

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

Construcción de un termosifón a escala de laboratorio

Carlos Alberto Berrio Betancur

Jorge Mario Berrio Betancur

Gabriel Darío Hernández Luján

Ingeniería Mecatrónica y Electromecánica

Directores del trabajo de grado:

Karen Paola Cagua Madero

Anderson Gallego Montoya

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

20 de enero de 2019

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

RESUMEN

Una manera eficiente y económica de recuperar energía térmica de procesos industriales es empleando intercambiadores de calor con cambio de fase como los termosifones. Estos dispositivos consisten en un contenedor sellado con un fluido de trabajo en su interior. Cuentan con una zona de evaporación en donde el fluido recibe la energía para que se produzca el cambio de fase y el vapor producido lleva la energía a una zona de condensación en donde la entrega, retornando como condensado para iniciar el ciclo nuevamente. Una de sus principales características es la alta conductividad térmica equivalente, permitiéndoles aprovechar la energía de cualquier tipo de fuente externa de alta o baja temperatura.

A nivel global se han hecho numerosas investigaciones en la construcción y funcionamiento de los termosifones, principalmente los materiales de construcción, relación de aspecto, diferentes fluidos de trabajo, relaciones de llenado y potencia, buscando mejorar la eficiencia de estos dispositivos.

En este trabajo se construyó un termosifón a escala laboratorio, para su uso en el laboratorio de ciencias térmicas del Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín ITM. El dispositivo construido cuenta con una zona de evaporación con resistencia eléctrica, una zona de condensación con una chaqueta para la recirculación de agua y una zona adiabática completamente aislada, adicionalmente el dispositivo permite la variación del ángulo de inclinación para evaluar su efecto en el rendimiento. Su funcionamiento fue validado con agua como fluido de trabajo y con una relación de llenado del 30%. La potencia entregada en el evaporador fue variada entre 10 y 100 W y se utilizaron dos ángulos de inclinación de 90° y 45°. La resistencia térmica del termosifón fue evaluada midiendo las temperaturas a lo largo del termosifón. La mayor eficiencia se alcanzó a una potencia de 100 W y un ángulo de inclinación de 45°.

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

Palabras clave: Termosifón, ángulo de inclinación, resistencia térmica, transferencia de calor, recuperación de calores residuales.

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

RECONOCIMIENTOS

En primer lugar, agradecemos al Instituto Tecnológico metropolitano por habernos brindado las herramientas académicas para nuestro desarrollo personal y laboral, a nuestras familias por su apoyo y Dios en su infinita bondad.

A nuestros asesores Karen Cagua y Anderson Gallego por sus aportes, sugerencias y apoyo en el trabajo tanto físico como escrito, en la puesta a punto del sistema y en el desarrollo de las pruebas.

Al laboratorio de ciencias térmicas sede Fraternidad y a su personal por su acompañamiento y préstamo de equipos y el espacio para el montaje, pruebas y puesta a punto del termosifón.

Al taller de máquinas herramientas sede Robledo y a su personal por prestarnos el espacio, la fresadora y el torno equipos requeridos para fabricar las piezas además de su asesoría en el diseño.

Al taller de soldadura sede Robledo y a su personal por facilitarnos su espacio y los equipos de soldadura autógena, MIG, eléctrica y su asesoría en la aplicación de soldadura de cobre necesaria para la unión de las piezas.

Agradecemos a la organización de la semana de la Ingeniería ITM 2018 por permitirnos presentar en el marco de este evento nuestro trabajo de grado donde ocupamos el segundo puesto.

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

ACRÓNIMOS

ITM: Instituto Tecnológico Metropolitano

Q : Calor sensible

m : Masa

c_p : Calor específico de la sustancia a presión constante

ΔT : Diferencial de temperatura

$h_{fg}(T_s)$: calor latente de vaporización del fluido a la temperatura de saturación.

P : es potencia (W)

V : Voltaje (V)

I : corriente eléctrica (A)

inHg: Pulgada de Mercurio

NPT: Rosca Americana Cónica para Tubos

PVC: Policloruro de vinilo

R : Es la resistencia térmica

T_e : Promedio de temperaturas en el evaporador (K)

T_c : Promedio de temperaturas en el condensador (K)

η : Es la eficiencia térmica

Q_e : la potencia de entrada en el evaporador (W)

Q_s : Potencia retirada o calor recuperador en el condensador (W)

C_p : Es el calor específico del agua de refrigeración a temperatura promedio (J/kg °C)

\dot{m} : Flujo másico de agua de refrigeración dado por el Coriolis (kg/s)

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

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	
	OBJETIVOS	
	Objetivo general	
	Objetivos específicos	
2.	MARCO TEÓRICO.....	
3.	METODOLOGÍA	
3.1	<i>Construcción de termosifón</i>	
3.2	<i>Evaluación experimental del termosifón</i>	
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
4.1	<i>Construcción de termosifón a escala laboratorio</i>	
4.2	<i>Resultados de la evaluación experimental del termosifón</i>	
5.	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	
•	Anexos.....	
	Anexo 1.....	
	Anexo 2.....	
	REFERENCIAS	

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

Lista de figuras

Figura 1. Estados de la Materia.....	12
Figura 2. Gráfico que ilustra los diferentes estados físicos y termodinámicos del agua, además, el punto triple y el crítico	15
Figura 3. Partes principales de un tubo de calor.....	17
Figura 4. a) Componentes básicos de un tubo de calor. b) Elementos de un termosifón.....	19
Figura 5. Ciclo TS termodinámico de un termosifón en un diagrama T vs S (entropía).....	20
Figura 6. Termosifón de bucle (loop): otro tipo práctico de termosifón.	20
Figura 7. a) Diagrama esquemático del aparato experimental (b) ubicaciones de los termopares (Gedik, 2016)	24
Figura 8. Diseño de termosifón de cobre a escala laboratorio.	25
Figura 9. Ensamblaje y lista de piezas.	27
Figura 10. Tornillo fijo de la parte superior.....	27
Figura 11. Tuerca fija de la parte superior.	28
Figura 12. Tornillo fijo de la parte inferior.	28
Figura 13. Tornillo fijo hembra de la parte inferior.....	29
Figura 14. Tornillo deslizante de la parte inferior.	29
Figura 15. Componentes básicos del tubo de calor construido.....	36
Figura 16. Termosifón de cobre y chaqueta de refrigeración.....	37
Figura 17. Mano vacuómetro con un rango de medición desde -30 inHg hasta 60 PSI	37
Figura 18. Montaje experimental de termosifón completo con instrumentación	38
Figura 19. Resultados de eficiencia del termosifón posicionado a 45° y a 90°	39
Figura 20. Resultados de resistencia térmica del termosifón posicionado a 45° y a 90°	40
Figura 21. Cambio del perfil de temperatura del termosifón con la variación de potencia a (A) 45° y a (B) 90°	41

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

1. INTRODUCCIÓN

El termosifón es una tecnología innovadora con alta eficiencia energética, es objeto de investigaciones y desarrollos a nivel mundial, sus múltiples aplicaciones promueven la investigación en este tipo de dispositivos. El Instituto Tecnológico Metropolitano no es ajeno a esta realidad, y se hace necesario el uso o la implementación de prototipos de termosifones a escala laboratorio, que sirvan para identificar brechas y barreras tecnológicas para su uso en intercambiadores de calor a escala industrial en Colombia.

Los termosifones son dispositivos pasivos, pues no consumen energía para su funcionamiento, tienen alta eficiencia, estructura simple, confiabilidad y bajo costo, son ampliamente utilizados en sistemas de recuperación de calor, incluyendo celdas solares fotovoltaicas, hornos de cocción, equipos electrónicos, intercambiadores de calor y sistemas de enfriamiento electrónicos (Jafari, Franco, Filippeschi, & Di Marco, 2016).

El rendimiento de transferencia de calor de un termosifón se ve significativamente afectado por la geometría, el ángulo de inclinación, la temperatura de vapor, la relación de llenado y las propiedades termo físicas del fluido de trabajo. Entre ellos, la relación de llenado que se define como la relación de volumen del líquido al volumen del evaporador (Jafari et al., 2016). Además, la cantidad de fluido de trabajo utilizado se estima como el volumen mínimo que permite una operación de termosifón estable. Se han informado muchas investigaciones experimentales sobre el rango apropiado de proporción de llenado. Por su parte, Jiao, et al., (2008), sugirió como valor óptimo de llenado el 20% del volumen del evaporador.

El comportamiento térmico de los termosifones implica el uso de **unidades de longitud bastante grande se ha reportado ampliamente** en la literatura científica (Casarosa,

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

Latrofa, & Shelginski, 1983; Monazami & Haj-Hariri, 2012; Vanyasree & Ramana, 2017). Sin embargo, en algunas aplicaciones como la recuperación de calor automotriz y de aplicaciones electrónicas, existen severas restricciones de peso y tamaño que requieren el despliegue de termosifones más pequeños y más cortos. Un análisis experimental específico del termosifón generalmente es necesario para una mejor comprensión de sus características operativas (Buschmann, 2013; Shabgard, Xiao, Faghri, Gupta, & Weissman, 2014).

El desarrollo de nuevos materiales para la fabricación de termosifones que pudieran remplazar el acero al carbono, **acero inoxidable, aluminio y cobre. Que han sido** los metales tradicionales en la fabricación de cubiertas de termosifón o tubos de calor, son los compuestos poliméricos recientemente diseñados que tienen una alta conductividad térmica efectiva (5-15 W/m °C) y pueden reemplazar exitosamente los metales dada su resistencia y son insensibles a la acción destructiva de la humedad. Su mayor grado de flexibilidad los hacen una alternativa para aplicaciones donde se requieran como recuperadores de calor o para el manejo térmico en casa u edificios, ubicándolos debajo de suelos y losas (Vasiliev, Grakovich, Rabetsky, Vassiliev, & Zhuravlyov, 2017).

Actualmente, se utilizan en la fabricación de termosifones de diferentes materiales y con geometrías planas, para aprovechar el calor de fuentes de energía alternativas (radiación solar), la recuperación de energía geotérmica y la mejora de su potencial con la ayuda de bombas de calor. Y que podría ser aplicado en la calefacción de edificios y almacenes (Vasiliev et al., 2017). El fluido de trabajo juega un papel importante en el rendimiento de los termosifones. Al elegir el fluido, se deben tener en cuenta algunas características tales como propiedades de ebullición, presión de vapor, conductividad térmica y tensión superficial. Un fluido con propiedades termo físicas mejoradas podría conducir a mejoras en el rendimiento de un termosifón (Kamyar, Ong, & Saidur, 2013).

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

Los nanofluidos se han utilizado como fluidos de trabajo alternativos con **le objetivo** de disminuir la resistencia térmica en el funcionamiento de los termosifones y en los últimos años ha sido objeto de numerosas **investigaciones**En la mayoría de reportes se encontró que la resistencia térmica de los tubos de calor disminuyó comparada con su funcionamiento con agua. La adición de partículas tiene un efecto significativo en el mecanismo de ebullición en los tubos de calor. Entre las nanopartículas adicionadas al agua como fluido de trabajo se encuentran los óxidos de aluminio, óxidos de hierro y otros óxidos metálicos(Kamyar et al., 2013).

Las innovaciones en el desarrollo de los termosifones van desde la experimentación con diferentes materiales de fabricación, múltiples aplicaciones en el desarrollo de energías alternativas, aplicaciones en diferentes campos, y mejoramiento del rendimiento del termosifón con fluidos alternativos a los convencionales con mayor conductividad térmica (Kamyar et al., 2013).

El objeto de este trabajo fue fabricar un Termosifón en cobre como prototipo experimental para trabajos de investigación de estudiantes, profesores e investigadores del ITM. Además, después de la construcción del termosifón, se realizaron pruebas experimentales para validar su funcionamiento, variando la potencia de trabajo y el ángulo de inclinación

OBJETIVOS

Objetivo general

Construir un Termosifón de cobre a escala laboratorio, para pruebas de eficiencia, resistencia térmica y cambio en perfil de temperatura con la variación de potencia y el cambio del ángulo de inclinación

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

Objetivos específicos

- Construir un Termosifón a escala de laboratorio que permita variar su ángulo de inclinación.
- Evaluar experimentalmente el funcionamiento del termosifón con agua desionizada
- Determinar la eficiencia, la resistencia térmica y el cambio en el perfil de temperatura con la variación de potencia y el cambio del ángulo de inclinación.

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

2. MARCO TEÓRICO

En general la materia presenta tres estados físicos o fases (sólido, líquido y gaseoso), ella puede pasar de una fase a otra, agregándole o extrayéndole energía, ver Figura 1. En algunos procesos industriales cierta energía es liberada o desperdiciada al medio ambiente, ocasionando un aumento en la temperatura, esta energía podría ser aprovechada y reutilizada en un proceso donde se necesite (Segovia, 2013).

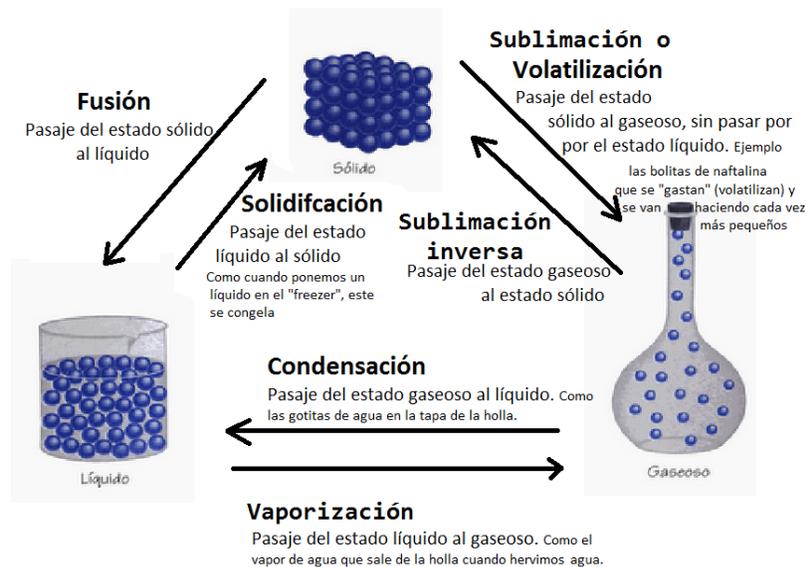


Figura 1. Estados de la Materia. Fuente: (Segovia, 2013)

Para una sustancia, como el agua en estado líquido, estando a una temperatura y presión menor a las de saturación (100°C y 1 atm) es muy factible que la sustancia empiece a absorber calor y con ello cambie su temperatura. Si a 25°C se le suministra calor al agua, la energía suministrada se denomina calor sensible, siempre y cuando no genere un cambio de fase, solo incrementa su temperatura pasando por ejemplo a 60 °C. De otra manera, el calor suministrado a la temperatura de ebullición de 100 °C (1 atm) no se emplea en aumentar dicha temperatura. Se usa en cambiar el estado de líquido a gas y se denomina

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

calor latente. Y aunque se aumente el calor de entrada del sistema de calentamiento, este permanecerá a la misma temperatura, siempre y cuando exista fluido líquido (Rathod & Banerjee, 2013). La ecuación 1, sirve para calcular el calor sensible.

$$Q = mc_p\Delta T(kJ) \quad (1)$$

Donde

Q =Calor sensible en kJ

m =Masa en kg

c_p =Calor específico de la sustancia a presión constante, se haya en tablas en $\frac{kJ}{kg.K}$

ΔT =Diferencial de temperatura en K

Existen tablas termodinámicas para varias temperaturas y presiones, donde se especifican propiedades como el calor latente o entalpía de vaporización, estas se especifican por kilogramo de sustancia (Yunus A. Cengel & Boles, 2009). La presión y la temperatura donde ocurre el cambio o paso de líquido a vapor se llaman presión de saturación y temperatura de saturación. Teniendo un valor de presión, existirá un valor único de temperatura que haga que la sustancia cambie de estado. El calor latente o entalpía de vaporización del agua a 100 °C y 1 atm es 2257 kJ/kg. Lo que quiere decir, que si está a una presión de 1 atm y a 100 °C, es necesario adicionar 2257 kJ a cada kilogramo de agua líquida para poder vaporizarlo (Rathod & Banerjee, 2013).

Se debe señalar, además, que sólo existe ebullición en el valor de temperatura y presión exacto para cada sustancia. Estas son una presión de saturación y una temperatura de saturación. Si se disminuye la presión de saturación, la temperatura de saturación también lo hará y si se incrementa la presión, la temperatura aumentará. Así, por ejemplo, a una presión de 70,1 kPa (~0,7 atm) el agua líquida pasa también a vapor, pero a 90°C; mientras que a 198,5 kPa (~2 atm) la temperatura es de 120°C (Laplace, 2018). Si se logra una presión de alto vacío el agua hervirá a temperaturas tan bajas como 0.01°C y para

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

cada pareja de presión y temperatura existirá un calor latente diferente o entalpía de vaporización (Segovia, 2013).

El paso de líquido a gas y de este a líquido nuevamente, es la base de numerosos procesos termodinámicos como la refrigeración, los tubos de calor (heat pipe) y los termosifones bifásicos (TSB). La diferencia básica entre un tubo de calor y un termosifón radica en que el segundo no requiere material capilar para el retorno del fluido líquido desde el condensador al evaporador y el retorno se hace por la acción de la fuerza de la gravedad (Segovia, 2013).

Otros parámetros importantes a tener en cuenta en estos cambios de fase son los puntos triple y crítico. No se debe permitir que el fluido de trabajo esté bajo el punto triple o sobre el punto crítico. Debe quedar situado en la región de paso de líquido a gas (región verde Figura 2, flecha azul). El punto triple de un fluido es aquel donde está a la vez el estado sólido, líquido y gaseoso en equilibrio (Laplace, 2018).

Así, por ejemplo, el punto triple del agua ocurre a $0,01^{\circ}\text{C}$ ($273,16\text{K}$) y a una presión de $0,006$ atmósferas (círculo rojo abajo en Figura 2). Se da a casi 0°C y a una presión mucho menor que la normal atmosférica (165 veces menor). El punto crítico es aquella condición de temperatura y presión en donde el agua pasa de líquida a vapor (gas) directamente sin formar mezcla de vapor y gas (374°C , 218 atm), a diferencia de como lo hace normalmente a otras presiones y temperaturas. Es de anotar, que el fluido resultante presenta propiedades de líquido y gas simultáneamente, y se define como un fluido supercrítico, Figura 2.

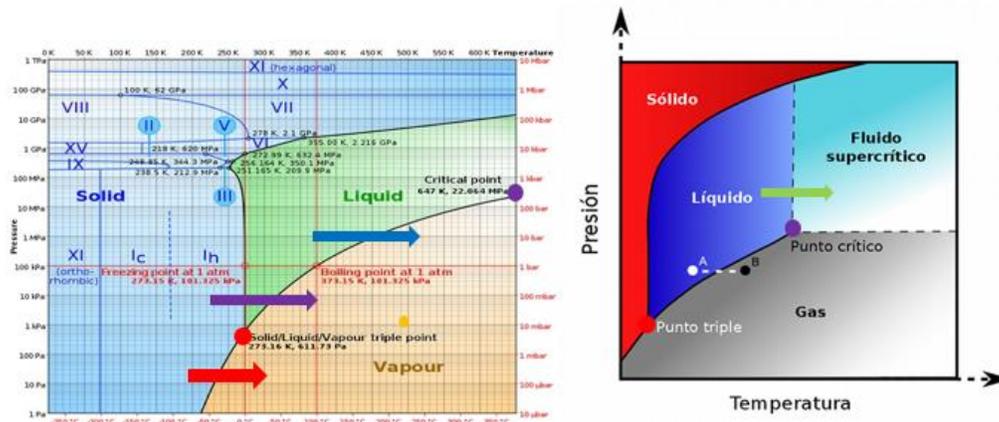


Figura 2. Gráfico que ilustra los diferentes estados físicos y termodinámicos del agua, además, el punto triple y el crítico. Fuente: (Alien, 2012)

En la Figura 2, se aprecia que por debajo de 0,6117 kPa (0,006 atm) se puede saltar a vapor sin pasar por líquido (flecha roja). En cambio, a presiones superiores a 0,6117 kPa necesariamente se pasa de sólido a líquido y a gas (flecha morada). A presiones y temperaturas superiores al punto crítico se forma un fluido raro con propiedades de líquido y gas (flecha verde) (Alien, 2012).

Es importante considerar, que algunos materiales como el papel secante, una mecha de algodón o un material poroso o capilar, absorben y des absorben líquidos de forma interesante bajo ciertas condiciones y los transportan determinadas distancias, sin importar la posición o inclinación. Si se tiene un trozo de tal material poroso seco y se pone en contacto con un líquido, este es succionado o absorbido por los poros o capilares del material debido a la interacción superficial del líquido con las paredes capilares internas de diámetro muy pequeño del material poroso (Alien, 2012; Ochterbeck, 2003).

A menor diámetro del capilar, más poder de succión y de elevación del líquido. Es el caso, por ejemplo, de una botella con agua hasta la mitad, a la cual se le agrega un capilar de algodón hasta el fondo y se hace que dicho capilar salga al exterior hasta el piso. Al poco

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

tiempo se nota que el agua comienza a humedecer el capilar y luego el piso. Aun con una solución de sal en agua, pasa el mismo fenómeno y la solución va saliendo hasta el exterior y al secarse el agua, la sal va quedando afuera (Ochterbeck, 2003).

Un tubo de diámetro pequeño de vidrio de por ejemplo un diámetro de 0,1 milímetro puede elevar una columna de agua hasta 30 centímetros de altura, mientras que un capilar de 1 micra lo hace hasta una altura entre 14 y 15 metros (Ochterbeck, 2003). Además de la tensión e interacción superficial, existen otros factores que intervienen en el proceso como el peso del líquido al interior y la interacción electrostática de los llamados puentes de hidrógeno del agua, los cuales son enlaces secundarios entre el hidrógeno y las moléculas descompensadas eléctricamente de la superficie del vidrio u otro material. Como el peso de una columna líquida dentro de un tubo es proporcional al cuadrado del diámetro, a menor diámetro menor peso (Tanvir & Qiao, 2012).

Claramente las interacciones entre líquidos y los materiales porosos en un tubo capilar, presentan un efecto de succión natural o espontáneo, una especie de bombeo sin fuente externa de energía para hacer que el líquido ingrese a través de las paredes capilares. Obviamente el material poroso solo absorbe determinada cantidad de líquido; se presenta entonces una saturación. Si de alguna manera se crea un mecanismo que permita el retiro del líquido al interior del material poroso, este volverá succionar y el proceso se vuelve cíclico (Faghri, 2014).

Si los principios anteriores se aplican en un tubo cerrado hermético apropiado, con un material poroso al interior y con un líquido y se permite que de alguna forma entre y salda calor, se tendrá un tubo de calor (Faghri, 2014).

Un tubo hermético de cobre o de otro metal conveniente con vacío al interior (que genera menor resistencia térmica) y con un líquido como agua o alcohol, si recibe calor por el

extremo izquierdo, el calor es absorbido por el líquido y al hacerlo se energiza y vaporiza (hierve) aumentando la presión local con poco requerimiento de calor. Entonces fluye por el centro (zona adiabática o aislada) llega al extremo derecho frío donde sufre una transferencia de calor al exterior, por tanto, el vapor disminuye su temperatura y presión, se condensa y es absorbido por el capilar, emigra al extremo izquierdo y el proceso se repite cíclicamente (Figura 3). Al condensarse el vapor en el extremo derecho, libera calor, este es liberado al exterior (Acrolab, 2018).

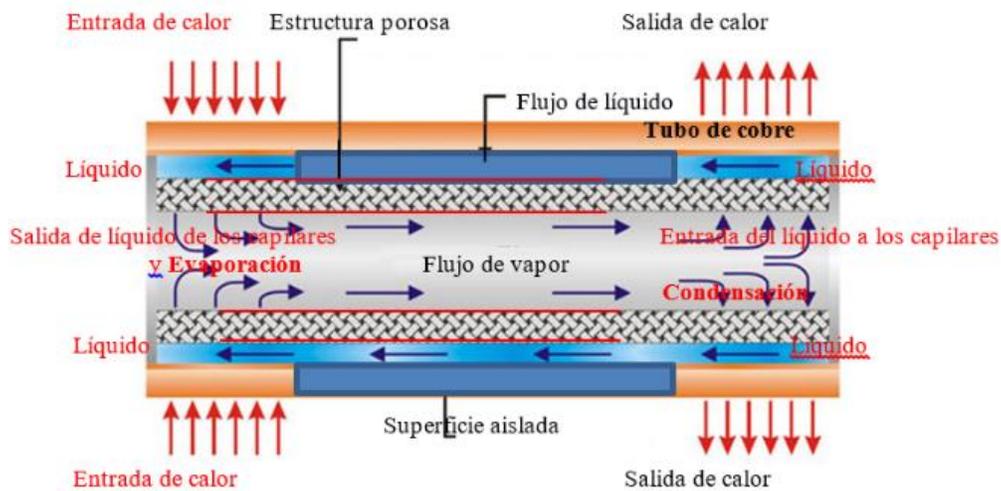


Figura 3. Partes principales de un tubo de calor: el evaporador (temperatura alta), la zona adiabática o aislada (temperatura media) o de no transferencia de calor y el condensador (temperatura baja). Modificado. Fuente: (Acrolab, 2018).

El flujo de masa y calor por el centro es favorecido por la diferencia de presión y temperatura entre los dos extremos del tubo. Básicamente, el tubo de calor en la parte central transporta continuamente el calor latente de vaporización desde el extremo del evaporador hasta el extremo contrario del condensador donde el calor de condensaciones liberado al exterior (Reay & Harvey, 2012). A su vez, el flujo de calor por el medio poroso es favorecido por la capacidad del material capilar de absorber el fluido y por el vacío creado. Esto se logra siempre y cuando existan las condiciones que garanticen la diferencia de presión suficiente entre los extremos del medio poroso para bombear el

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

fluido desde la zona derecha hasta la izquierda. Cuando el tubo de calor no está en funcionamiento, el fluido dentro del medio poroso permanece en fase líquida (Reay & Harvey, 2012).

El tubo de calor y los TSB son una fuente de energía limpia y económica que aprovecha el calor solar o el residual de desecho de algún proceso y lo transfiere adecuadamente una distancia dada para alguna aplicación conveniente. Los tubos de calor presentan una conductividad térmica altamente eficiente. El cobre que es uno de los metales más conductores de calor, tiene una constante de conductividad térmica de solo 400 W/m.K, mientras que los tubos de calor pueden oscilar entre 5000 y 200000 W/m.K (Boyd corporation, 2018). El calor absorbido en la evaporación es transportado por la zona adiabática y liberado en la condensación donde se aprovecha para algún proceso (Reay & Harvey, 2012).

Dadas las condiciones del tubo, se propicia un proceso de absorción y **des absorción** de calor muy rápido con el cambio de fase; como el fluido vaporizado almacena la energía o calor **latente** a la temperatura de saturación (temperatura a la que se crea el vapor) y lo mantiene a esa temperatura hasta que se pone en contacto con una fuente a menor temperatura, entonces, en el interior del tubo luego de la vaporización, la temperatura se mantiene constante y el proceso se puede considerar isotérmico en una longitud apreciable hasta inmediatamente después de que ocurre la condensación cuando el calor producido es liberado al exterior (Reay & Harvey, 2012).

La tendencia a oponerse a cualquier cambio de temperatura en la mayor parte del ducto central es la que permite la alta conductividad térmica del dispositivo. De todas maneras, hay un diferencial importante de temperatura entre el extremo más izquierdo caliente y el extremo frío derecho. Una ventaja de estos dispositivos radica en que no requieren de un alto diferencial de temperatura para lograr la transferencia de calor de un extremo al otro.

Los tubos de calor y termosifones permiten gran flujo térmico (flujo de calor/unidad de área) en los extremos según las áreas superficiales de c/u de ellos. En la Figura 4 se aprecia la diferencia entre un tubo de calor y un termosifón (Srimuang & Amatachaya, 2012).

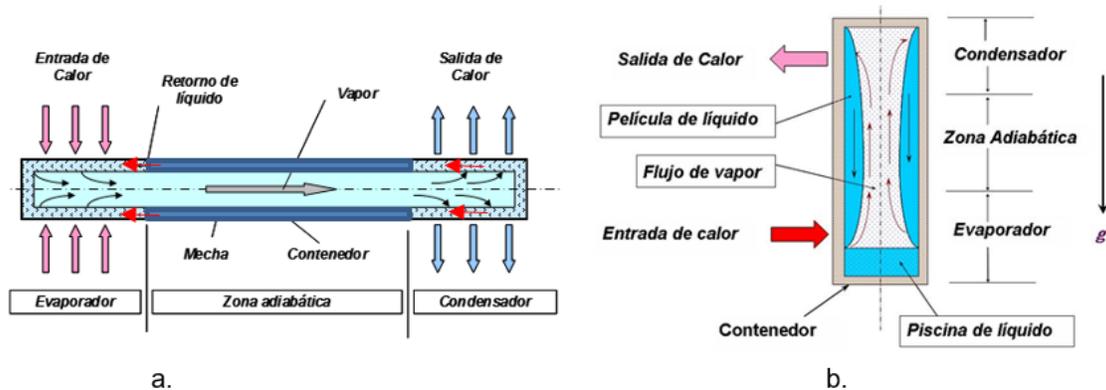


Figura 4. a) Componentes básicos de un tubo de calor. b) Elementos de un termosifón. Nótese que el termosifón no requiere material poroso, pero el condensador debe ir en la parte superior. El líquido condensado baja por gravedad. Fuente: (Miranda, 2010).

El ciclo termodinámico de un termosifón se define así, Figura 5: en 1 se parte de líquido comprimido y se continúa hasta 2 que es un punto de solo líquido saturado, luego de 2 a 3 se está en la región de líquido saturado y vapor saturado (mezcla de agua líquida saturada y vapor saturado), de 3 a 4 en la línea de solo vapor saturado, de 4 a 5 se regresa a la región de mezcla de vapor saturado y líquido saturado pero a menor presión y temperatura que en la línea 2-3, en 5 se está en otro punto de solo líquido saturado, de 5 a 1 se regresa a la región de líquido comprimido (Vanyasree & Ramana, 2017).

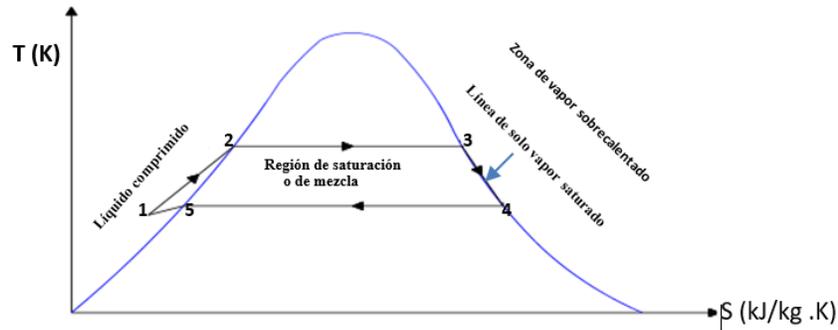


Figura 5. Ciclo TS termodinámico de un termosifón en un diagrama T vs S (entropía).

Fuente: Propia.

Los componentes principales de un tubo de calor son (Paris Londoño & Mira Hernández, 2008): el material poroso, el fluido de trabajo, el tubo conductor, la zona aislada térmicamente o adiabática, la geometría del tubo, las zonas de evaporación y condensación. En la Figura 6 se aprecia otro tipo común de dispositivo, un TSB de bucle (loop) con sus principales componentes (Toyoda & Kondo, 2013).

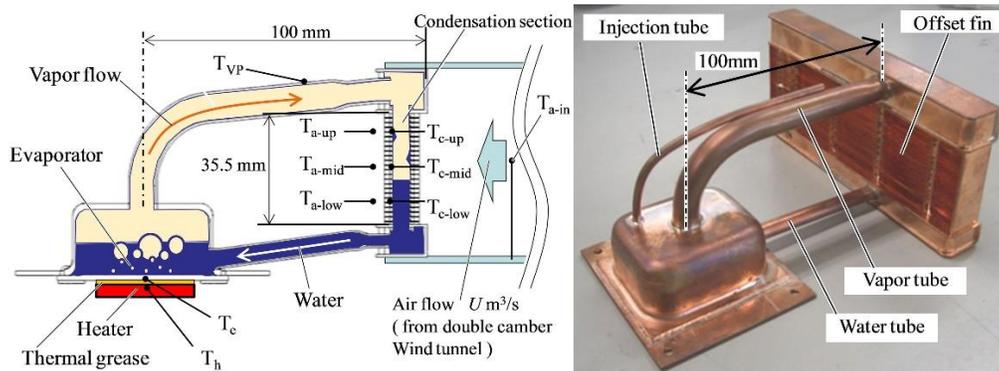


Figura 6. Termosifón de bucle (loop): otro tipo práctico de termosifón. Fuente: (Toyoda & Kondo, 2013)

El fluido de un tubo de calor o de un termosifón deber cumplir varias condiciones: ser inerte para no corroer el tubo o el medio poroso, el calor latente de vaporización deber ser alto para que pequeños flujos **másicos** (del fluido) pueda transportar altos flujos de

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

calor latente, elevada tensión superficial, baja viscosidad y densidad para que pueda fluir a través del medio poroso, alta conductividad térmica en la fase líquida para que la caída de temperatura sea menor entre el evaporador y el condensador. Estas condiciones las cumple el agua (Toyoda & Kondo, 2013).

Entre las ventajas de los tubos de calor y termosifones se pueden considerar (Reay & Kew, 2006):

- Alta conductividad térmica.
- Bajo costo.
- Funcionamiento isotérmico. Proveen superficies isotérmicas.
- Tolerancia al choque y a la vibración
- Permiten la congelación y descongelación.
- Posibilitan transferir calor con pocas pérdidas a través de distancias apreciables.
- Transportan energía desde un flujo alto de calor hasta un flujo más bajo en el condensador. Se pueden llegar a flujos caloríficos mayores a $1000 \text{ W} / \text{cm}^2$.

A pesar de sus numerosas ventajas los tubos de calor presentan algunas limitaciones (Brito & Zapico, 2012):

- El diferencial de temperatura influye en la transferencia de energía y debe ser valorado.
- El tamaño y grado de capilaridad también se debe tener en cuenta.
- Los flujos de vapor y líquido van en contracorriente y se deben calcular.
- El límite de ebullición que se define como el calor máximo transferido que produce una ebullición debe ser considerado.

Entre las aplicaciones de los tubos de calor y los termosifones se tienen (Miranda, 2010):

- En artefactos espaciales a nivel de microtubos para la distribución superficial uniforme de temperatura en las caras opuestas.

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

- En circuitos electrónicos para la disipación de calor.
- En el campo biomédico para calentar o enfriar zonas del cuerpo con el objetivo de mejorar drenajes de fluidos o para mantener la temperatura adecuada.
- En lugares donde se requiere flexibilidad para la extracción de calor.
- En motores eléctricos para evitar sobrecalentamientos.
- En sistemas de adsorción (sortion heat pipes SHP). La adsorción se refiere a fenómenos superficiales mientras que la absorción a fenómenos volumétricos de asimilación o desasimilación de calor.
- Tubos de calor con fluidos magnéticos.
- Colectores solares optimizados.
- Recolección de calor residual donde otros sistemas no son eficientes.
- En moldes de fundición para lograr en la solidificación de metales estructuras del material internas apropiadas y para minimizar el impacto térmico de la matriz.

Según los tipos de tubos de calor pueden desempeñarse en aplicaciones que van desde los 4 a 3000K y transportar calor a distancias grandes con poca caída de temperatura. Son de relativa fácil construcción, fácil control y de funcionamiento pasivo, lo que significa que no requieren de potencia externa, pueden operar en campos de micro gravedad en el espacio, puesto que su funcionamiento se basa en la capilaridad (Rosas Zumelzu, 2015)

- Se pueden emplear en rangos bajos como intervalos de temperaturas entre 2 grados Kelvin (2K= -271°C) y 2273 K (2000°C) y aún mayores con sales especiales.
- Permiten la combinación fácil con los sistemas y componentes electrónicos existentes.
- Larga vida sin mantenimiento.
- En el caso de los termosifones operan contra la gravedad sin fuente externa de energía.
- Permiten optimizar grandemente los intercambiadores de calor tradicionales.

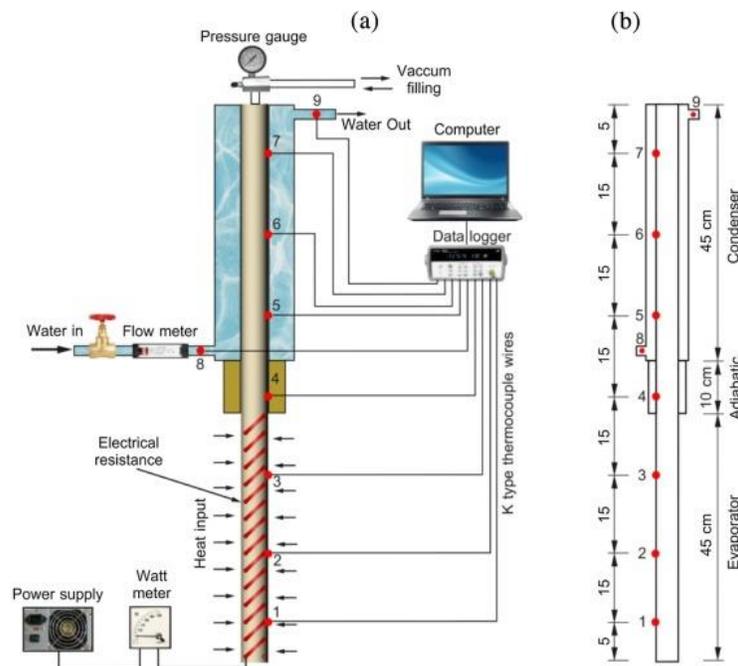
	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3. METODOLOGÍA

La metodología usada se extrajo de lo planteado por Reay y Kew (2006). Lo primero que se realizó, fue una identificación de variables: fluido de trabajo (agua desionizada), % de llenado, potencia de entrada variable en un rango de 10 W a 100 W, temperatura de operación y salida en el condensador, presión de vacío y presión de operación.

3.1 Construcción de termosifón

Para esto, se usó una geometría del termosifón, tomando como referencia lo hecho por Gedik (2016), quien planteó un termosifón con las siguientes características: forma cilíndrica con una longitud total de 1m, zona de evaporación con una longitud de 45 cm, 10 cm de zona adiabática y 45 cm de zona de condensación. Esto se puede ver en la Figura 7.



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

Figura 7. a) Diagrama esquemático del aparato experimental (b) ubicaciones de los termopares (Gedik, 2016)

El montaje experimental anterior, fue modificado con el fin de ajustarnos a las necesidades del laboratorio de ciencias térmicas y a partir de algunos análisis de otros artículos. Por lo que se escaló el termosifón diseñado por **Gedik (2016)** Y el resultado es el mostrado en la Figura 8.

Empezando desde la parte superior del montaje, se planteó el uso de un manovacuómetro con un rango de operación desde -30 inHg hasta 60 PSI, para las lecturas de la presión al interior del termosifón. Este a su vez, sirvió para verificar la hermeticidad del tubo luego de someterse a presiones de vacío. El mano vacuómetro se conectó, a una T de bronce de 1/4 NPT, con el uso de un sellador de alto vacío. La configuración de la T que se muestra en la Figura 8, permitió la conexión al tubo mediante un niple de 1/4 NPT y la conexión al sistema de llenado y vacío.

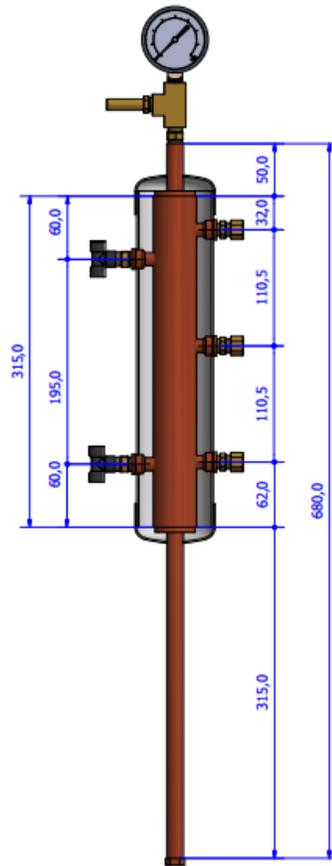
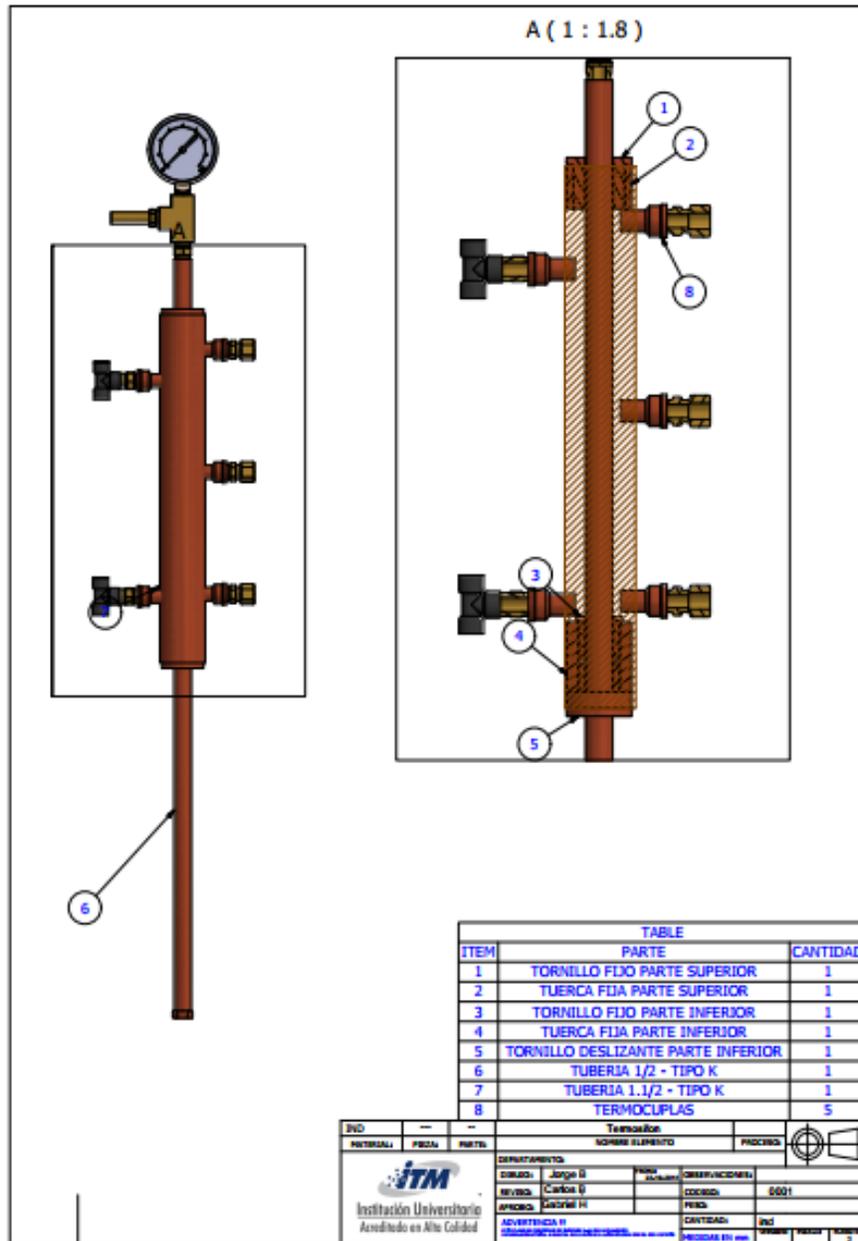


Figura 8. Diseño de termosifón de cobre a escala laboratorio. Fuente: propia

El tipo de material que se empleó para la fabricación del termosifón fue cobre tipo K con una longitud de 680 mm. El ensamblaje y la lista de piezas se resumen en la Figura 9. Junto con la Figura 8, se puede observar una tubería de cobre, a la cual se le instaló una chaqueta del mismo material con un diámetro de 1 pulgada y 1/2, la cual a su vez está perforada para la instalación de niples y racores de 1/4 de pulgada. Los dos que se ven al lado izquierdo de la Figura 9 y con una distancia de 195 mm entre ellos, sirven para la admisión y descarga del fluido de refrigeración, que para este caso fue agua desionizada. La cual era suplida por un baño termostático y para el control del flujo de agua, se usó una válvula de aguja y un medidor de flujo másico Coriolis. Para este caso de usó un flujo de 115 g/min. Estos racores en T, además tenían instalados dos termocuplas tipo K para la lectura de la temperatura de entrada y salida de la chaqueta de refrigeración.

Al lado derecho de la chaqueta en la Figura 9, se observan 3 cavidades que se usaron para la instalación de termocuplas tipo K, con el fin de obtener lecturas de temperatura a lo largo del tubo de calor, es decir, las termocuplas que entraban por estas cavidades tenían contacto directo con la pared del tubo de calor



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

Figura 9. Ensamblaje y lista de piezas. Fuente: propia

Luego, en la Figura 10, hasta la Figura 14, se muestran algunos de los accesorios mencionados en la Figura 9, usados para fijar la chaqueta de refrigeración. Adicionalmente, se instaló una carcasa exterior a la chaqueta de refrigeración, la cual se fabricó en PVC y con un acondicionamiento de bisagras, pudo servir para sostener el aislamiento (fibra de vidrio) de la chaqueta de refrigeración.

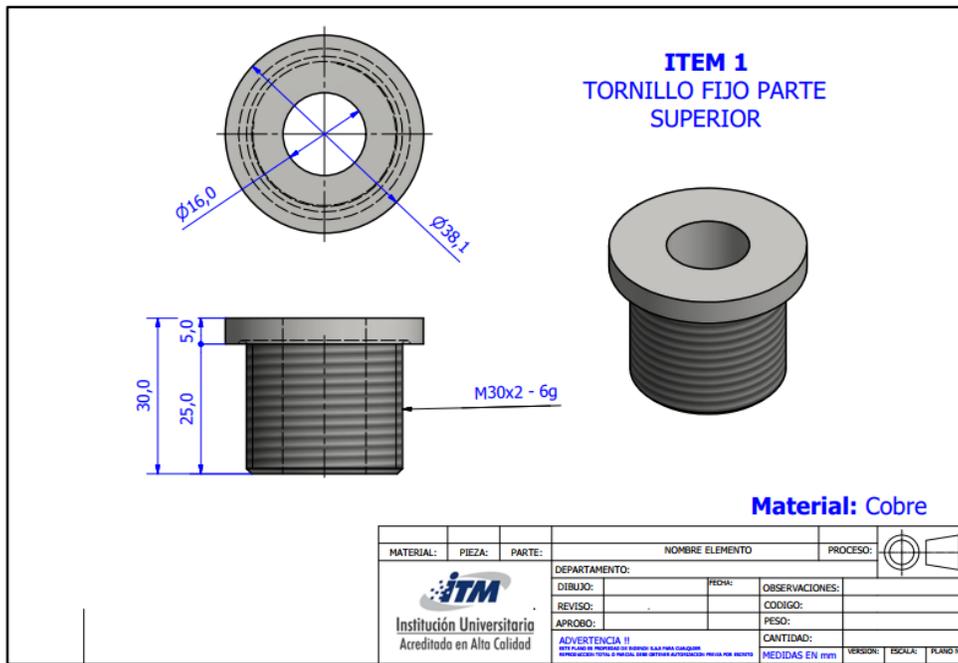


Figura 10. Tornillo fijo de la parte superior. Fuente: propia.

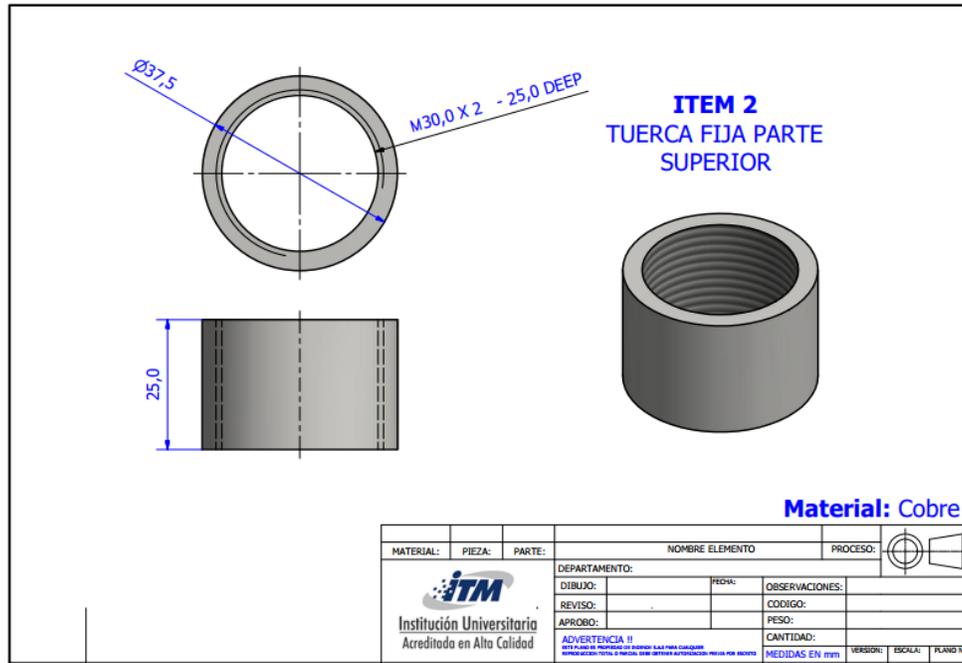


Figura 11. Tuerca fija de la parte superior. Fuente: propia.

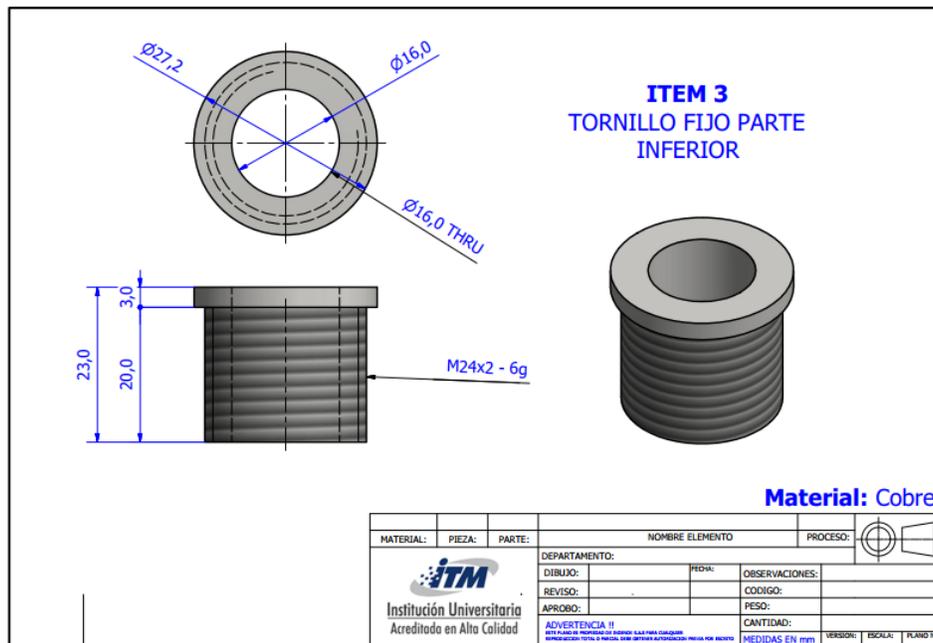


Figura 12. Tornillo fijo de la parte inferior. Fuente: propia.

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

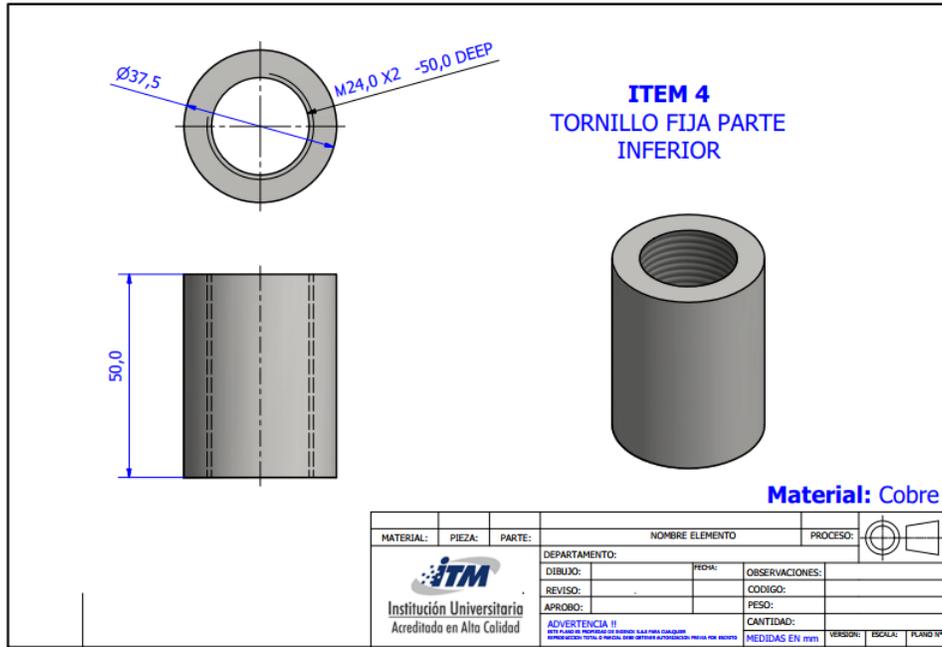


Figura 13. Tornillo fijo hembra de la parte inferior. Fuente: propia.

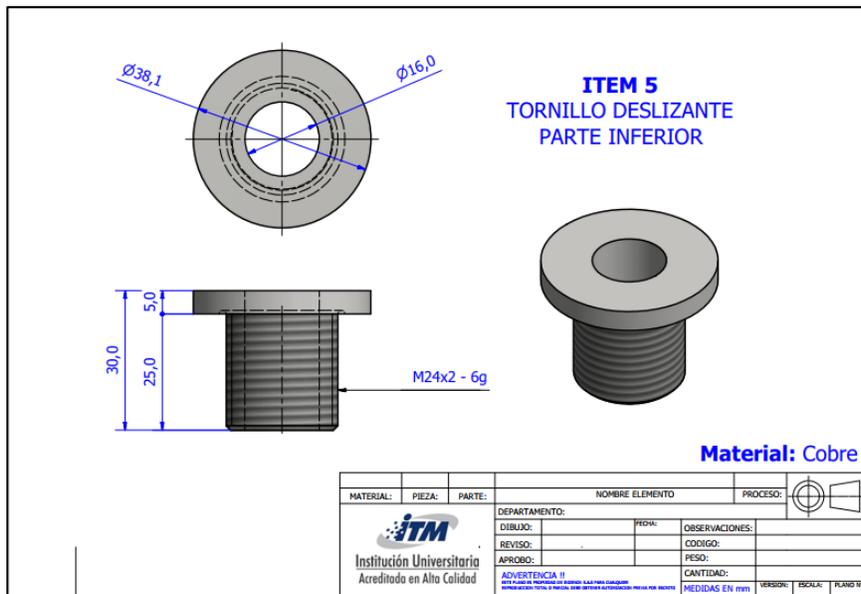


Figura 14. Tornillo deslizante de la parte inferior. Fuente: propia.

Antes del ensamble definitivo del termosifón se procedió con su limpieza. La cual se trata de extraer todas las impurezas que queden en el interior del material de cobre, tanto de la

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

chaqueta como del tubo como tal. Inicialmente, se empleó una solución de agua y jabón para lavar el interior unas cinco veces. Luego se usó etanol un número igual de veces. Posteriormente, se enjuagó con agua destilada a 90°C. Y por último se secó con un secador industrial durante unos 30 minutos no continuos, cuidando de no dañar el dispositivo por exceso de calor. Antes de seguir con los pasos posteriores, se dejó que el sistema alcanzara temperatura ambiente.

El exterior del dispositivo de cobre, también se limpió usando una solución de agua desionizada y ácido sulfúrico al 10%. Luego de estar totalmente limpio, en la parte inferior del tubo, se enrolló una resistencia eléctrica de 250 W y 150 ohmios, lo cual sirvió para simular la zona del evaporador. Adicional a ello, tres termocuplas tipo K se instalaron con el uso de cinta de alta conductividad térmica.

Una vez, la resistencia eléctrica estuvo puesta, se usó fibra de vidrio para aislar térmicamente cada una de las zonas del tubo. En la zona del evaporador, se usó adicionalmente Rubaflex, el cual aparte de ser un aislante térmico ampliamente usado en sistemas de refrigeración, sirvió también para sostener la fibra de vidrio.

Antes de conectar la resistencia eléctrica al sistema de potencia, se procedió con la extracción del aire y gases no condensables del interior del tubo de calor, esto mediante una bomba de vacío ME 1C, VACUUMBRAND GMBH, Alemania y un dispositivo de acople especial, formado por una manguera de 1/4 de pulgada de baja porosidad y unas pinzas quirúrgicas tipo Kelly, que hacía de veces de válvula, lo cual sirvió para controlar la presión de vacío y para evitar infiltraciones de aire luego del proceso de vaciado. La presión de vacío usada fue de -20 inHg. A continuación, se procedió con la carga del termosifón con agua desionizada. La relación de llenado fue del 30% debido a que este es uno de los porcentajes más usados a nivel experimental (Yang, Song, Shang, Tao, & Deng, 2015),

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

además, fue uno de los valores óptimos encontrados en otros trabajos en el laboratorio de ciencias térmicas del ITM.

El tubo se llenó luego de someter el sistema a vacío, para esto el agua desionizada se midió en una bureta de 50 mL, y se conectó mediante la manguera de baja porosidad. Antes de proceder al llenado, usando las pinzas quirúrgicas como válvula, se hizo la desaireación con una bomba de vacío. Finalmente, se abrieron las pinzas dejando pasar la cantidad exacta de agua y luego se cerraron otra vez, evitando infiltraciones de aire.

Por último, la resistencia eléctrica del dispositivo se conectó a 6 fuentes de voltajes conectadas en serie entre ellas, de las cuales 4 fueron fuentes variables de 0 a 32 V y dos de ellas eran fuentes fijas de 5 V. Estas fuentes eran de corriente continua y reguladas, por lo que, teniendo la potencia de la resistencia eléctrica, la variación del voltaje, y los valores de corriente eléctrica, podíamos calcular fácilmente la potencia entregada al tubo mediante la ley de ohm, expresada en la ecuación (2).

$$P = VI \text{ (W) (2)}$$

Donde:

P : es potencia (W)

V : Voltaje (V)

I : corriente eléctrica (A)

3.2 Evaluación experimental del termosifón

Para este apartado, se continuó con algunas pruebas preliminares y algunas corridas experimentales con agua desionizada. Además, se probó el sistema en dos ángulos de inclinación.

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

El primer paso, consistió en ubicar el termosifón en una base que tenía la capacidad de inclinarse en ángulos de 0 a 360°. Para este fin, se usó un tubo con burbuja, típicamente usado en los niveles. Adicionalmente, la base fija, tenía instalado un goniómetro el cual podía ser leído mediante un apuntador óptico instalado en el termosifón. De esta manera, dos ángulos de inclinación fueron seleccionados, 90° (totalmente vertical) y 45° (inclinado a la izquierda). Esto es el resultado de un análisis de la literatura donde los investigadores comúnmente usan estas posiciones para las pruebas con termosifones, logrando obtener máxima eficiencia (Hung, Teng, & Lin, 2013; Sarafraz & Hormozi, 2014).

Inicialmente, con el termosifón con el fluido de trabajo y todo el sistema conectado, se empezó con la recirculación de agua de refrigeración proveniente del baño termostático, el cual estaba ajustado a 15 °C, además, se controló el flujo másico del agua con el uso de la válvula de aguja y el medidor de flujo Coriolis. El sistema tardaba por lo menos 15 minutos en equilibrarse. Mientras tanto, las termocuplas y el medidor Coriolis se conectaron a un sistema de adquisición de datos, que se encargaba de entregar los datos de temperatura y flujo másico, y además los graficaba en un entorno de visualización en PC para obtener una mejor apreciación de la respuesta térmica del termosifón.

Luego de que todo estuviera a punto para iniciar las pruebas, se alimentó la resistencia eléctrica con variaciones de potencia de 10 en 10 W cada 20 minutos, hasta llegar a 100 W. Durante esas variaciones y el tiempo de espera, se monitoreaba los perfiles de temperatura dados por el sistema de adquisición de datos, donde se pudo obtener los cambios de temperatura y los tiempos en los que el sistema operó en estado estable. Se realizaron tres réplicas experimentales.

Adicionalmente, se tomaron datos de humedad relativa, temperatura ambiente, cambios en la presión de vacío y tiempo transcurrido en el cambio de potencia, esto para verificar que las condiciones mencionadas no tuvieran influencia directa en el funcionamiento del equipo.

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

Finalmente, para el cálculo de las condiciones de operación y la eficiencia del termosifón, se usaron las siguientes condiciones:

En primer lugar, la resistencia térmica es la oposición del sistema a la transferencia de calor desde el medio de alta temperatura hasta el de baja temperatura, en ese sentido, se puede calcular usando la diferencia entre los valores promedios de temperatura del evaporador y el condensador sobre el flujo de calor o la potencia de entrada en el evaporador, así como lo muestra la ecuación (3)

$$R = \frac{T_e - T_c}{Q} \quad (3)$$

Donde:

R : Es la resistencia térmica ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)

Q : La potencia de entrada en el evaporador (W)

T_e : Promedio de temperaturas en el evaporador (K)

T_c : Promedio de temperaturas en el condensador (K)

De la misma manera se puede calcular la eficiencia térmica del termosifón, mediante el uso de la ecuación (4)

$$\eta = \frac{Q_s}{Q_e} \times 100 \quad (4)$$

Donde:

η : Es la eficiencia térmica del termosifón (%)

Q_e : la potencia de entrada en el evaporador (W)

Q_s : Potencia retirada o calor recuperador en el condensador (W)

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

La potencia o calor recuperado en el condensador, determina la eficiencia del dispositivo, ya que es la capacidad que tiene el sistema de recuperar energía de algún sistema en particular con el uso de termosifones. De esta manera, se puede calcular mediante la ecuación (5)

$$Q_s = C_p \dot{m} \Delta T \text{ (W)} \text{ (5)}$$

Donde:

C_p : Es el calor específico del agua de refrigeración a temperatura promedio (J/kg °C)

\dot{m} : Flujo másico de agua de refrigeración dado por el Coriolis (kg/s)

ΔT : Diferencia de temperatura en la entrada y salida del condensador (°C)

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

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados del trabajo de grado que tienen como finalidad, cumplir los objetivos específicos. Por lo tanto, en las secciones que siguen se van a encontrar los resultados de la construcción y las pruebas hechas con el termosifón de cobre.

4.1 Construcción de termosifón a escala laboratorio.

En la Figura 15 se pueden notar los componentes básicos del termosifón construido, observando desde la parte superior de la figura, podemos notar la presencia del soporte del termosifón, el cual tiene una parte fija, compuestos por perfiles de acero y una base que sirve como contrapeso. A la parte fija, se sujeta mediante chumaceras, la parte móvil donde va montado el termosifón. Este tiene dos sujetadores hechos en Prolón (retal de nylon), los cuales se encargan de sujetar el tubo de cobre. Además, la parte móvil cuenta con un tubo con burbuja y un transportador el cual sirve para las mediciones del ángulo de inclinación, esto mediante un apuntador láser que entrega la medida correcta del ángulo de trabajo.

Por otra parte, a la izquierda de la Figura 15 se nota el soporte de la chaqueta de refrigeración, el cual está hecho en tuberías de PVC, este sirve para contener el aislamiento de fibra de vidrio en la zona del condensador. Así mismo, para abrir y cerrar el soporte de la chaqueta cuenta con unas bisagras en la parte posterior y un mecanismo de cierre en la parte anterior.

Finalmente, como la parte más importante de este trabajo está el termosifón de cobre tipo K, el cual se nota ensamblado completamente, con el uso de un mano vacuómetro, la chaqueta de refrigeración en un mayor tamaño que el tubo principal, con sus entradas y

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

salidas para la recirculación de agua de refrigeración y por último todo el arreglo de termocuplas tipo K para la lectura de temperatura durante las pruebas.

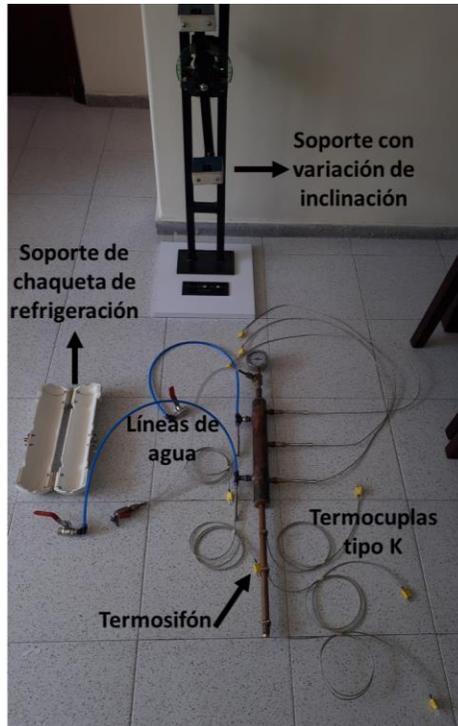


Figura 15. Componentes básicos del tubo de calor construido

En la Figura 16 se muestra el tubo de cobre y la chaqueta de refrigeración por separado. En la parte superior, se nota el mano vacuómetro con un rango de medición desde -30 inHg hasta 60 PSI (Figura 17), conectado directamente a un racor de bronce en “T”, en cual permite las mediciones de presión de vacío y presión de trabajo y, además, permite el llenado y vaciado del tubo. Adicionalmente, en la extensión del tubo se pueden notar los tornillos fijos, que van soldados y sirven para el acoplamiento de la chaqueta de refrigeración al tubo. Luego, la chaqueta de refrigeración es un tubo hueco que tiene 5 perforaciones con racores soldados. Estos sirven para la recirculación del agua de refrigeración y para la instalación de las termocuplas.



Figura 16. Termosifón de cobre y chaqueta de refrigeración



Figura 17. Mano vacuómetro con un rango de medición desde -30 inHg hasta 60 PSI

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

Finalmente, en la Figura 18 se puede observar el montaje completo del termosifón con todos los instrumentos de medición y recolección de datos, así mismo los instrumentos de generación de señales de trabajo. Empezando desde el lado izquierdo, se puede notar la instalación del baño termostático. A la salida de este, se garantiza una temperatura de 15 °C, sin embargo, en el recorrido del agua hasta llegar al tubo, hay una ganancia de temperatura. Luego de salir del baño termostático, el agua entra a un medidor de flujo másico Coriolis y a la salida de este, hay una conexión a la entrada de la chaqueta de refrigeración. Luego hay un retorno al baño termostático mediante una línea de agua desde la salida de la chaqueta hasta el baño.

En la zona del evaporador del baño, hay una resistencia eléctrica directamente conectada a las fuentes de voltaje, que a su vez se conectan entre ellas en serie para elevar la tensión eléctrica. Finalmente, se puede observar el arreglo de termocuplas conectadas al sistema de adquisición de datos, que a su vez se conecta al computador que se encarga de mostrar las señales recolectadas por las tarjetas de adquisición.

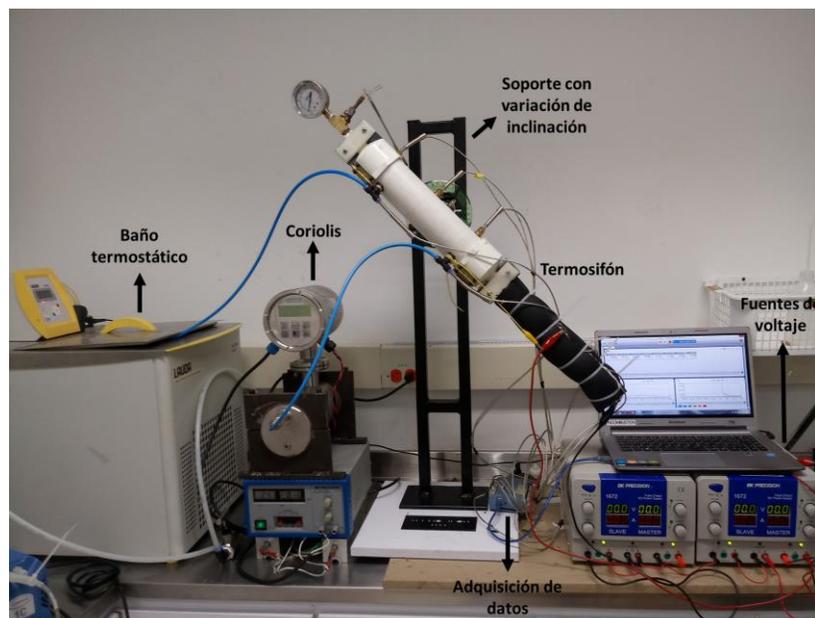


Figura 18. Montaje experimental de termosifón completo con instrumentación

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

4.2 Resultados de la evaluación experimental del termosifón

En la Figura 19 se notan los resultados de variación de la eficiencia del termosifón ubicado a dos ángulos de inclinación (45° y 90°), y con la variación de potencia. Estos resultados son el promedio de 3 réplicas para cada posición, por lo tanto, se puede notar que, hasta 50 W la variación de eficiencia es muy grande y que **el error no permite entregar eficiencias puntuales**. Es decir, a 90° puedo obtener valores de eficiencia entre 48% y 83% aproximadamente. Adicionalmente, con respecto a 45° y 90° se puede observar que no hay diferencia significativa entre los valores de eficiencia, excepto cuando se realizan pruebas a 100 W, donde se halló una diferencia de 3,7%. Es decir, que para 100 W es la única potencia donde se notan aumentos de eficiencia cuando se varía el ángulo de inclinación.

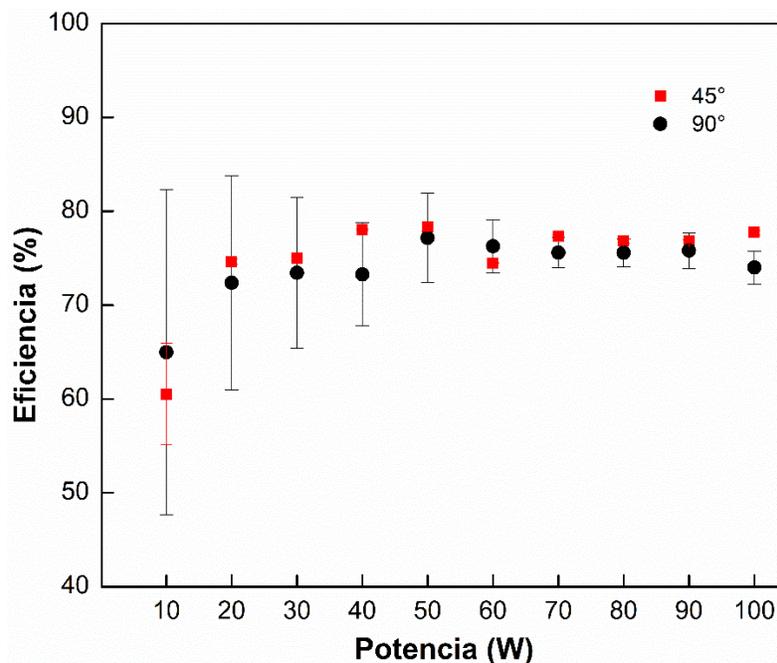


Figura 19. Resultados de eficiencia del termosifón posicionado a 45° y a 90°

En la Figura 20 se pueden observar las variaciones de resistencia térmica para el termosifón a los dos ángulos de inclinación. Cada uno de los saltos en la gráfica representan la variación de potencia, las cuales van desde 10 W hasta 100 W, tal y como

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

se muestra en la Figura 19. Las secciones planas, son las que se refieren a un régimen de estado estacionario en la operación. De donde se puede notar los 20 minutos que duraba cada prueba antes de cambiar de potencia. Desde 10 W hasta 60 W se nota que existe una pequeña variación en la resistencia térmica, que puede darse debido al ruido generado por la baja potencia de entrada. Esta pequeña variación puede causar las fluctuaciones en la eficiencia global del termosifón y tener variaciones en el funcionamiento del sistema en el tiempo.

Por otra parte, la resistencia térmica es la oposición del sistema a la transferencia de calor, por lo tanto, se puede observar que a mayores potencias se puede obtener menor resistencia térmica y con esto, mayor rendimiento y menor fluctuación en los resultados de eficiencia térmica.

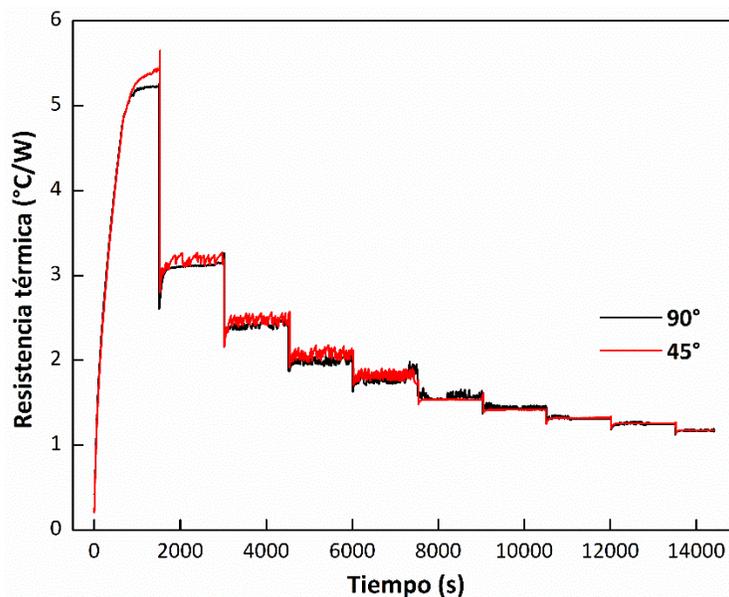


Figura 20. Resultados de resistencia térmica del termosifón posicionado a 45° y a 90°

En la Figura 21 se puede observar el cambio del perfil de temperatura desarrollado por el termosifón, a 45° (Figura 21A) y a 90° (Figura 21B). Estos datos fueron tomados del promedio de datos de temperatura durante el funcionamiento en estado estacionario. Además, se pueden notar cada una de las zonas del termosifón dividida por líneas negras.

Así mismo, se notan cada uno de los perfiles de temperatura a diferente potencia. De lo cual, se puede notar que, entre variación de inclinación, no hay diferencia significativa, esto comprueba los datos mostrados en la Figura 20 de la resistencia térmica.

Por otra parte, en la Figura 21 se muestran los perfiles de temperatura a diferentes potencias. Así, se puede notar que en cada cambio de potencia la temperatura del evaporador se eleva de manera notable, esto es debido a que la resistencia eléctrica está sobre las termocuplas, y la lecturas de temperatura se dan con respecto al calentamiento de la resistencia, y no con la temperatura desarrollada al interior del tubo, así que se puede mostrar que debido a este fenómeno, la resistencia térmica es alta y por eso, la resistencia térmica es superior a la resistencia térmica normalmente encontrada en la literatura (Shanbedi, Heris, Baniadam, Amiri, & Maghrebi, 2012).

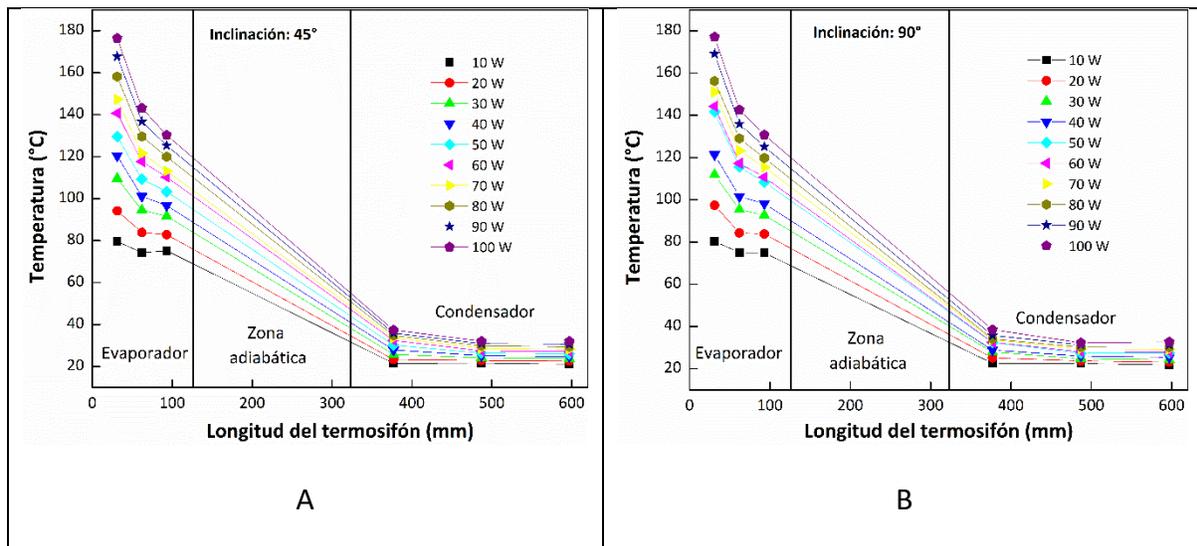


Figura 21. Cambio del perfil de temperatura del termosifón con la variación de potencia a (A) 45° y a (B) 90°

Finalmente, este trabajo mostró la gran eficiencia de un intercambiador de calor tipo termosifón comparado con la mostrada por otros tipos de intercambiadores. Con lo que

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

se demuestra la viabilidad de llevar este tipo de sistemas a entornos industriales, donde se pueden usar como equipos para la recuperación y el intercambio de calor en sistemas críticos como, por ejemplo, hornos, motores de combustión, calderas, sistemas de ventilación, bombas de calor, entre muchos otros sistemas.

Además, se pueden usar otros tipos de tubos de calor o configuraciones geométricas diferentes con el fin de hallar mejores rendimientos térmicos. Así mismo, se puede usar fluidos con capacidades de transporte de calor mayores que el agua, como por ejemplo los nano fluidos.

Los resultados de este trabajo fueron presentados en la muestra de proyectos en el aula, de la semana de la ingeniería en el Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM), donde obtuvimos el segundo lugar en la categoría de trabajos de grados. En el Anexo 1 y Anexo 2 se muestran el póster publicado y el certificado dado por la facultad, respectivamente.

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

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

En esta sección se muestran las conclusiones de la construcción y de las pruebas de un termosifón a escala laboratorio. El cual, fue construido y diseñado a partir de algunos artículos de la literatura especializada y puesto en operación para medir variables como la eficiencia, la resistencia térmica y la temperatura desarrollada en su interior. De esta manera las conclusiones son:

- Se obtuvo un termosifón a escala laboratorio, con un sistema de variación de ángulo de inclinación, así mismo, se construyó con el fin de mantener sellado el contenedor y lograr el vacío del sistema, mientras se llenada y mientras se llevaban a cabo las pruebas. El sistema de acopló a diferentes dispositivos de medición, como sistemas de adquisición de datos, sistemas de alimentación, como la entrada de potencia y el agua de refrigeración y finalmente, sistemas de llenado y vacío.
- La operación final del sistema reveló que, las condiciones de construcción estuvieron acorde a los diseños iniciales. Ya que, con el uso de la instrumentación y a diferentes circunstancias de trabajo, como la variación de potencia, se logró obtener un sistema que pudiera replicar los resultados dados entre cada prueba.
- El sistema, además, mostró eficiencias mayores a 75%, y dado los requerimientos actuales en la industria, un sistema de estos puede ayudar en el manejo de energía térmica, con la facilidad constructiva y la versatilidad que tienen estos dispositivos. No obstante, los perfiles de temperatura y la resistencia térmica entre cada ángulo de inclinación probado, no mostró diferencias significativas. Esto pudo deberse a que el

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

sistema no tiene grandes cambios con las potencias probadas y se deben probar mayores potencias.

- Como trabajo futuro, se recomendaría trabajar este sistema con mayores potencias, con el uso de diferentes porcentajes de llenado y con el uso de fluidos de trabajo diferentes, como el uso de refrigerantes o nano fluidos.

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

● Anexos

Anexo 1. Poster presentado en la muestra de proyectos en el aula de la semana de la ingeniería de la facultad de ingenierías del ITM

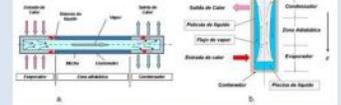

Institución Universitaria
 Acreditada en Alta Calidad

MUESTRA DE PROYECTOS DE AULA
DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN
TERMOSIFÓN A ESCALA DE
LABORATORIO



INTRODUCCIÓN

En este trabajo se diseño y construyo un termosifón a escala de laboratorio con el fin de probar su rendimiento térmico de manera vertical y con una inclinación de 45° mediante pruebas realizadas en el laboratorio de ciencias térmicas del ITM sede fraternidad.



a. Componentes básicos de un tubo de calor. b) Elementos de un termosifón. Nótese que el termosifón no requiere material poroso, pero el condensador debe ir en la parte superior. El líquido condensado baja por gravedad. Fuente: (Paris, 2017).

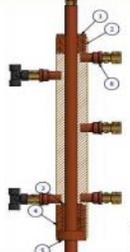
1. PARTICIPANTES

NOMBRE ESTUDIANTE Estudiante de Ing. Mecatrónica, Carlos Alberto Berrio carlosberrio96446@correo.itm.edu.co	NOMBRE ESTUDIANTE Estudiante de Ing. Electromecánica, Gabriel Darío Hernández gabrielhernandez205017@correo.itm.edu.co
NOMBRE ESTUDIANTE Estudiante de Ing. Electromecánica, Jorge Mario Berrio jorgeberrio5116@correo.itm.edu.co	

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los desperdicios de calor en la industria son muy comunes, ya que cierta cantidad de energía esta contenida por ejemplo en los gases de combustión y pueden ser aprovechados en otros procesos industriales. Los termosifones pueden ser usados como intercambiadores de calor que aprovechan esta energía contenida en los calores residuales normalmente desperdiciados y utilizarlos en otros sistemas disminuyendo de esta manera los consumos energéticos en la industria.

3. METODOLOGÍA



$$R_t = \frac{\Delta T}{\dot{Q}_{in}}$$

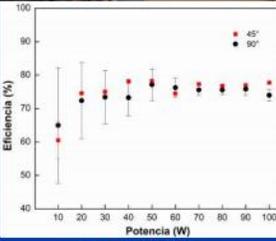
$$\Delta T = T_{evaporador} - T_{condensador}$$

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{Q}_{in}}$$

$$\dot{Q} = C_p \cdot \dot{m} (T_{out} (chaqueta) - T_{in} (chaqueta))$$

R_t : Resistencia térmica
 η : Eficiencia
 C_p : Calor específico agua
 \dot{m} : Flujo másico agua
 T : Temp. promedio

4. RESULTADOS

Potencia (W)	45° Efficiency (%)	90° Efficiency (%)
10	65	60
20	75	70
30	75	70
40	75	70
50	75	70
60	75	70
70	75	70
80	75	70
90	75	70
100	75	70

5. CONCLUSIONES

- En los resultados de las pruebas de laboratorio la graficas muestran puntos de eficiencia por encima del 75% esto demuestra el éxito del prototipo.
- La selección del cobre como material de fabricación dadas sus propiedades térmicas, su maquinabilidad y la tubería del tipo K por su espesor de pared facilito en gran medida la unión por soldadura de sus componentes.
- La implementación de la tecnología de Termosifones y tubos de calor en la industria mejorara el aprovechamiento energético y sería un gran aporte social y ambiental.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AAVID THERMACORE. (2017). Obtenido de <http://www.thermacore.com/thermal-basics/heat-pipe-technology.aspx>

Acrolab. (2017). *Isobar Heat Pipes*. Obtenido de <http://www.acrolab.com/products/isobars-heat-pipes.php>

ADVANCED COOLING TECHNOLOGIES. (2016). Recuperado el 12 de Mayo de 2017, de <https://www.1-act.com/>

Aroís, M. (2010). *FUNCIONAMIENTO DE UN TERMOSIFÓN CILÍNDRICO CON DISTINTOS FLUIDOS DE TRABAJO*. Tesis de Grado, Universidad Pública de Navarra, Pamplona.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE THERMAL PERFORMANCE OF A TWO-PHASE CLOSED THERMOSYPHON AT DIFFERENT OPERATING CONDITIONS Engin Gedik, Energy Systems Engineering Department, Faculty of Technology, Karabük University, TR-78050, Karabük, Turkey

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

Anexo 2. Diploma de segundo lugar, en la muestra de proyectos en el aula de la semana de la ingeniería, ITM-2018


Institución Universitaria
Abordando el Alto Nivel

Innovación Tecnológica con
Sentido Humano



INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

El proyecto:
Diseño y construcción de un termosifón a escala de laboratorio
Obtuvo el Segundo Lugar en la categoría
Trabajo de grado

Presentado por:
 Anderson Gallego Montoya - C.C. 1.128.453.750
 Carlos Alberto Berrio Betancur - C.C. 98.563.943
 Jorge Mario Berrio Betancur - C.C. 8.433.540
 Gabriel Darío Hernández - C.C. 71.293.876

Facultad de Ingenierías
Medellín, 9 de noviembre de 2018



Adolfo Escobar Ordoñez
Decano Facultad de Ingenierías

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

REFERENCIAS

- Acrolab. (2018). ISOBAR® HEAT PIPE COMPONENT BASICS. Retrieved August 21, 2018, from <https://www.acrolab.com/isobar-heat-pipes/>
- Advanced Cooling Technologies. (2019). HEAT PIPE RESOURCES. Retrieved January 10, 2019, from <https://www.1-act.com/resources/heat-pipe-resources/>
- Alien, W. (2012). La magia de los diagramas de fases, o cómo puede haber hielo a más de 100°C. Retrieved May 13, 2017, from <http://naukas.com/2012/02/02/la-magia-de-los-diagramas-de-fases-o-como-puede-haber-hielo-a-mas-de-100oc/>
- Boyd corporation. (2018). Heat Pipe Technology. Retrieved August 21, 2018, from <https://www.boydcorp.com/thermal-management/heat-pipe-technology.html>
- Brito, M. A., & Zapico, E. N. (2012). MODELO MATEMÁTICO DE UN “ HEAT PIPE ” APLICABLE AL MODELO MATEMÁTICO DE UN “HEAT PIPE” APLICABLE AL SISTEMA DE CONTROL DE UN NANOSATÉLITE. *Mecánica Computacional, XXXI*, 13–16. Retrieved from <https://cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/view/4227/4153>
- Buschmann, M. H. (2013). Nanofluids in thermosyphons and heat pipes: Overview of recent experiments and modelling approaches. *International Journal of Thermal Sciences, 72*, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2013.04.024>
- Casarosa, C., Latrofa, E., & Shelginski, A. (1983). The geyser effect in a two-phase thermosyphon. *International Journal of Heat and Mass Transfer, 26*(6), 933–941. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(83\)80117-3](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(83)80117-3)
- Cengel, Y. A. (2003). *Heat transfer: A practical approach* (3ra edición). McGraw-Hill.
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2009). Termodinámica (Sexta edic, pp. 906–907). México, D.F.
- DUNN, P. D., REAY, D. A., DUNN, P. D., & REAY, D. A. (1994). CHAPTER 2 – Theory of the Heat Pipe. In *Heat Pipes* (pp. 27–106). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-041903-9.50008-3>

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

- Faghri, A. (2014). Heat Pipes: Review, Opportunities and Challenges. *Frontiers in Heat Pipes*, 5(1). <https://doi.org/10.5098/fhp.5.1>
- Gedik, E. (2016). Experimental investigation of the thermal performance of a two-phase closed thermosyphon at different operating conditions. *Energy and Buildings*, 127, 1096–1107. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.066>
- Hung, Y. H., Teng, T. P., & Lin, B. G. (2013). Evaluation of the thermal performance of a heat pipe using alumina nanofluids. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 44, 504–511. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.08.012>
- Jafari, D., Franco, A., Filippeschi, S., & Di Marco, P. (2016). Two-phase closed thermosyphons: A review of studies and solar applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 575–593. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.002>
- Jiao, B., Qiu, L. M., Zhang, X. B., & Zhang, Y. (2008). Investigation on the effect of filling ratio on the steady-state heat transfer performance of a vertical two-phase closed thermosyphon. *Applied Thermal Engineering*, 28(11–12), 1417–1426. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.09.009>
- 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>
- Kim, K. M., Jeong, Y. S., Kim, I. G., & Bang, I. C. (2015). Comparison of thermal performances of water-filled, SiC nanofluid-filled and SiC nanoparticles-coated heat pipes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 88, 862–871. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.04.108>
- Laplace. (2018). Propiedades del agua. Retrieved August 21, 2018, from http://laplace.us.es/wiki/index.php/Propiedades_del_agua
- Miranda, Á. (2010). *Tubos de calor*. Barcelona (españa): Marcombo, S.A.
- Monazami, R., & Haj-Hariri, H. (2012). A momentum integral model for prediction of steady operation and flooding in thermosyphons. *International Journal of Heat and*

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

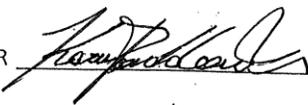
- Mass Transfer*, 55(19–20), 5102–5110.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.05.010>
- Ochterbeck, J. M. (2003). Heat Pipes. *Heat Transfer Handbook*, 1181–1230.
<https://doi.org/10.1201/9781420039870.ch57>
- Paris Londoño, L. S., & Mira Hernández, C. (2008). Construcción y Prueba de un Prototipo de Tubo de Calor de bajo costo para la aplicación en un colector de energía solar. *The Sixth International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2008)*. Retrieved from http://www.laccei.org/LACCEI2008-Honduras/Papers/ENE111_Paris.pdf
- Rathod, M. K., & Banerjee, J. (2013). Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 246–258. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.022>
- Reay, D., & Harvey, A. (2012). The role of heat pipes in intensified unit operations. *Applied Thermal Engineering*, 57(1–2), 147–153.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.04.002>
- Reay, D., & Kew, P. (2006). Heat pipe components and materials. *Heat Pipes: Theory, Design and Applications*, 108–110, 114, 122, 126–127,.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098266-3.00003-0>
- Rosas Zumelzu, C. (2015). Desarrollo Histórico de los Tubos de Calor y sus Aplicaciones. *50 CONTRIBUCIONES CIENTÍFICAS Y TECNOLÓGICAS*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/279467769_Desarrollo_Historico_de_los_Tubos_de_Calor_y_sus_Aplicaciones
- Sarafraz, M. M., & Hormozi, F. (2014). Experimental study on the thermal performance and efficiency of a copper made thermosyphon heat pipe charged with alumina-glycol based nanofluids. *Powder Technology*, 266, 378–387.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.06.053>
- Segovia, M. (2013). La Materia. Retrieved August 21, 2017, from <https://www.monografias.com/trabajos97/materia-monografia/materia->

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

monografia.shtml

- Shabgard, H., Xiao, B., Faghri, A., Gupta, R., & Weissman, W. (2014). Thermal characteristics of a closed thermosyphon under various filling conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 70, 91–102. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.10.053>
- Shanbedi, M., Heris, S. Z., Baniadam, M., Amiri, A., & Maghrebi, M. (2012). Investigation of heat-transfer characterization of EDA-MWCNT/DI-water nanofluid in a two-phase closed thermosyphon. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 51(3), 1423–1428. <https://doi.org/10.1021/ie202110g>
- Srimuang, W., & Amatachaya, P. (2012). A review of the applications of heat pipe heat exchangers for heat recovery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 4303–4315. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.030>
- Tanvir, S., & Qiao, L. (2012). Surface tension of Nanofluid-type fuels containing suspended nanomaterials. *Nanoscale Research Letters*, 7(1), 226. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-7-226>
- Toyoda, H., & Kondo, Y. (2013). Effect of Non-Condensable Gas Leakage on Long Term Cooling Performance of Loop Thermosyphon. *Journal of Electronics Cooling and Thermal Control*, 03(04), 131–135. <https://doi.org/10.4236/jectc.2013.34014>
- Vanyasree, G., & Ramana, P. V. (2017). EXPERIMENTAL ANALYSIS ON THERMOSYPHON HEATPIPE TO FIND HEAT TRANSFER COEFFICIENT, 129–136.
- Vasiliev, L. L., Grakovich, L. P., Rabetsky, M. I., Vassiliev, L. L., & Zhuravlyov, A. S. (2017). Thermosyphons with innovative technologies. *Applied Thermal Engineering*, 111, 1647–1654. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.101>
- Yang, C., Song, C., Shang, W., Tao, P., & Deng, T. (2015). Flexible heat pipes with integrated bioinspired design. *Progress in Natural Science: Materials International*, 25(1), 51–57. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2015.01.011>

FIRMA ESTUDIANTES Carlos Alberto Berrio B
Gabriel Hernandez Lujan
Jorge Marco Berrio B.

FIRMA ASESOR 

FECHA ENTREGA: _____

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: _____