercambiadores de calor, aunque todos están diseñados para el mismo objetivo, tanto externa como internamente están contruidos de diferente forma, además, también pueden estar diferenciados por la dirección en que los fluidos circulan dentro del intercambiador, a los cuales se les puede llamar como intercambiadores de calor de flujo paralelo (Fig. 6), de contraflujo (Fig. 7) o intercambiadores de calor de flujo cruzado (Fig. 8). De forma muy general, a continuación se presentan algunos de los intercambiadores de calor más comunes:

Fig. 6. Intercambiador de calor de flujo paralelo. Fuente: (Jaramillo, 2007).




	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Fig. 7. Intercambiador de calor de contraflujo. Fuente: (Jaramillo, 2007).

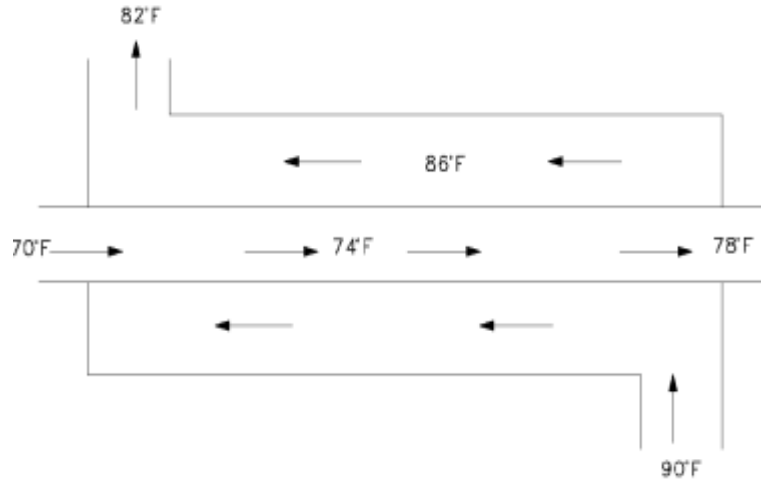
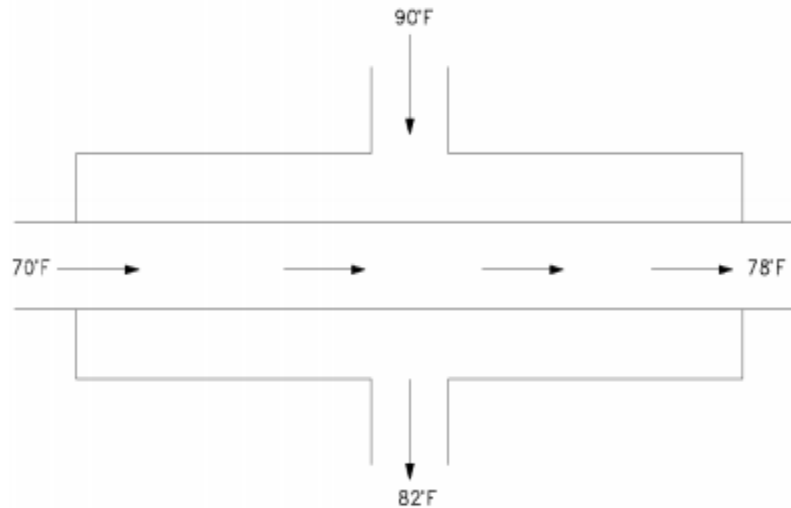


Fig. 8. Intercambiador de calor de flujo cruzado. Fuente: (Jaramillo, 2007).



### 2.6.1. INTERCAMBIADOR DE DOBLE TUBO

Son los equipos de transferencia de calor más sencillos que existen, y están formados por dos tubos concéntricos (Fig. 9). La región externa puede ser empleada tanto para el fluido caliente como para el fluido frío mientras que el otro fluido ocupa la tubería interna, además, éste puede ser usado en flujo paralelo o a contraflujo.


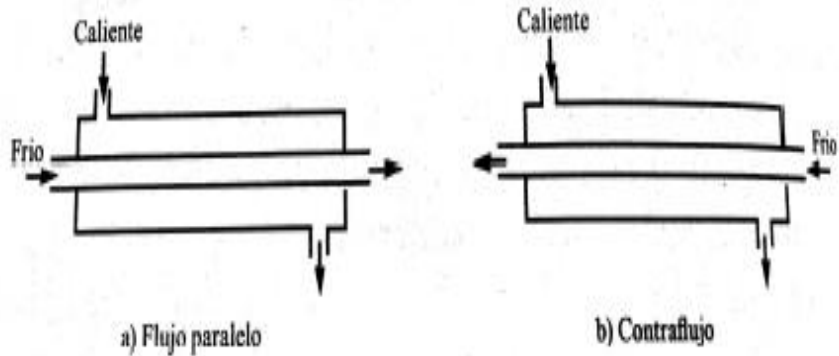
	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

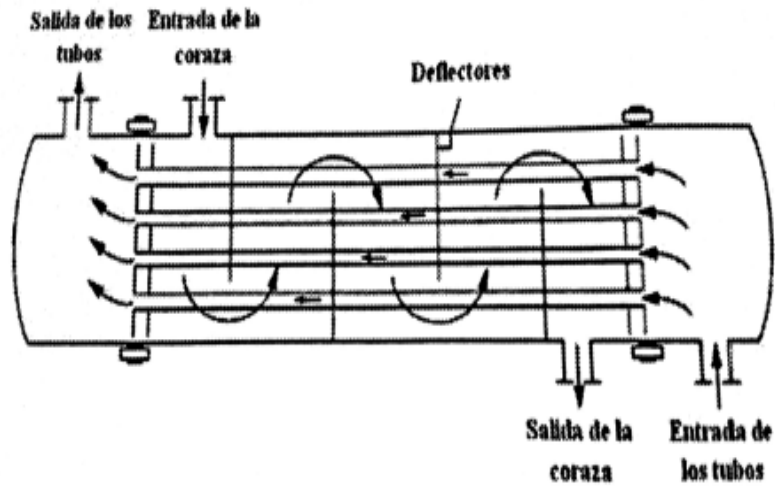
Fig. 9. Intercambiador de calor de doble tubo. Fuente: (Copete & Herrera, 2011).




### 2.6.2. INTERCAMBIADOR DE CORAZA Y TUBOS

Este tipo de intercambiador es uno de los intercambiadores más empleados a nivel industrial. Este tipo, está compuesto por una variedad de tubos dentro de su carcasa (Fig. 10), en donde uno de los fluidos circula por el interior de los tubos mientras que el otro fluido circula entre la superficie exterior de los tubos y la carcasa. Estos equipos tienen la ventaja de ser compactos, y de soportar presiones altas o mayores a 400 atm (Paris, 2007).

Fig. 10. Intercambiador de calor de coraza y tubos. Fuente: (Copete & Herrera, 2011)



	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

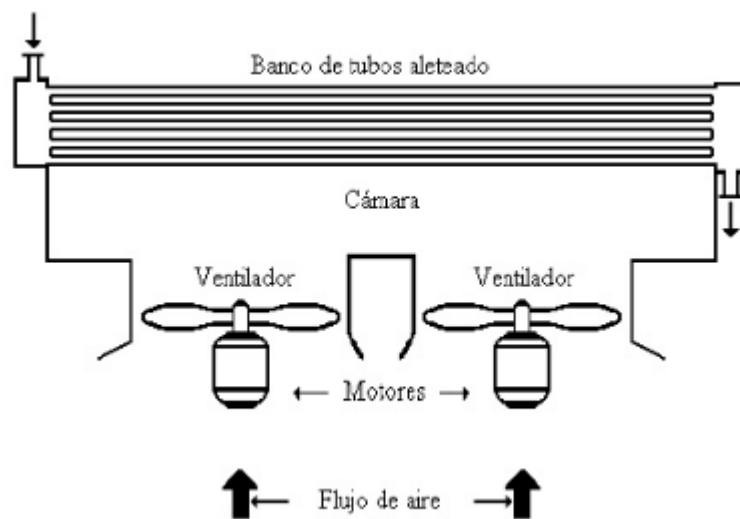
### 2.6.3. INTERCAMBIADOR DE CALOR COMPACTO


Son dispositivos con arreglos de tubos con aletas o placas que permiten conseguir un área superficial de transferencia de calor por unidad de volumen muy grande ( $< 700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ). Se utilizan normalmente cuando al menos uno de los fluidos es un gas, y en consecuencia se caracterizan por un coeficiente de convección pequeño. Los tubos pueden ser planos o circulares, y las aletas pueden ser de placa o circular. Los flujos asociados con intercambiadores de calor compactos normalmente son pequeños y el flujo es por lo general laminar (Incropera & DeWitt, 1999).

### 2.6.4. INTERCAMBIADOR DE CALOR REFRIGERADO POR AIRE

Estos equipos de transferencia de calor están diseñados para que trabajen de forma más simple con ayuda del aire ambiente o ventiladores (Fig. 11), los cuales al pasar el aire por fuera de una unidad de tubos, actúa como medio refrigerante para condensar y/o enfriar el fluido que va por dentro de los mismos. Comúnmente se le conoce como intercambiadores de flujo cruzado debido a que el aire ingresa al sistema de forma perpendicularmente al eje de los tubos. Pueden ser conocidos por el nombre de convectores o de forma más coloquial como radiadores (González, 2002).

Fig. 11. Intercambiador de calor refrigerado por aire. Fuente: (González, 2002)



	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 2.7. INTERCAMBIADORES DE CALOR CON TERMOSIFONES BIFÁSICOS


Debido al alto uso de la energía en las industrias, se han ocasionado diversos problemas que afectan los materiales usados en los intercambiadores de calor convencionales, por lo que puede disminuir la vida útil de estos equipos, afectar el buen rendimiento térmico que tienen y causar daños ambientales por el alto índice de gases de combustión que se desperdician. Una posible solución para resolver esos problemas es mejorando la eficiencia térmica, a partir de nuevas tecnologías y equipos de ahorro de energía para mejorar el rendimiento de los sistemas en los procesos industriales y que permitan la reducción de materiales y costos.

La implementación de termosifones en intercambiadores de calor puede ser tomado como estrategia para resolver los problemas mencionados anteriormente, ya que, basándonos de los conceptos teóricos, se puede decir que son dispositivos que tienen baja resistencia térmica, su operación es simple y no requieren de energía adicional (mecánica o eléctrica) para su funcionamiento, por lo que pueden ser integrados beneficiosamente en procesos de transferencia de calor (Duque, 2004).

Los intercambiadores de calor con termosifones (TSHX, por sus siglas en inglés) tienen la capacidad de lograr ese objetivo, puesto que, tienen ventajas que lo diferencian de los intercambiadores de calor convencionales. Estas son: ausencia de requisitos de potencia externa (excepto el ventilador, ya que impulsa la corriente de aire), la simplicidad del diseño, la facilidad de fabricación y la fácil limpieza, son aspectos relevantes a tener en cuenta, pero también, los TSHX presentan una alta confiabilidad, ya que en caso de que un termosifón individual presente falencias, esto tiene un efecto mínimo en el rendimiento del sistema. (Ahmadzadehtalatapeh & Yau, 2011).

Un intercambiador de calor con termosifones bifásicos, consiste en una serie de tubos en el interior de estructura externa que los rodea. La función de este tipo de intercambiador, es transferir calor de manera permanente desde un fluido que se encuentra a una temperatura elevada a otro fluido que está a una temperatura inferior, estos fluidos están separados por una pared horizontal dentro de un contenedor (Fig. 12). De acuerdo al funcionamiento de los tubos termosifones bifásicos, el calor se transfiere en el evaporador, localizado en el ducto inferior donde fluye la corriente de gas o líquido



	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

caliente, hasta el condensador, localizado en la parte superior por donde circula el fluido que se desea calentar. También existe otra configuración en la que pueden encontrarse la zona de evaporización y condensación en los intercambiadores de calor con termosifones (Fig. 13), donde se puede transferir calor en cualquier dirección, debido a que las dos zonas están al mismo nivel (Duque, 2004).

Fig. 12. Intercambiador de calor con termosifones. Fuente: (Shabgard et al., 2015)

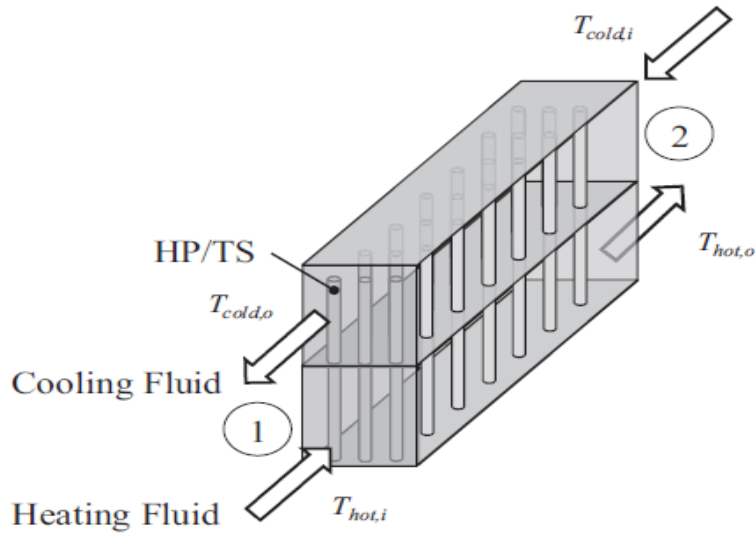
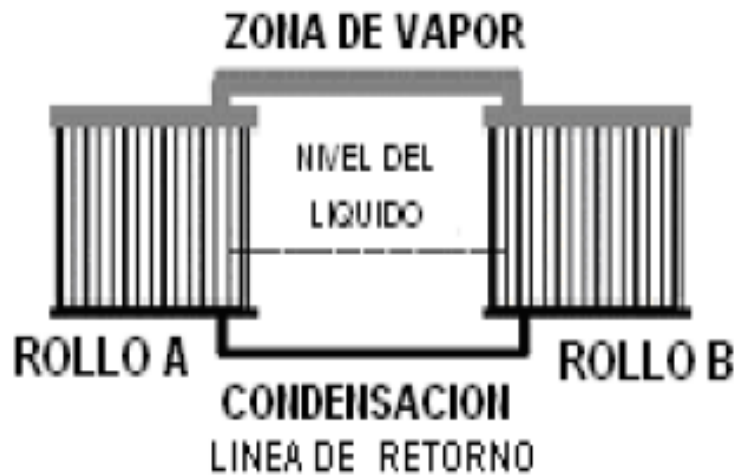



Fig. 13. Intercambiador de calor con zonas separadas. Fuente: (Duque, 2004)




	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Los intercambiadores de calor con termosifones bifásicos se han implementado en diversas aplicaciones como lo son: calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC, por sus siglas en inglés), recuperación de calor residual de gases de combustión, refrigeración de centros de datos, torres de refrigeración en seco, condensadores de vapor, almacenamiento de energía térmica latente para la generación de energía solar. Las consideraciones para las cuales los TSHX pueden ser más ventajosos con respecto a los HX son: cuando el diseñador se ve obligado a trabajar con una fuente caliente y fría separadas por una gran distancia, o si el área de superficie de transferencia de calor requerida de los lados es significativamente diferente debido a las grandes diferencias entre los coeficientes de transferencia de calor de convección de ambas zonas (Shabgard et al., 2015).

## 2.8. ESTADO DEL ARTE


Para el diseño de los tubos se debe tener en cuenta la compatibilidad de los materiales, ya que existen varios parámetros como la pared, malla, fluido de trabajo y sólidos en contacto (Shabgard et al., 2015). Normalmente los tubos de calor y termosifones se fabrican con cobre, aunque para fabricar tubos de calor más ligeros sin comprometer la conductividad térmica, se han utilizado aleaciones de aluminio, titanio y magnesio, pero son susceptibles a la corrosión (Chan et al., 2015). (D. A. Reay et al., 2014) en su libro de tubos de calor (Heat Pipe en inglés), describen se han utilizado diferentes materiales. Un grupo de investigadores en Taiwán, que trabajan con tubos de calor de polímeros, emplearon una película de plástico de polietileno tereftalato (PET, por sus siglas en inglés) en un tubo de calor de placa plana, el grupo concluyó que el dispositivo era una alternativa viable y de bajo costo en algunas aplicaciones de refrigeración de productos electrónicos. Adicionalmente, se puede encontrar que algunos investigadores han experimentado con otro tipo de fluidos, en un trabajo que se realizó en el país de China, se utilizó el naftaleno, donde el fluido alcanzo temperaturas de vapor superiores a 250 °C siendo un posible fluido para el uso, siempre y cuando se evalué la compatibilidad con el material (Li, Zhang, Yang, & Xu, 1997), también, Chen, Deng y Zhang (Chen, Deng, & Zhang, 2013) investigaron sobre el CO<sub>2</sub> en termosifones, en particular analiza su uso y presenta una metodología para evaluar el rendimiento transitorio de dichos sistemas, estos, dan como conclusión que el uso de CO<sub>2</sub> como fluido de trabajo en un circuito de

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

transferencia de calor de circulación natural daría como resultado un 95% más transferencia de calor que en un circuito similar basado en agua (Chen et al., 2013).

El funcionamiento en los tubos de calor se basa en la evaporación y la condensación del fluido (Shabgard et al., 2015). Para que se facilite el funcionamiento se busca extraer todo el aire del interior del tubo. En un artículo relacionado con un sistema de enfriamiento asistido por termosifón para aplicaciones de refrigeración explican cómo realizaron el proceso de vacío y llenado del tubo para la simulación de su proyecto; para agregar el metanol, usaron una bomba de vacío y un sistema de válvula para evacuar el termosifón a una presión de -0,01 mmHg, seguido de la adición del volumen deseado de metanol (He, Mei, & Longtin, 2017). En este trabajo se utilizaron relaciones de llenado, definidas como la relación de volumen de fluido de trabajo al volumen de la sección del evaporador, de 5% y 10%, y se obtuvieron llenados de 15,6 ml y 31,3 ml de metanol, respectivamente (He et al., 2017).


Para el desarrollo de trabajos de grados, artículos y varios proyectos han utilizado el mismo método de vacío y carga de (He et al., 2017). Luis y Carolina (Paris & Mira, 2008) quienes para la sexta conferencia internacional de América Latina y el Caribe para ingeniería y tecnología, construyeron y probaron un prototipo de tubo de calor de bajo costo para la aplicación en un colector de energía solar utilizaron un método muy similar, allí, ellos instalaron una válvula de carga, que se acopla a un sistema de carga de tubos de calor. En este sistema, primero, hicieron vacío y luego ingresaron el fluido de trabajo, además las tapas se fijaron con soldadura con material de aporte de alta capilaridad. Luis (Paris, 2007), también, para el 8º congreso Iberoamericano de ingeniería mecánica, empleo el mismo método; en uno de los tapones de los extremos, agregó un tubo capilar de 3 mm de diámetro para hacer la adición del fluido mediante una válvula de carga una vez realizado la evacuación del aire, este TSB se cargó con 1 g de agua como fluido de trabajo. Por último, y tomando un método diferente en un banco de carga, Andrés (Duque, 2004) para su tesis de grado para obtener el título como ingeniero mecánico, describió que el sistema de llenado consistió en una bureta graduada para hacer el llenado del tubo con líquido, cuatro válvulas conectadas de tal forma que forman una cruz, una conectada a la bureta, una para conexión con la bomba de vacío, otra para el vacuómetro y por último una para conectar al tubo de calor, también dice que el proceso de soldadura debe hacerse con soldadura de oxi-acetileno con material de aporte de alta capilaridad, en este caso soldadura de plata de alto punto de fusión (Duque, 2004).

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Cuando se pretende construir termosifones la limpieza del contenedor es un proceso vital que se debe de realizar. En una tesis sobre diseño y construcción de un prototipo de intercambiador de calor utilizando termosifones bifásicos (Duque, 2004), habla de la importancia que tiene la limpieza en los tubos; las mezclas de los productos químicos que implementaron para la limpieza fueron: remojar y cepillar en la piezas soldadas en ácido clorhídrico en una concentración no mayor a 25% para remover impurezas causadas por la soldadura, Luego de realizado lo anterior, enjuagaron con agua y secaron, para después sumergir las partes en un recipiente con una solución de 33% de ácido clorhídrico y 67% agua por un tiempo aproximado de 4 a 5 minutos (Duque, 2004). Por otro lado, otros autores utilizaron para la limpieza del tubo de calor, ácido clorhídrico al 12% e hidróxido de sodio al 2%, con tiempos de permanencia de 15min y enjuagues intermedios con abundante agua limpia (Paris & Mira, 2008).


Durante los últimos años los tubos de calor han sido adecuados en una variedad de aplicaciones tales como intercambiadores de calor de alta temperatura, reactores nucleares, reactores espaciales, almacenamiento de energía solar con materiales de cambio de fase (Jouhara et al., 2017), además en sistemas de componentes electrónicos. En los sistemas electrónicos existe teoría que se refiere a que es mejor el uso de termosifones en estos sistemas, como lo dicen los autores Marine, Stéphane y Valérie (Narcy, Lips, & Sartre, 2018), quienes con su literatura describen que los tubos de calor se consideraron primero como una solución adecuada para la refrigeración de los componentes electrónicos.

Por otra parte y dándole un enfoque más central a lo que va a ser el uso de los termosifones bifásicos en este proyecto, hablamos de los intercambiadores de calor con tubos de calor (HPHX, por sus siglas en inglés) han demostrado en investigaciones que su integración en los intercambiadores de calor tiene un gran potencial para el ahorro de energía (Jafari, Di Marco, Filippeschi, & Franco, 2017), se puede decir que estos sistemas poseen muchas ventajas como la alta conductividad térmica, alta efectividad térmica y peso mínimo comparado con los intercambiadores sin tubos de calor (Jouhara et al., 2017). Sin embargo los HPHX no se pueden utilizar en medios corrosivos, para esto se necesita la consideración de los elementos de transferencia de calor por radiación. Debido a esto surgieron varios científicos que quisieron experimentar el caso como lo son Jung y Boo (Jouhara et al., 2017) que realizaron un modelado térmico numérico de un

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22


intercambiador de calor con tubos de calor de alta temperatura bajo radiación, el material del tubo fue acero inoxidable cargado con sodio. El estudio implicó el efecto del área de transferencia de calor y la relación de números de Reynolds entre el lado caliente y el lado frío en los siguientes parámetros: temperatura de entrada y salida, velocidad de transferencia de calor y efectividad del intercambiador de calor. Adicionalmente y para darle profundidad al tema ya que no se había dado solución al problema de la corrosión en aplicaciones de recuperación de calor residual de alta temperatura, Meisel et al. (Jouhara et al., 2017), presentó un diseño de un tubo de calor de cerámica multicapa utilizado para intercambiadores de calor con tubos de calor de alta temperatura que pueden emplearse en ambientes altamente corrosivos y abrasivos, eligió sodio como fluido de trabajo y el material de la carcasa se recubrió con cerámica Inconel 600, para este experimento se probaron un termosifón y un tubo de calor con malla, ahí se observó que el rendimiento del tubo de calor con malla capilar es mejor que el termosifón para las mismas condiciones.

Hablando un poco sobre los nanofluidos, son elementos capaces de aumentar la eficiencia térmica. Algunos autores mencionan que el rendimiento térmico de los termosifones puede mejorarse mediante el empleo de nanofluidos (Ramezanizadeh, Nazari, Ahmadi, & Açikkalp, 2018), debido a esto, han surgido varias investigaciones para corroborar lo mencionado. En un artículo relacionado con el tema, investigaron el rendimiento térmico de un termosifón al utilizar dióxido de titanio disperso y nanopartículas de oro. Los resultados revelaron que al aplicar nanofluido de oro, es posible tener hasta un 20% menos de resistencia térmica en comparación con el uso de agua desionizada como fluido de trabajo (Grab, Gross, Franzke, & Buschmann, 2014). Otros participantes, evaluaron el rendimiento térmico de un termosifón cerrado de dos fases mediante el uso de nanofluidos a base de agua. Las nanopartículas aplicadas fueron  $Al_2O_3$  y  $TiSiO_4$  en diferentes concentraciones (0,01%, 0,02%, 0,05% y 0,075% en vol.). Los resultados indicaron que las resistencias térmicas disminuyeron en un 65% en el caso de usar  $Al_2O_3$  nanopartículas con una concentración de 0.05% (Kamyar, Ong, & Saidur, 2013). En cuanto a su elaboración, se debe de tener en cuenta que la conductividad térmica, puede verse afectada por varios factores, el tamaño de las partículas que se le inyectan al fluido y la forma de las nanopartículas son de las atribuciones importantes a tener en cuenta (Hosseini et al., 2018). Autores como Sharifpur, Tshimanga, Meyer y Manca (Sharifpur, Tshimanga, Meyer, & Manca, 2017), investigaron los efectos del tamaño de las partículas, la concentración y la temperatura en la conductividad térmica del nanofluido de  $\alpha-Al_2O_3$  / glicerol. Los tamaños de partículas considerados en el estudio fueron 31 nm, 55 nm y 134

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

nm. Además, la temperatura varió en el rango de 20 °C y 45 °C y la concentración volumétrica varió entre 0.5% y 4%. Los resultados mostraron que el aumento en el tamaño de partícula causó una reducción en la relación de conductividad térmica del nanofluido (Sharifpur et al., 2017).

En general, la manufactura de los termosifones se puede ver como un proceso simple, sin embargo, siempre se debe de tener en cuenta cada uno de los factores descritos con antelación, ya que cada uno de ellos tiene una función indispensable en la fabricación, tanto la elección de los materiales como la limpieza. En los diferentes artículos científicos, trabajos de grado y proyectos investigados, se nota que emplearon métodos similares de proceso de vacío y de carga que pueden ser de ayuda para la ejecución de este proyecto de grado, ya que el laboratorio de la universidad cuenta con equipos similares. En cuanto al sellado, se han utilizado diferentes procesos de soldadura como lo es soldar con pipeta de gas u oxi-acetileno, pero esto debe de ir siempre acompañado del material de aporte, además, se debe de optar por elegir el método de sellado según sea el material del contenedor. Para la limpieza, también se han utilizado productos químicos especiales, para tener más información en este punto, en este proyecto se realizará un proceso de limpieza más simple pero con productos químicos comunes y distintos a los utilizados en los trabajos relacionados. Asegurando una buena manufactura del termosifón, se puede decir que se va a obtener un funcionamiento óptimo. Por otra parte, no se debe dejar al lado la elección de los materiales de trabajo, de estos también depende la eficiencia térmica del termosifón. Como se describió durante el marco teórico, existen diferentes elementos o fluidos que pueden ser adecuados para el uso, unos más que otros, como lo es nanofluido, el cual puede mejorar el rendimiento térmico del fluido por medio de partículas por lo que puede ser de gran ayuda para esta tecnología de recuperación de calor, Por tal motivo el nanofluido será uno de los fluidos con el que se realizará la evaluación experimental que se desea hacer en el laboratorio del ITM, con el fin de aportar más investigaciones relacionadas con el tema.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

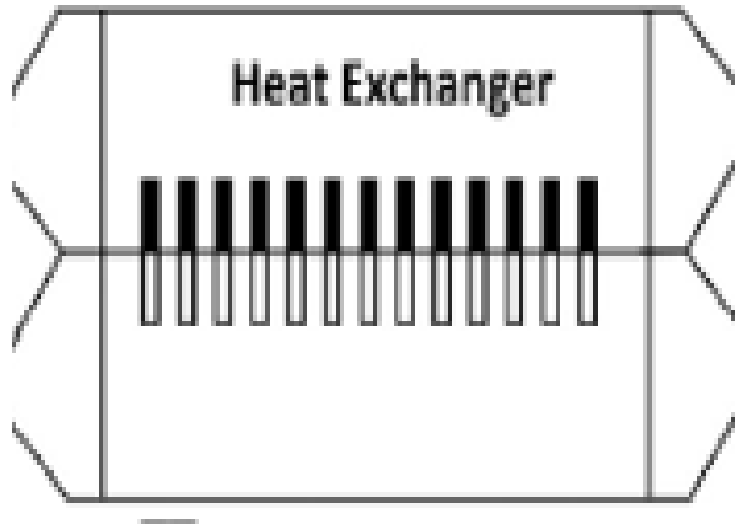
### 3. METODOLOGÍA

---

#### 3.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS TERMOSIFONES ANTIGUOS

Para alcanzar los objetivos propuestos del proyecto, es decir, la manufactura y el montaje de los termosifones al intercambiador de calor (Fig. 14), la metodología que se utilizó para este trabajo fue basada de proyectos de grado que relacionan la construcción de termosifones, además se utilizaron técnicas de manufactura simples que no requieren de grandes equipos a excepción de la bomba de vacío.

Fig. 14. Esquema del sistema. Fuente: (Karen Cacua, Olmos-Villalba, Herrera, & Gallego, 2016)



En primer lugar, se inició el proceso verificando el estado que tienen cada uno de los tubos del sistema anterior, adicionalmente, se tomaron medidas para obtener datos básicos iniciales, los cuales son: diámetro interno y externo, longitud de zona de evaporación y zona de condensación, fluido de trabajo y relación de llenado. Para esto se destaparon algunos de los termosifones con los que trabajaba el sistema antiguo. Los datos obtenidos fueron:


	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Tabla 4. Medidas obtenidas de los termosifones antiguos. Fuente: Elaboración propia.

Diámetro exterior del tubo	1,27 cm
Diámetro interior del tubo	0,95 cm
Diámetro nominal del tubo	3/8 in
Longitud total	50 cm
Longitud zona de evaporador	23 cm
Longitud zona condensador	23 cm
Material del tubo	Cobre
Fluido de trabajo	Agua
Relación de llenado	22 %


### 3.2. LINEAMIENTOS PARA CONSTRUCCIÓN DE TERMOSIFONES NUEVOS

Partiendo de lo anterior y teniendo claro cuáles eran las medidas y datos requeridos, se dio inicio al proceso de construcción de los termosifones. Para la elaboración de los termosifones nuevos, se utilizó tubería de cobre con diámetro nominal de 3/8 de pulgada. Se escogió este diámetro de tubería basándonos en los antecedentes del proyecto, ya que, se realizaron los diseños con diferentes diámetros de tubería y se concluyó que esta medida era la adecuada debido a que si se implementaban termosifones con diámetros menores, se generaba mucha caída de presión en el interior del tubo y si se elegía diámetros mayores, el área de transferencia de calor mermaba por lo que no era beneficioso para el intercambiador de calor. Tanto las zonas de evaporación y condensación como la longitud total del tubo fueron las mismas mencionadas en la Tabla 4. A diferencia de los termosifones antiguos, el fluido de trabajo que se implementó para los dispositivos nuevos fue nanofluido.

### 3.3. CORTE DE TUBERIA, UMBILICAL Y TAPAS

Para realizar el proceso de corte de tubería de 3/8 in (Fig. 15) y del umbilical (Fig. 16) el cual se hizo con tubería de cobre también pero con diámetro nominal de 3/16 in, se utilizó la herramienta conocida como cortatubos. Esta fue facilitada por el laboratorio de energía térmica del ITM.




 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

*Fig. 15. Corte de tubería. Fuente: Elaboración propia.*



*Fig. 16. Corte de umbilical. Fuente: Elaboración propia.*



	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22


*Fig. 17. Tubería cortada. Fuente: Elaboración propia.*



*Fig. 18. Umbilical cortado. Fuente: Elaboración propia.*



Para las tapas, se requirió de un proceso de corte más especializado, ya que estas deben quedar lo más exacto posible al diámetro interior del tubo para así facilitar el proceso de soldadura. La máquina utilizada para esta actividad fue un torno convencional, este equipo fue facilitado por el laboratorio de máquinas y herramientas del ITM. Se adquirió una barra de cobre de diámetro nominal de  $\frac{1}{2}$  de pulgada, con un buril de tronzado, se cilindró la barra hasta obtener el diámetro de  $\frac{3}{8}$  de pulgada (Fig. 19), una vez obtenido

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22


lo anterior, con el mismo buril se tronzó (Fig. 21) la barra cada 4 mm para cortarla y así obtener las tapas. Se elaboraron 2 tipos de tapas, la primera fue un círculo completo para un lado de la tubería (Fig. 23) y la segunda fue el mismo círculo pero con la diferencia de que se perforaron en el medio para tener donde acoplar el umbilical (Fig. 22).

*Fig. 19. Cilindrado de la barra de cobre. Fuente: Elaboración propia.*



*Fig. 20. Perforación de la barra para tapa de umbilical. Fuente: Elaboración propia.*

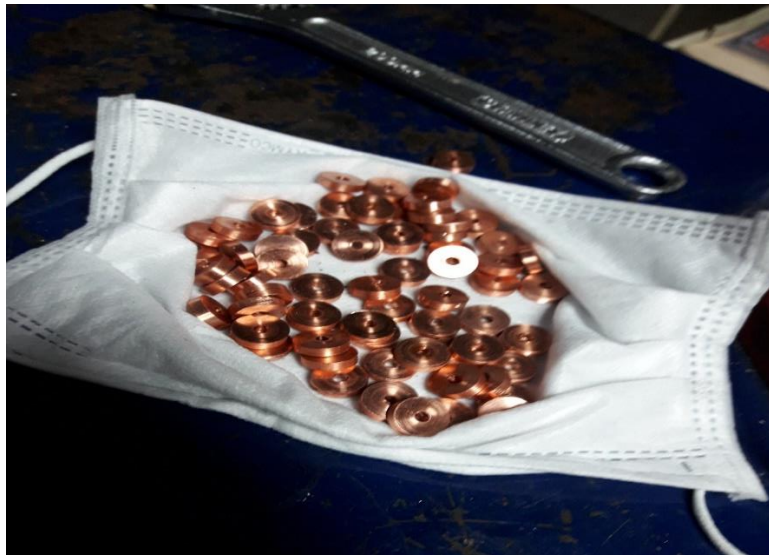


	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

*Fig. 21. Tronzado para obtener tapas. Fuente: Elaboración propia.*



*Fig. 22. Tapas para umbilical. Fuente: Elaboración propia.*




	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Fig. 23. Tapas para lado inferior del tubo. Fuente: Elaboración propia.



### 3.4. LIMPIEZA

Quando se obtuvieron los materiales cortados, el paso a seguir fue la limpieza. En primera instancia, el proceso consistió en lavar primero los tubos con jabón desengrasante Extran (Fig. 24) y agua para eliminar grasas indebidas, luego, se les hizo un lavado con acetona con el fin de remover sedimentos de jabón y de cualquier grasa remanente que haya quedado y consiguiente a esto, se volvieron a enjuagar con agua destilada. Finalmente, se procedió a limpiar el tubo y las esquinas del mismo con una solución de ácido sulfúrico al 10% con el fin de eliminar el óxido existente de la tubería y también para que la soldadura no fuera a quedar porosa, luego se volvió a jugar con agua destilada (Fig. 26).

Fig. 24. Limpieza de tubería. Fuente: Elaboración propia.




	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Fig. 25. Aplicación de Acetona. Fuente: Elaboración propia.




Fig. 26. Enjuague del ácido con agua desionizada. Fuente: Elaboración propia.



### 3.5. UNIÓN DE RACORES Y SOLDADURA DE LOS TUBOS

Los racores empleados para adecuarle a los termosifones fueron racores anillos de  $1/2 \times 1/2$  pulgada. Estos poseen un anillo en el interior con el fin de tener mayor aseguramiento. El acoplamiento de los racores a los tubos, se hizo con ayuda de 2 llaves boca fija (Fig. 27) facilitadas por el laboratorio, Una vez estaban asegurados, se les aplico

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

silicona roja de alta temperatura (Fig. 28) al lado que va a ser utilizado como evaporador para reforzar la unión y evitar que pasará gases de combustión a la zona de condensación por el racor.


*Fig. 27. Unión de racores con llave boca fija. Fuente: Elaboración propia.*



*Fig. 28. Racores acoplado y con silicona de alta temperatura. Fuente: Elaboración propia.*



Antes de soldar, se calentó el tubo para eliminar cualquier partícula de fluido que haya quedado de la etapa anterior. Teniendo todas las piezas limpias (tubos, tapas y umbilical), se pudo proceder a realizar la soldadura de los tubos. Para este trabajo, el método de


	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

sellamiento utilizado fue el de aporte de material para ser soldado (Fig. 29). El material elegido fue Harris de plata al 0%, el cual fue soldado con pipeta de Gas Mapp. El desarrollo de este proceso fue: con ayuda de una prensa, se agarró el tubo para tenerlo fijo y así adecuarle las tapas en las extremidades del mismo. Una vez obtenido lo anterior, se le aplicó fundente y se procedió a calentar la superficie donde se pensaba realizar la unión, cuando la zona alcanzó la temperatura de fusión del material, en ese instante, se le agregó el material de aporte sin dejar de suministrar la llama propinada por la pipeta de gas hasta que quedara una piscina de soldadura (Fig. 30). Este proceso se realizó para cada extremidad del tubo. Después de haber obtenido lo anterior, el proceso a seguir fue unir la reducción que servirá para ser acoplada a la bomba de vacío. Esta reducción es el umbilical y fue soldada de la misma manera, con material de aporte y pipeta de gas. Finalmente y luego de tener todos los tubos soldados (Fig. 31), se le hizo una limpieza superficial al tubo con una solución de ácido sulfúrico al 10% (Fig. 32) para retirar residuos de la soldadura y darle una mejor apariencia (Fig. 33).

*Fig. 29. Soldadura con Gas Mapp y Harris de plata. Fuente: Elaboración propia.*





	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

*Fig. 30. Piscina de soldadura. Fuente: Elaboración propia.*



*Fig. 31. Tubería soldada con tapas y umbilical. Fuente: Elaboración propia.*




 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Fig. 32. Limpieza con ácido para remover oxido proveniente de la soldadura. Fuente: Elaboración propia.




Fig. 33. Oxido y hollín removido. Fuente: Elaboración propia.



### 3.6. PROCESO DE VACÍO

Para el vacío de los tubos, se requirió de la implementación de un equipo especializado para este proceso. El laboratorio de Energía Térmica del ITM, cuenta con una bomba de alto vacío de marca VACUUBRAND (Fig. 34), la cual es capaz de obtener presiones muy

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

bajas como lo es  $10^{-6}$  mbar y es mostrada y graficada en el medidor de la bomba (Fig. 35). Este equipo posee 2 bombas acopladas entre sí para alcanzar la presión mencionada anteriormente. La primera, es una bomba de paletas que llega hasta la presión de  $10^{-4}$  mbar, y la segunda, es una bomba difusora, la cual es la encargada de generar el alto vacío a la magnitud de  $10^{-6}$  mbar.

Fig. 34. Bomba de vacío marca VACUUBRAND. Fuente: Elaboración propia.

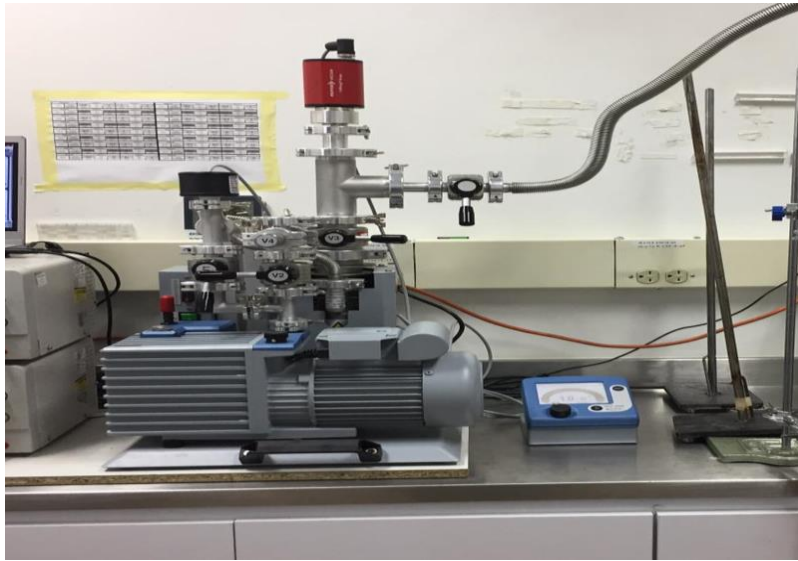
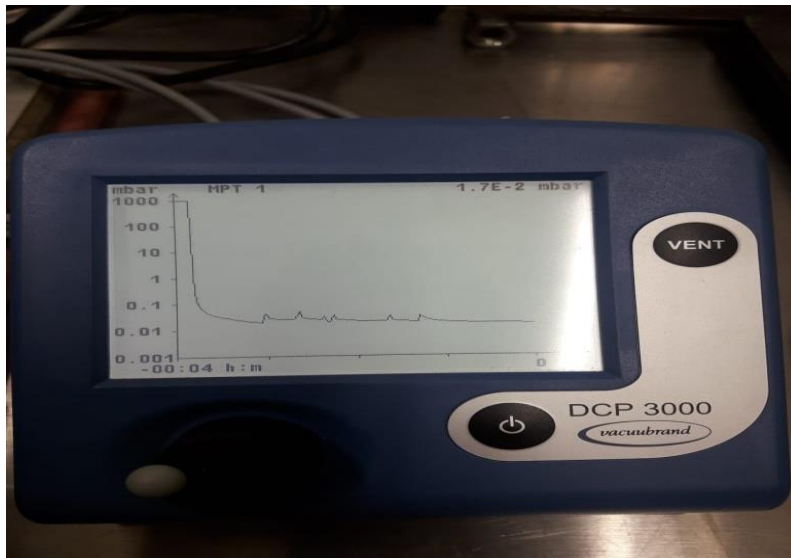



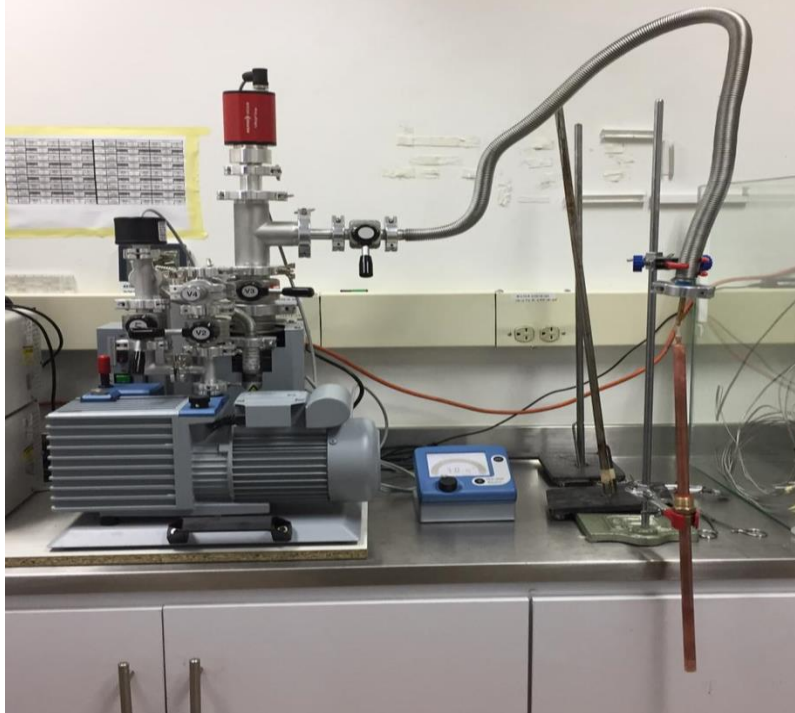
Fig. 35. Gráfica del vacío generado. Fuente: Elaboración propia.



	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

El termosifón, puede ser acoplado a la bomba de vacío, desde el momento que se pone en funcionamiento el equipo o al momento de que la bomba alcanza la presión descrita, ya que esta, cuenta con una válvula de flujo a la salida que permanece cerrada. Para este proyecto, el tubo fue acoplado al equipo con una manguera llamada tygon cuando la bomba alcanzó el alto vacío (Fig. 36), en ese momento se procedió a abrir la válvula de flujo para succionar el aire que se encuentra en el interior del tubo. El tiempo que se demoró el vacío para cada tubo fue de 1 hora aproximadamente. Pasado este lapso de tiempo y teniendo la presión de vacío optima (Fig. 37) , con una pinza quirúrgica conocida como pinza mosquito, se estranguló la manguera para que no se perdiera el vacío logrado y así poder retirar el tubo para llevarlo a la siguiente etapa y acoplarle otro (Fig. 38). Cada que se retiraba un tubo, inmediatamente cerrábamos la válvula de flujo para que la bomba no presentara tanta pérdida de vacío.

*Fig. 36. Termosifón acoplado para proceso de vacío. Fuente: Elaboración propia.*




	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Fig. 37. Vacío obtenido en los termosifones. Fuente: Elaboración propia.




Fig. 38. Pinza quirúrgica para evitar que se pierda el vacío. Fuente: Elaboración propia.



### 3.7. RELACIÓN DE LLENADO

Antes de definir la relación de llenado, se realizaron algunas pruebas en un termosifón de cobre de 450 mm de longitud y  $\frac{3}{8}$  de pulgada de diámetro nominal (Fig. 39), a diferentes tasas de llenado, desde 20% hasta 50% del volumen del evaporador y variando la potencia con una tasa de 10 W cada 25 minutos hasta 130 W; posteriormente en una hoja de

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

cálculo de Excel y con la ecuación (4), se calcularon las resistencias térmicas promedio después de la estabilización en cada potencia y se definió la tasa de llenado con menor valor en la resistencia térmica. Estos valores se graficaron en el programa OriginPro, el cual fue facilitado en el laboratorio.

Para el cálculo del volumen de llenado se utilizaron las ecuaciones (2)(3):

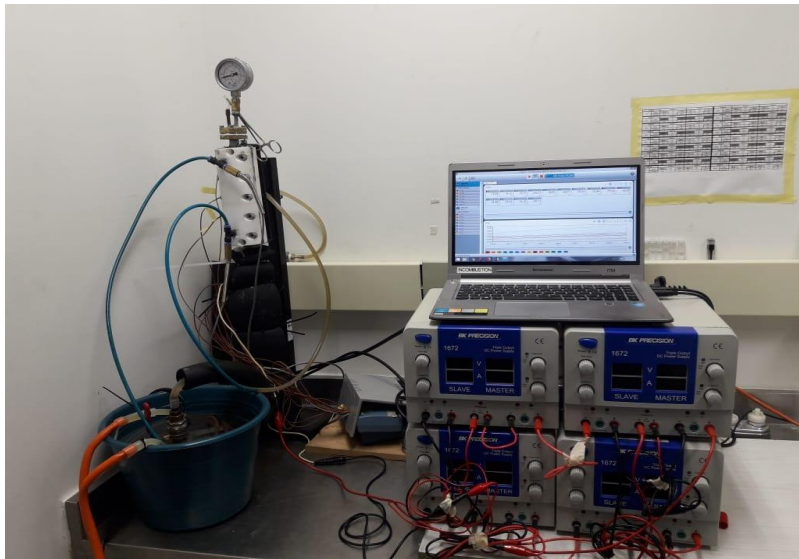
$$Volumen\ evaporador = \frac{\pi}{4} (D)^2 (L) \quad (2)$$

Dónde D: es el diámetro interno de la tubería y L: es la longitud de evaporador.

$$Volumen\ total = Volumen\ evaporador * Relación\ de\ llenado \quad (3)$$


$$Resistencia\ Térmica = \frac{\Delta Temperatura}{Potencia} \quad (4)$$

Fig. 39. Prueba de termosifón para relación de llenado. Fuente: Elaboración propia.



### 3.8. PREPARACIÓN DEL NANOFLUIDO

Mientras se le hacía vacío al tubo, al mismo tiempo se iba preparando el nanofluido, ya que la elaboración de este se demoraba 90 minutos aproximadamente. Por cada preparación que se hizo, obtuvimos fluido para cargar 4 termosifones (Fig. 44). Para la

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

preparación del nanofluido se utilizó agua desionizada como fluido base y como nanopartícula se utilizó nanotubos de carbono de pared múltiple con un tamaño por partícula aproximadamente de 41 nm de diámetro (Fig. 41). Esta partícula es una marca comercial y se consiguió en SSNano. El proceso de preparación consistió en:

- Se pesó la cantidad de nanopartículas y de agua según la concentración a preparar en una balanza de alta precisión de marca PRECISA que consta de 5 cifras decimales (Fig. 42).
- Luego, se mezcló surfactante SDBS en el fluido base con agitación magnética para mejorar la dispersión del nanotubo en fluido (Fig. 40).
- Finalmente, se hizo dispersión de las nanopartículas en el fluido aplicando ultrasonido con el fin de separar la unión de las partículas más pequeñas (Fig. 43).

Para calcular la cantidad de nanotubos que se iba a mezclar con el volumen obtenido se utilizó la ecuación (5):

$$\text{Peso nanopartícula} = \text{Peso fluido base} * \frac{0.1}{100} \quad (5)$$

Fig. 40. Agitación magnética. Fuente: Elaboración propia.




	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Fig. 41. Nanotubo de carbono comercial. Fuente: Elaboración propia.



Fig. 42. Nanotubo mezclado y pesado con fluido base. Fuente: Elaboración propia.






 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Fig. 43. *Dispersión con ultrasonido. Fuente: Elaboración propia.*

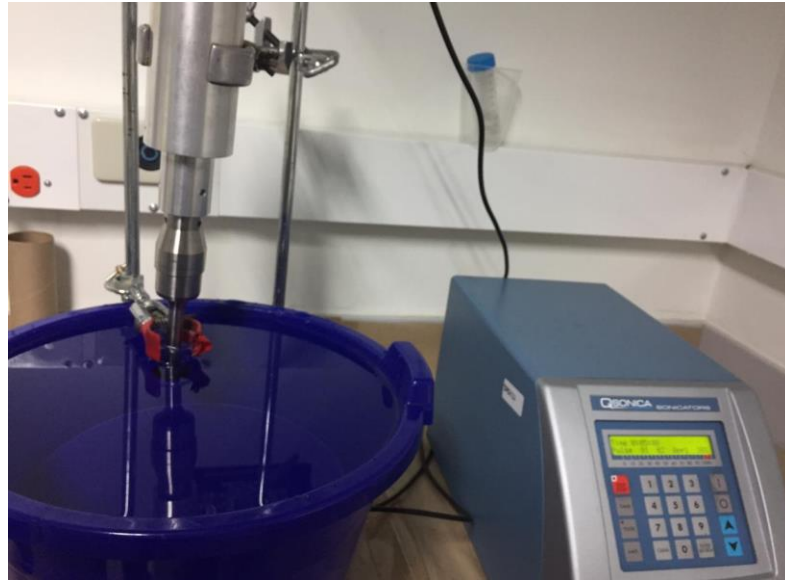



Fig. 44. *Nanofluido Obtenido. Fuente: Elaboración propia.*



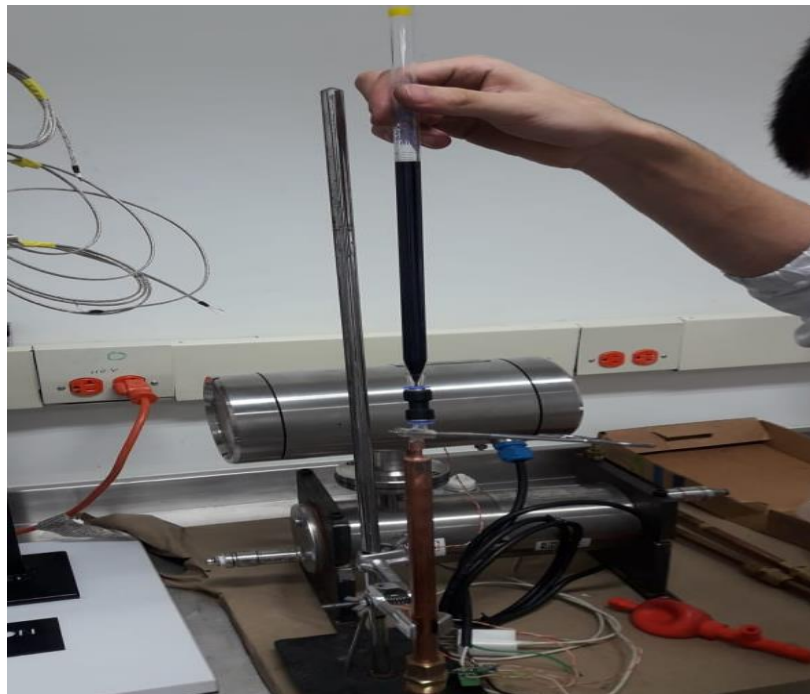
### 3.9. LLENADO DE LOS TUBOS

Cuando el tubo tenía el vacío deseado y el fluido preparado, se procedió a ubicarlo en el banco de llenado que tiene el laboratorio (Fig. 45), el cual consta de una bureta conectada en el parte inferior con los tubos de calor y en la superior con una bomba de vacío

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

mecánica. Antes de llenar el tubo, se hace la desaireación del fluido por activación de la bomba mecánica la cual retira el aire y los gases disueltos del nanofluido, una vez el líquido estaba desairado se procedió con la apertura cuidadosa de las pinzas quirúrgicas que sostiene la manguera para introducir en el tubo la cantidad de líquido deseado. Cuando el tubo estaba cargado, se procedió a cerrar la manguera con la pinza quirúrgica para llevar el tubo a realizar el sellamiento del umbilical con la ayuda de una herramienta tipo prensa que sirve para estrangular el tubo (Fig. 46). Se tuvo mucho cuidado para no dañar la reducción cortándola por lo que se le aplicó fuerza propia a la prensa hasta que se cerró el interior de la reducción, consiguiente a este, se le añadió una línea de soldadura para asegurar de que no hubiera escape y obtener el sellamiento total del tubo (Fig. 50).

*Fig. 45. Proceso de llenado con nanofluido. Fuente: Elaboración propia.*





	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Fig. 46. Estrangulación del umbilical después de llenado el termosifón. Fuente: Elaboración propia.

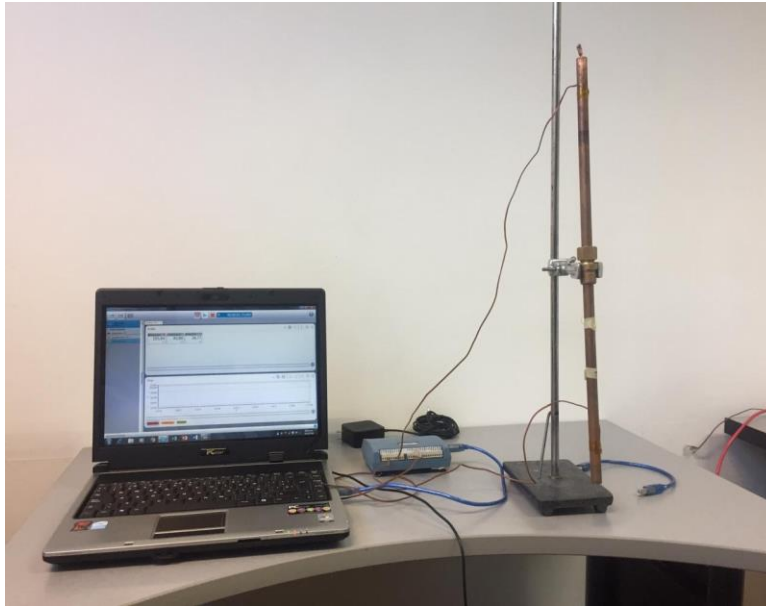


### 3.10. PRUEBAS EXPERIMENTALES

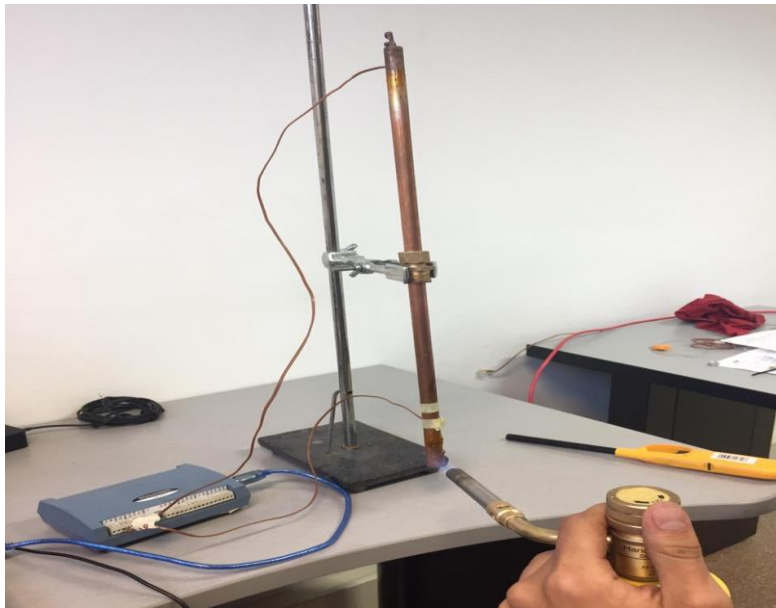
Después de que se le realizó el sellamiento a los tubos, procedimos a realizarle la prueba experimental a los termosifones para verificar el correcto funcionamiento y asegurar que de que no hubiera fugas. La prueba se desarrolló con ayuda del laboratorista y consistió en: se conectaron 2 termopares tipo T distribuidas en el termosifón (Fig. 47), una en el evaporador y la otra en el condensador con el fin de registrar el cambio de temperatura en el interior del tubo en un determinado tiempo. Conectados los termopares, se le suministró calor al termosifón en la zona de evaporación durante 1 minuto (Fig. 48), si la zona de condensación alcanza una temperatura de 90 °C o más en ese tiempo, quiere decir que el vacío permaneció, posee buen sellado y tiene un óptimo funcionamiento. De no alcanzar la temperatura mencionada, se deduce que al momento de calentar el termosifón, se están evacuando los gases del interior del tubo por lo que no genera buena transferencia de calor. Esta prueba se le realizó a cada uno de los termosifones cargados con nanofluido y adicionalmente se le realizó prueba a otros termosifones cargados con agua desionizada para comparar la transferencia de calor en el mismo intervalo de tiempo.


	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

*Fig. 47. Termopares conectados para prueba de calentamiento. Fuente: Elaboración propia.*



*Fig. 48. Calentamiento del termosifón. Fuente: Elaboración propia.*



	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

Siguiendo el paso a paso de la metodología de manufactura establecida para el presente trabajo, se lograron construir todos los termosifones requeridos para el intercambiador de calor, además, se obtuvieron las condiciones de trabajo en las que estarán sometidos, las cuales hacen referencia a: un intercambiador de calor que recibe los gases de combustión de un motor diésel, los cuales alcanzan la temperatura de 300 °C; por tal motivo se eligió trabajar con nanofluido como fluido de trabajo, debido a que estos son capaces de transportar de manera más eficiente de un lugar a otro la energía que recibe con respecto a otros fluidos comunes como lo es el agua a altas temperaturas.

La relación de llenado es uno de los parámetros fundamentales para que el termosifón tenga una adecuada transferencia de calor con baja resistencia térmica con la cantidad de fluido adecuado, además, teniendo una tasa de llenado óptima evita que se genere sobrepresión o por el contrario sequedad en el interior del tubo. En las pruebas realizadas en el laboratorio, no se logró llegar a 300 °C que es la temperatura a la cual estarán sometidos los termosifones, pero se obtuvo una temperatura máxima de 260 °C, lo que las hace válidas por tener un rango de temperatura cercano al deseado.

Se observó que a diferentes tasas de llenado en el termosifón de prueba, la resistencia térmica no varía significativamente tal como se muestra en la Fig. 49, por lo cual, basándonos de la literatura y siendo este uno de los valores más reportados para este parámetro, se decidió trabajar con una relación de llenado de 30% del volumen del evaporador lo que tuvo como resultado una cantidad de fluido por termosifón de 6.7 ml con una mezcla de 0.0067 g de nanotubos.


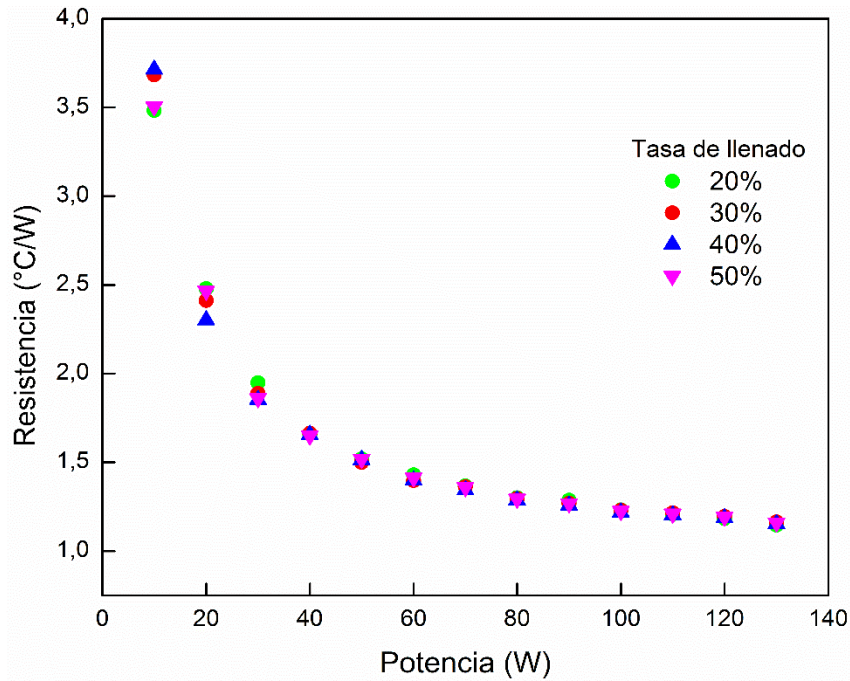

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Fig. 49. Gráfica relación de llenado. Fuente: Elaboración propia.



Como resultado general se encontró que para el correcto funcionamiento y buena transferencia de calor mediante los termosifones, estos deben asegurar que luego de realizarles el proceso de vacío y llenado quedarán totalmente herméticos, por lo que se debe tratar de implementar una metodología de soldadura adecuada para dicho proceso. El método empleado para el presente trabajo (Gas Mapp y material de aporte), es muy útil para construir una baja cantidad de termosifones, aunque se lograron construir 50 termosifones, se puede optar por utilizar otro método debido a que la posición en la cual hay que sostener la pipeta para suministrar la llama, puede llegar a ser muy incómoda, además, debe ser en un lugar donde no ingrese aire del medio externo y también se desperdicia mucho gas entre cambio de termosifón lo que puede salir muy costoso. Si se desea elaborar una serie a gran escala, se recomienda utilizar soldadura por oxi-acetileno, ya que esta puede alcanzar mayores temperaturas en menor tiempo y de forma más estable.

El sellado final del tubo (umbilical), aunque dio los resultados esperados los cuales eran evitar que quedaran fugas, no fue el más óptimo debido a que la herramienta utilizada para estrangular el umbilical absorbía calor que se le suministraba al mismo para poder ser soldado, lo que dificultaba que este elemento llegara a la temperatura de fusión

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22


fácilmente. Para mitigar la dificultad, fue necesario agregarle un punto de soldadura con el material de aporte para tratar de sellar la mayor parte posible e inmediatamente retirar la prensa para reforzar el sellado. Para evitar este problema se podría utilizar una herramienta de un material menos conductor para que no absorba gran parte del calor. En la Fig. 50 se muestra el umbilical sellado.

*Fig. 50. Umbilical sellado, termosifón hermético. Fuente: Elaboración propia.*



En el proceso de vacío, se logró obtener una presión de vacío por cada tubo en un rango de  $1.7 \times 10^{-5}$  mbar a  $2.8 \times 10^{-5}$  mbar. Aunque son buenos resultados, se esperaba obtener un vacío en la magnitud de  $10^{-6}$  mbar, puede ser que la bomba de vacío estaba presentando falencias en el ensamble, debido a que una pieza presentó fisuras en el acople al equipo de alto vacío y posiblemente se ocasionaban caídas de presión. Otra posible causa pudo haber sido que la manguera tygon, la cual es el medio de acople del tubo a la bomba, no estaba sellando completamente en los extremos por lo que pudieron haber pérdidas en el vacío generado. Las dificultades descritas en este proceso, se pueden solucionar empleando un sellante de alto vacío en los extremos y verificando que el equipo se encuentre en perfecto estado para asegurar un óptimo funcionamiento.

En cuanto al método de llenado empleado, fue el más óptimo, ya que se pudo asegurar que mientras se fuera a cargar el fluido, no hubiera aire en el medio que pudiera ingresar

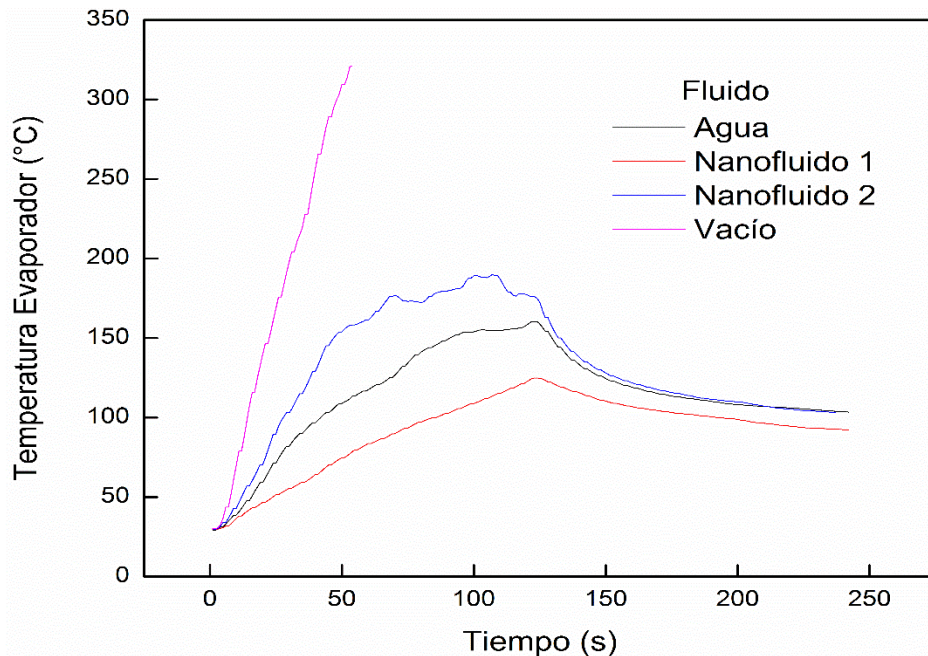
	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

al tubo. Esto se logró con ayuda de la bomba mecánica que retiraba el aire del fluido, además se logró que ingresará a los termosifones la misma cantidad de fluido requerido para así asegurar las mismas condiciones y que tuvieran el mismo rendimiento cada uno de ellos.

En la prueba de funcionamiento y hermeticidad que se le realizaron a los termosifones construidos, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Fig. 51 y Fig. 52 con los termosifones cargados con diferentes fluidos, además de cómo es su conducta cuando se encuentra únicamente el tubo en vacío. A continuación de describe de forma más detallada la gráfica:

- Nanofluido 1, hace referencia a un termosifón cargado con nanofluido a una presión de vacío de  $2.8 \times 10^{-5}$  mbar.
- Nanofluido 2, hace referencia a un termosifón cargado con nanofluido a una presión de vacío de  $1.9 \times 10^{-5}$  mbar.
- Agua. Termosifón cargado con agua desionizada a una presión de vacío de  $1.8 \times 10^{-5}$  mbar.
- Vacío. Termosifón sometido a vacío únicamente a una presión de  $2.6 \times 10^{-5}$  mbar.

Fig. 51. Gráfica de la temperatura del evaporador de la prueba experimental. Fuente: Elaboración propia.






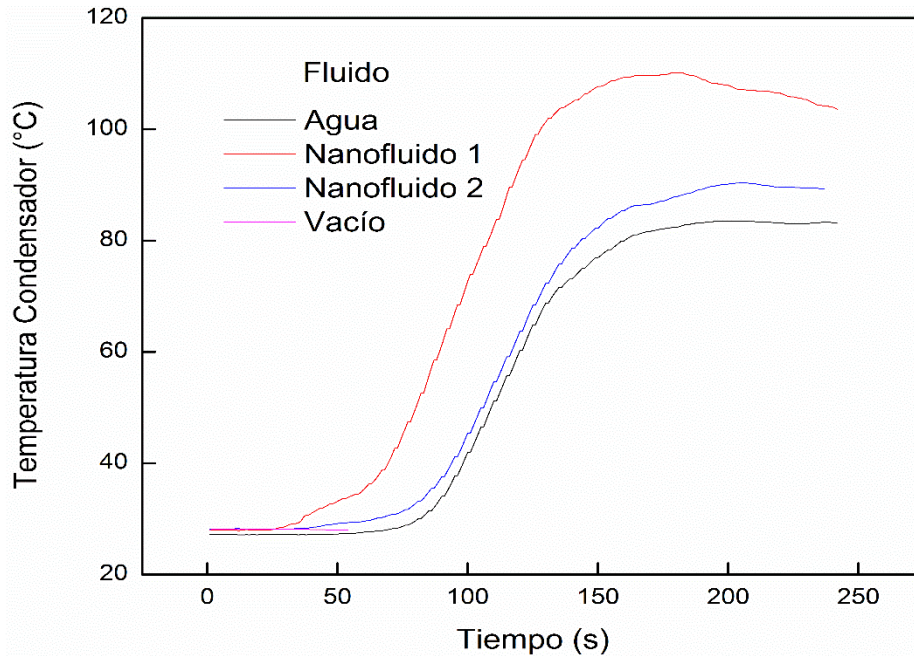

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Fig. 52. Grafica de la temperatura del condensador de la prueba experimental. Fuente: Elaboración propia.



Los termosifones cargados con nanofluido comparándolos con otros cargados con agua desionizada, fueron capaces de obtener un mayor incremento de temperatura en el condensador en menor tiempo y, transcurrido el minuto de prueba, alcanzaron una temperatura máxima de 110 °C debido a la vaporización de calor latente, en cambio los de agua desionizada, tuvieron una temperatura máxima 85 °C; el tubo en vacío tuvo un incremento de temperatura en el evaporador muy elevada debido a que no tiene ningún fluido para calentar, lo que hace más susceptible a que todo el calor lo absorba el material y así se dificulte la transferencia de calor al interior del sistema ya que la temperatura al condensador va a llegar por medio de conducción lo que la hace más demorada. Lo anterior quiere decir que un termosifón llenado con nanofluido es capaz de generar una mayor transferencia de calor de forma más rápida que con otro fluido lo que puede ser muy beneficioso a la hora de adecuarlos y ponerlos en funcionamiento en el intercambiador de calor. Sin embargo, hay que tener en cuenta que pueden haber variaciones en el rendimiento con el nanofluido debido a la presión de vacío que se logró en cada termosifón, entre menor vacío, mejor transferencia de calor por convección.


Como resultado final, se entregaron y se acoplaron 50 termosifones cargados con nanofluido en correcto funcionamiento al sistema de intercambio de calor que se encuentra en el Laboratorio de Energía Térmica del Instituto Tecnológico Metropolitano

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

(Fig. 53). Este intercambiador de calor, es el encargado de recibir los gases de combustión de un motor diésel y que mediante los dispositivos recuperadores de calor se evitará desperdiciar dichos gases. Con la implementación de los termosifones construidos, se abre la posibilidad para el desarrollo de futuros trabajos de grado, ya que por medio de estos, el laboratorio puede realizar otro tipo de proyectos como evaluaciones experimentales de rendimiento y eficiencia del intercambiador, como también, pueden implementar actividades de aprovechamiento de los gases de combustión dirigiéndolos a otros procesos.

*Fig. 53. Intercambiador de calor con termosifones acoplados. Fuente: Elaboración propia.*




	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO


---

- Siguiendo la metodología adaptada y descrita, se logró elaborar e implementar 50 termosifones bifásicos cargados con nanofluido para ser acoplados a un sistema de intercambio de calor para las evaluaciones experimentales que requieran en el laboratorio. Estos termosifones cuentan con un correcto funcionamiento el cual, luego de las pruebas experimentales quedó demostrado que si transportaban la energía recibida al condensador y que son capaces de generar mayor transferencia de calor.
- Tomando como apoyo artículos científicos y proyectos de grado que relacionen la construcción de termosifones, se logró determinar las condiciones requeridas que se deben tener al momento de la manufactura, de ahí se pudo emplear una limpieza adecuada para eliminar el óxido y hollín de la soldadura. Dicha limpieza se realizó remojando los tubos con ácido sulfúrico al 10% durante 3 minutos y posteriormente, removiéndolo con agua. Además, se obtuvo una metodología para la elaboración de estos dispositivos recuperadores de calor (termosifones) que estuviera al alcance de nuestras habilidades, conocimientos y recursos obtenidos.
- El método de soldadura por material de aporte, tuvo un buen resultado en cuanto a evitar que hubiera poros u orificios en la unión de las tapas y umbilical que dejaran escapar o filtrar gases u aire que estuvieran dentro del tubo o en el medio externo, debido a esto se pudo tener unas condiciones muy óptimas y unos valores bastante significativos en el proceso de vacío puesto que los termosifones lograron un vacío de  $1.7 \times 10^{-5}$  mbar a  $2.8 \times 10^{-5}$  mbar.
- Con ayuda del banco de llenado que se encuentra en el laboratorio, se pudo adaptar un sistema de llenado simple y ágil, ya que permitía por medio de la pipeta observar la cantidad de fluido que se le inyectaba al tubo asegurando así que todos estuvieran cargados con la misma cantidad de nanofluido para que tuvieran el mismo rendimiento térmico. Por otra parte, el sellado total del tubo, es decir del

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22


umbilical, demostró estar en óptimas condiciones y con cero filtraciones en las pruebas realizadas.

- Como recomendaciones, se sugiere al Laboratorio de Energía Térmica adaptar una metodología para verificar el estado de la soldadura realizando pruebas antes de comenzar el proceso de vacío y llenado, ya que estas pueden garantizar y dar un resultado más confiable y preciso en cuanto a infiltraciones. Una prueba de fugas puede ser conectar el tubo a un espectrómetro de masas y crear vacío dentro del tubo, luego esparcir helio sobre los puntos de la soldadura. Si el espectrómetro detecta helio, significa que hay infiltraciones y se debe proceder a reforzar las soldaduras.
- Se recomienda también utilizar soldadura de oxi-acetileno para realizar la sellada del umbilical y elaborar numerosos termosifones, si bien quedaron bien sellados, con este equipo se puede facilitar el proceso y el umbilical soldarlo en un solo paso, debido a que genera mayor temperatura y se puede unir más rápido el material de aporte con el cobre que con una pipeta de Gas Map. También, es necesario cambiar la herramienta de estrangulamiento por una que sea de otro material, preferiblemente que no sea conductor.
- Para elaborar las tapas de los termosifones, se sugiere utilizar un equipo que pueda realizar este proceso en serie para reducir tiempos de manufactura y desperdicio de material. La fresadora de control numérico (CNC), puede ser una opción para lograr lo anterior descrito de manera más efectiva.
- Para trabajos a futuro, se recomienda realizar pruebas de durabilidad de los termosifones y tener un seguimiento para saber cuál es su comportamiento con el tiempo y que efecto tiene el nanofluido con el fin de mejorar día a día esta tecnología hasta llegar al punto de poder comercializarlos y tener mayores garantías de rendimiento térmico, debido a que actualmente no son tan comunes estos dispositivos en la industria, además de poder apoyar las investigaciones con temas de nanofluidos.
- Realizar las pruebas del intercambiador de calor implementando nuevos nanofluidos en los termosifones que contengan diferentes formas de partícula, tamaños, concentración de partícula y tipo de surfactante para estudiar su

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

comportamiento y chequear cual puede mejorar el rendimiento térmico de los termosifones y también mejorar la eficiencia del intercambiador.


- Implementar estudios de proyectos para actividades que puedan verse beneficiadas por el aprovechamiento de los gases de combustión que genera el motor diésel. Algunas de las actividades que se pueden realizar o implementar es el secado de plantas aromáticas y calefacción en procesos textiles.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22


## REFERENCIAS

---

- Ahmadzadehtalatapeh, M., & Yau, Y. H. (2011). The application of heat pipe heat exchangers to improve the air quality and reduce the energy consumption of the air conditioning system in a hospital ward - A full year model simulation. *Energy and Buildings*, 43(9), 2344–2355. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.021>
- Cacua, K., Buitagro, R., Pabón, E., Herrera, B., & Rentería, J. L. (2017). Estudio de los factores que afectan la estabilidad de nanofluidos usando un diseño factorial fraccionado. *Revista Cintex22*, 22(1), 69–81.
- Cacua, K., Olmos-Villalba, L., Herrera, B., & Gallego, A. (2016). Experimental evaluation of a diesel-biogas dual fuel engine operated on micro-trigeneration system for power, drying and cooling. *Applied Thermal Engineering*, 100, 762–767. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.02.067>
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de calor y masa* (4° Edición). México D.F.: Mc Graw Hill.
- Chan, C. W., Siqueiros, E., Ling-Chin, J., Royapoor, M., & Roskilly, A. P. (2015). Heat utilisation technologies: A critical review of heat pipes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 615–627. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.028>
- Chen, L., Deng, B., & Zhang, X. (2013). Experimental investigation of CO<sub>2</sub> thermosyphon flow and heat transfer in the supercritical region. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 64, 202–211. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.03.077>
- Copete, L., & Herrera, B. (2011). *Tecnologías de recuperación de calor* (1° Edición). Medellín: Fondo Editorial ITM.
- Duque, Á. (2004). *Diseño y construcción de un prototipo de intercambiador de calor utilizando termosifones bifásicos*. EAFIT.
- Faghri, A. (1995). *Heat pipe and thermosyphon*. United States of America: Taylor & Francis.
- Giraldo, C., & Lopera, J. (1988). *Tubos de calor generalidades y perspectivas*. Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín.


	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- González, D. (2002). Intercambiadores de calor: tipos generales y aplicaciones. Retrieved from <https://es.slideshare.net/yumardiaz/intercambiadores-decalortiposgeneralesyaplicaciones>
- Grab, T., Gross, U., Franzke, U., & Buschmann, M. H. (2014). Operation performance of thermosyphons employing titania and gold nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 86, 352–364. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2014.06.019>
- He, T., Mei, C., & Longtin, J. P. (2017). Thermosyphon-assisted cooling system for refrigeration applications. *International Journal of Refrigeration*, 74, 163–174. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.10.012>
- Hossein, M., Mirlohi, A., Alhuyi, M., & Ghasempour, R. (2018). A review of thermal conductivity of various nanofluids. *Molecular Liquids*, 265, 181–188. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.05.124>
- Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. (Cuarta Edición). México D.F.: Prentice Hall.
- Jafari, D., Di Marco, P., Filippeschi, S., & Franco, A. (2017). An experimental investigation on the evaporation and condensation heat transfer of two-phase closed thermosyphons. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 88, 111–123. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.05.019>
- Jaramillo, O. A. (2007). Intercambiadores de Calor. *Centro de Investigación de Energía*, 22(1–2), 5–6. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(92\)90060-A](https://doi.org/10.1016/0378-3774(92)90060-A)
- Jouhara, H., Chauhan, A., Nannou, T., Almahmoud, S., Delpech, B., & Wrobel, L. C. (2017). Heat pipe based systems - Advances and applications. *Energy*, 128, 729–754. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.028>
- Kamyar, A., Ong, K. S., & Saidur, R. (2013). Effects of nanofluids on heat transfer characteristics of a two-phase closed thermosyphon. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 65, 610–618. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.06.046>
- Li, J., Zhang, J., Yang, J., & Xu, T. (1997). Analysis of heat transfer in the condenser of naphthalene thermosyphon at small inclination. In *10 th International Heat Pipe Conference*. Stuttgart.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Narcy, M., Lips, S., & Sartre, V. (2018). Experimental investigation of a confined flat two-phase thermosyphon for electronics cooling. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 96(January), 516–529. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.01.018>
- Orr, M. C. E. (2002). Heat pipes for heat recovery: the morr heat shuttle. *Morr Energy Ltd*, 58(673).
- Paris, L. S. (2007). Tubos de calor y termosifones bifásicos: alternativas para la conservación de energía. In *8° Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*. (p. 9). Cusco.
- Paris, L. S., & Mira, C. (2008). Construcción y Prueba de un Prototipo de tubo de calor de bajo costo para la aplicación en un colector de energía solar. Tegucigalpa, Honduras: LACCEI'2008.
- Peterson, G. P. (1994). *An introduction to heat pipes: modeling, testing, and applications*. United States of America: John Wiley & Sons.
- Rajesh, S. P. (2015). Study of conventional and modern heat pipe. Retrieved from <https://www.slideshare.net/shefinmustafa/study-of-heat-pipe>
- Ramezanizadeh, M., Nazari, M. A., Ahmadi, M. H., & Açikkalp, E. (2018). Application of nanofluids in thermosyphons: A review. *Journal of Molecular Liquids*, 272, 395–402. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.09.101>
- Reay, D. A., Kew, P. A., & McGlen, R. J. (2014). *Heat Pipes. Theory, Design and Applications*. (Butterworth-Heinemann, Ed.) (Sixth Edit). New York: Elsevier.
- Reay, D., & Kew, P. (2006). *Heat Pipes. Theory, Design and Applications*. (Butterworth-Heinemann, Ed.) (Fifth Edit). New York: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098266-3.00012-1>
- Shabgard, H., Allen, M. J., Sharifi, N., Benn, S. P., Faghri, A., & Bergman, T. L. (2015). Heat pipe heat exchangers and heat sinks: Opportunities, challenges, applications, analysis, and state of the art. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 89, 138–158. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.05.020>
- Shah, R. K., & Sekulic, D. P. (2003). *Fundamentals of heat exchanger design*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Sharifpur, M., Tshimanga, N., Meyer, J. P., & Manca, O. (2017). Experimental investigation and model development for thermal conductivity of  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-glycerol nanofluids.





	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22


*International Communications in Heat and Mass Transfer.*, 85(April), 12–22.  
<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2017.04.001>

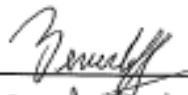
Silverstein, C. (1992). *Desing and technology of heat pipes for cooling and heat exchange*. Washington DC: Taylor & Francis.

Weisend, J. (2012). Thermosyphons. Retrieved from  
[https://cryogenicsociety.org/resources/defining\\_cryogenics/thermosyphons/](https://cryogenicsociety.org/resources/defining_cryogenics/thermosyphons/)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

FIRMA ESTUDIANTES   
Nicolás López G.

FIRMA ASESOR   
Entrega de Trabajo de Grado

FECHA ENTREGA: 19-10-2018

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD \_\_\_\_\_

RECHAZADO\_\_      ACEPTADO\_\_      ACEPTADO CON  
 MODIFICACIONES \_\_\_\_\_

ACTA NO. \_\_\_\_\_

FECHA ENTREGA: \_\_\_\_\_

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD \_\_\_\_\_

ACTA NO. \_\_\_\_\_

FECHA ENTREGA: \_\_\_\_\_