

Estudio experimental de un termosifón bifásico operando con una mezcla naftaleno-agua

Luis H.R. Cisterna¹, Ana Supanta-Lovera², Felipe Badilla-Hernández³, Constanza Aguirre-Álvarez⁴, Alexis Jara-Montecinos⁵, Alexis Fuentealba-Orrego⁶, Mary Torrico-Claure⁷, Camilo Flores-Condori⁸

^{1, 2, 3, 4, 7, 8}Laboratorio de Termosifones Bifásicos – LABTER-UTA, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Tarapacá, Chile.

^{5, 6}Centro Avanzado de Manufactura – CAM-UTA, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Tarapacá, Chile.

¹lrodriguez@academicos.uta.cl, ²ana.supanta.lovera@alumnos.uta.cl, ³felipe.badilla.hernandez@alumnos.uta.cl, ⁴constanza.aguirre.alvarez@alumnos.uta.cl, ⁵alexis.jara.montecinos@alumnos.uta.cl, ⁶afuentealba@academicos.uta.cl, ⁷mctorricoc@academicos.uta.cl, ⁸cfflores@uta.cl,

Resumen

Este trabajo presenta un estudio comparativo de 2 termosifones bifásicos, el primero cargado con 40 ml de naftaleno y el segundo con una mezcla de 40 ml de naftaleno y 5 ml de agua. El termosifón con naftaleno inicio su operación a 300 W. A tasas de transferencia de calor inferiores a 300 W, la temperatura del condensador era inferior a la temperatura de fusión del naftaleno, que solidificaba en las paredes y obstruía el paso del vapor. El termosifón con la mezcla naftaleno-agua inicio su operación a 100 W y presentó temperaturas homogéneas en todo el dispositivo. Fueron comparadas las resistencias térmicas de ambos termosifones, mostrando que una cierta cantidad de agua en el termosifón de naftaleno permite mejorar el inicio de operación, así como operar con un desempeño hasta 4 veces mayor que un termosifón cargado solamente con naftaleno.

Palabras clave: Termosifones Bifásicos, naftaleno, fluidos inmiscibles.

Abstract

This paper presents a comparative study of 2 two-phase thermosyphons, the first one charged with 40 ml of naphthalene and the second one with 40 ml of naphthalene and 5 ml of water. The thermosyphon with naphthalene started at 300 W. At heat transfer rates below 300 W, the condenser temperature was below the melting temperature of the naphthalene, which solidified on the walls and obstructed the passage of vapor. The thermosyphon with the mixture of naphthalene-water started at 100 W and presented homogeneous temperatures throughout the device. The thermal resistances of both thermosyphons were compared, showing that a certain amount of water in the naphthalene thermosyphon allows to improve the startup, as well as to operate with a performance up to 4 times higher than a thermosyphon charged only with naphthalene.

Keywords: Two-phase thermosyphon; Naphthalene; Immiscible fluids.

1. Introducción

Los termosifones bifásicos son dispositivos altamente eficientes utilizados para transferir calor con pequeños gradientes de temperatura. Su funcionamiento está basado en el cambio de fase de un determinado fluido de trabajo. Este dispositivo es dividido en tres partes principales: evaporador, sección adiabática y condensador. Inicialmente el fluido de trabajo se encuentra en estado de saturación donde la mayor cantidad de se encuentra en estado líquido, depositado

en la sección del evaporador formando una piscina. El calor es insertado en el evaporador generando el cambio de fase del fluido de trabajo, el mecanismo principal de transferencia de calor en este caso es la ebullición nucleada en piscina. El vapor generado sube por diferencia de presión, pasando por la sección adiabática hasta llegar al condensador. En la sección del condensador el calor es disipado, siendo el principal mecanismo de transferencia de calor la condensación en película. El líquido condensado retorna al evaporador por la acción de la gravedad,

motivo por el cual el evaporador siempre debe ser posicionado por debajo del condensador [1].

En otras palabras, un termosifón bifásico es un tubo en vacío que opera en el ciclo cerrado de evaporización y condensación de un determinado fluido de trabajo. La correcta selección del fluido de trabajo es fundamental para la operación eficiente de este dispositivo. Diferentes criterios existen para la selección del fluido de trabajo, entre los que se destacan la temperatura de operación y el número de mérito [1]. Para aplicaciones entre 0°C y 250°C el fluido recomendado es agua. Para temperaturas entre 250°C a 450°C, son recomendados fluidos orgánicos, entre los cuales se destaca el naftaleno. El naftaleno es un fluido de trabajo que en condiciones ambientales se encuentra en estado sólido, dificultando enormemente el inicio de operación de los termosifones que utilizan este fluido. El punto de fusión del naftaleno es a 80,27 °C y su ebullición es a 218 °C, considerando una presión de 1 bar, prácticamente el doble cuando comparado con el agua que cambia de fase a los 100°C a la misma presión de referencia.

Diferentes trabajos en la literatura han utilizado el naftaleno como fluido de trabajo ([2] – [6]), mostrando su aplicabilidad en proyectos con temperaturas entre los 250°C a 450°C. Anderson [2], realizó un trabajo experimental para verificar la compatibilidad del naftaleno con diferentes materiales del termosifón. Los resultados obtenidos por este autor mostraron que el naftaleno es compatible con acero inoxidable, cobre-níquel y titanio. Además, mostró que para pruebas de vida útil a largo plazo las temperaturas óptimas para trabajar son a 320°C y superiores, además, demostró que para pruebas a corto plazo se debe trabajar a 380°C.

Mantelli *et al.* [3] relató que para la operación de termosifones bifásicos a temperaturas 250°C a 400°C, el mejor fluido de trabajo sería el naftaleno. Sin embargo, estos autores relatan una serie de dificultades a la hora de trabajar con este fluido. Una de las desventajas más comunes es la mantención constante de transferencia de calor lo largo del termosifón, ya que el naftaleno a temperatura ambiente es sólido, por lo que si el proyecto del dispositivo envuelve temperaturas en el condensador menores a la temperatura de fusión del naftaleno, este se solidifica, y quedarán porciones sólidas del naftaleno obstruyendo el paso de regreso del fluido condensado, produciendo así el secado parcial del dispositivo y la falla en la operación. Además, estos autores indican que contar con diferentes niveles de temperatura a lo largo de las superficies puede permitir una mejora significativa en el proceso. Para este tipo de aplicaciones, comúnmente son utilizados gases no condensables al interior del termosifón creando un perfil de temperatura suave a lo largo de la superficie.

El principal problema de esta configuración está asociado a la región con gas no condensable, la cual posee una baja conductividad térmica y consecuentemente disminuye la capacidad de transferencia de calor del dispositivo, lo cual debe ser considerado en el proyecto del termosifón.

En ese sentido, los trabajos de Mantelli *et al.* [3] y Kniess *et al.* [4] muestran que la presencia de este gas disminuye el desempeño térmico del termosifón si este es expuesto a bajas temperaturas, por lo que en altas temperaturas en la cual es sometido el naftaleno, el gas no condensable no afecta en la capacidad de transferencia de calor del dispositivo.

Carneiro *et al.* [5] estudiaron el uso en termosifones bifásicos de dos fluidos de trabajos inmiscibles (agua-naftaleno). Estos autores mostraron que, durante el régimen permanente, el agua operó en su ciclo de evaporización y condensación en la parte superior del dispositivo con una temperatura de operación bien definida y menor a 200°C. En el caso del naftaleno, este operó en la parte inferior del dispositivo a una temperatura mayor que 400°C. La interfaz entre estos dos fluidos es abrupta y bien definida y se encuentra influenciada por la cantidad de calor transferida en el dispositivo.

Milanez y Mantelli [6] realizaron un estudio experimental de termosifones bifásicos en circuito operando con naftaleno como fluido de trabajo. Estos autores observaron el congelamiento del naftaleno en el retorno del líquido condensado en la línea de líquido debido a las paredes de calor, este congelamiento impide el funcionamiento del dispositivo, mostraron que la utilización del termosifón en circuito de naftaleno presenta un desempeño adecuado si se eliminan las pérdidas térmicas de la línea de vapor que conecta el evaporador con el condensador, en caso de no existir un aislante térmico perfecta, que es lo que habitualmente ocurre en las aplicaciones industriales, la única forma de lograrlo es mediante el uso de calefacción auxiliar en las líneas de vapor. Sin un calentamiento auxiliar, como un calentador de protección, el vapor saturado puro no llega al condensador y el sistema deja de funcionar.

De esta forma, uno de los principales problemas presentados por el naftaleno es la solidificación durante el inicio de operación o durante el régimen permanente cuando la temperatura del condensador es menor al punto de fusión (80,27 °C). Sin embargo, si consideramos la viabilidad de operar un termosifón bifásico con dos fluidos de trabajo como demostrado por Carneiro *et al.* [5], es posible pensar que una pequeña cantidad de agua junto a una gran cantidad de naftaleno permita eliminar el problema de congelamiento del naftaleno durante el inicio de operación.

En ese contexto, el objetivo de este trabajo es estudiar experimentalmente el comportamiento de un termosifón bifásico operando con agua-naftaleno, con el objetivo de mejorar el inicio de operación del dispositivo y su régimen permanente cuando está expuesto a una temperatura en el condensador menor que la temperatura de fusión.

2. Metodología

2.1. Banco experimental

El objetivo principal de este experimento es observar el comportamiento de un termosifón bifásico operando con naftaleno como fluido de trabajo y una pequeña cantidad de agua para mejorar el desempeño térmico y acelerar el inicio de operación del dispositivo.

La Figura 1 muestra un esquema simplificado de la bancada experimental utilizada en este trabajo, la cual está formada por: una fuente de poder marca ISO-TECH, modelo IPS303DD (1); dos resistencias eléctricas tipo cartucho conectadas en paralelo con resistencia total de $29,1 \Omega$ (2); bloques de aluminio del tipo media caña de 200 mm de largo y 76 mm de diámetro, utilizados para la distribución homogénea del calor en el evaporador (3); sistema de adquisición de datos marca Agilent, modelo 34970a (4); computador (5); termopares tipo K con error promedio de $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (6); termosifón bifásico (7) y aislante térmico con conductividad térmica de $0,04 \text{ W/m}^2\text{K}$ (8).

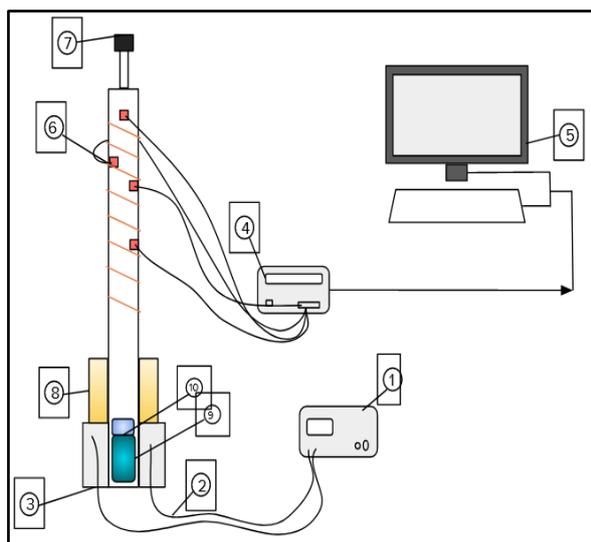


Figura 1: Esquema simplificado de la bancada experimental

El calor fue suministrado al evaporador a partir del sistema de resistencias acoplado a los bloques de aluminio y alimentado por la fuente de poder. El calor fue retirado en el condensador a través de un intercambiador de calor del tipo serpentín fabricado

con un tubo de cobre con diámetro nominal de $1/4''$ y espesor de $0,76 \text{ mm}$, como se muestra con más detalle en la Figura 2. El intercambiador de calor estaba conectado a un sistema de enfriamiento formado por una serie de mangueras de $1/4''$ y $1''$, una bomba de $0,5 \text{ HP}$, un estanque de aproximadamente $0,5 \text{ m}^3$ de agua a temperatura ambiente y un rotámetro con capacidad de medición de 4 a 18 g/s nominal y un error máximo de $0,2 \text{ g/s}$.

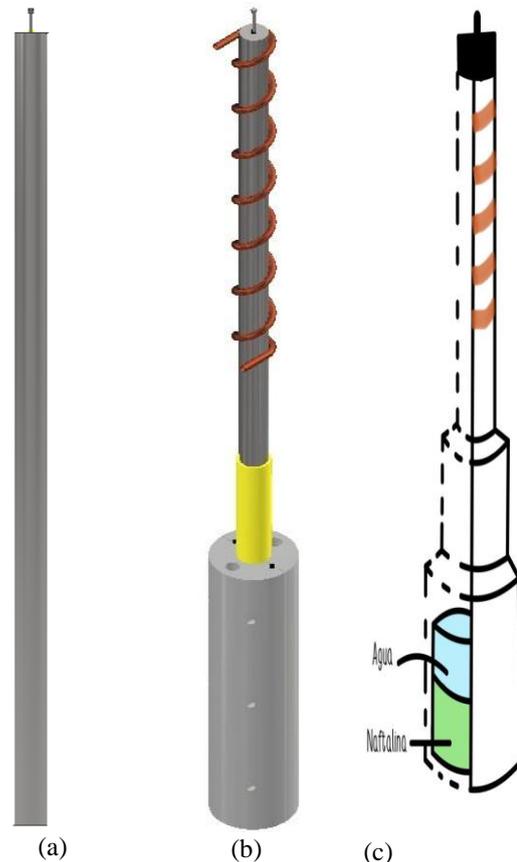


Figura 1. (a) termosifón, (b) termosifón con elementos añadidos, (c) Interior del termosifón

El termosifón bifásico fue fabricado y llenado siguiendo las especificaciones técnicas propuestas por Mantelli [1]. El material utilizado en el termosifón fue acero inoxidable 316L con diámetro externo de $25,4 \text{ mm}$, espesor de 1 mm y 750 mm de longitud total. Las dimensiones del evaporador, sección adiabática y condensador fueron respectivamente 200 , 100 y 350 mm . Una válvula Swagelok NK4719 55-4BK-VA fue conectada en la punta del termosifón para facilitar el llenado y el proceso de purga del dispositivo.

Para conocer el comportamiento de la temperatura a lo largo del dispositivo, fueron instalados 9 termopares tipo K, los cuales fueron distribuidos de forma equidistantes en cada una de las secciones del termosifón de la siguiente manera: 2 en el evaporador;

1 en la sección adiabática; y 6 en el condensador. Además, fueron instalados 2 termopares para analizar el sistema de enfriamiento, donde se instaló uno a la entrada y otro en la salida del intercambiador de calor.

2.2. Procedimiento Experimental

Dos grupos de experimentos fueron realizados con el objetivo de determinar el efecto en el desempeño e inicio de operación de un termosifón de naftaleno cuando opera con una mistura naftaleno-agua.

En un primer grupo de experimentos el termosifón fue cargado con 40 ml de naftaleno puro equivalentes a un factor de llenado de 47% (relación entre el volumen del fluido de trabajo y el volumen del evaporador) cuando el termosifón se encuentra a temperatura ambiente, cuando el termosifón se encuentra operando a 250°C y 350 °C, el factor de llenado es aproximadamente 50% y 56% respectivamente. Este termosifón fue denominado como Termosifón 1, el cual servirá como un comparativo de los efectos generados con la incorporación de agua al sistema. Este termosifón fue ensayado a 4 tasas de transferencia de calor: 100, 150, 200 y 300 W.

En el segundo grupo de experimento fue adicionado al termosifón 5 ml de agua destilada que equivalen a un factor de llenado de 6%, lo que corresponde a una relación entre los factores de llenado de la mezcla naftaleno-agua de aproximadamente 8, esto es, el volumen de la piscina de naftaleno en el evaporador es 8 veces mayor que el volumen ocupado por el agua. Esta configuración fue denominada Termosifón 2, el cual fue ensayado con 5 tasas de transferencia de calor: 100, 150, 200, 300 y 400 W.

Es importante destacar que en ambos grupos de experimento la condición de enfriamiento fue mantenida constante, con un flujo másico del agua de enfriamiento de $16,4 \pm 0,2$ g/s y la temperatura entre 23 a 25 °C. Además, las tasas de transferencia de calor utilizadas en ambos experimentos se aumentaron de forma progresiva cada vez que se alcanzaba el régimen permanente, el cual fue considerado establecido cuando la variación promedio en las temperaturas de cada una de las secciones del termosifón presentaban una variación no mayor a 0.5°C después de 10 min.

2.3. Tratamiento de datos

El estudio comparativo de los Termosifones 1 y 2 está basado en la comparación del inicio de operación de los dispositivos, es decir, la temperatura del vapor y la tasa de transferencia de calor que hacen que el dispositivo deje de comportarse como un tubo vacío y comience a comportarse como un superconductor de

calor. El otro análisis comparativo está asociado a las resistencias térmicas de los dispositivos durante el régimen permanente. Así, en este trabajo los parámetros utilizados para la comparación son la temperatura del vapor, la tasa de transferencia de calor y la resistencia térmica.

En el caso de la temperatura del vapor, esta es medida directamente a través de un termopar instalado en la sección adiabática, que según Mantelli [1] es la temperatura que mejor representa al vapor.

En el caso de la tasa de transferencia de calor y la resistencia térmica, estas no son obtenidas directamente y fueron determinadas respectivamente a través de las siguientes ecuaciones:

$$q = I \cdot V \quad (1)$$

$$R_T = \frac{T_e - T_c}{q} \quad (2)$$

donde q es la tasa de transferencia de calor en [W], I es la intensidad de corriente en [A], V es la tensión suministrada por la fuente de poder en [V], R_T es la resistencia térmica en [°C/W], T_e y T_c son las temperaturas promedio de la pared del evaporador y condensador respectivamente medidas en [°C].

3. Resultados

La Figura 3 muestra el comportamiento de las temperaturas promedio del Termosifón 1 en función del tiempo para cada una de las tasas de transferencia de calor testeadas. Se observa que cuando la tasa de calor es de 100W, las temperaturas del evaporador y condensador fueron aumentando de forma suave similar al comportamiento de una aleta, esto es, apenas por la conducción axial de las paredes del tubo. El punto (1) de la Figura 3 muestra el momento exacto donde fue realizado el proceso de purga en el Termosifón, con el objetivo de verificar si el comportamiento observado estaba siendo influenciado por la presencia de gases no condensables (GNC). Se observa que después de realizar el proceso de purga, la temperatura del evaporador aumento súbitamente, sin embargo, no fueron observado cambios en la temperatura del condensador. Cuando el régimen permanente fue alcanzado a 100 W, se observa que la temperatura promedio del condensador fue menor que la temperatura de fusión del naftaleno que es 80,26 °C, indicando que parte del condensador se encontraba con naftaleno en estado sólido, actuando como tapón que impide el paso del vapor hasta las regiones más extremas del condensador, similar a lo relatado en [3], [4] y [6].

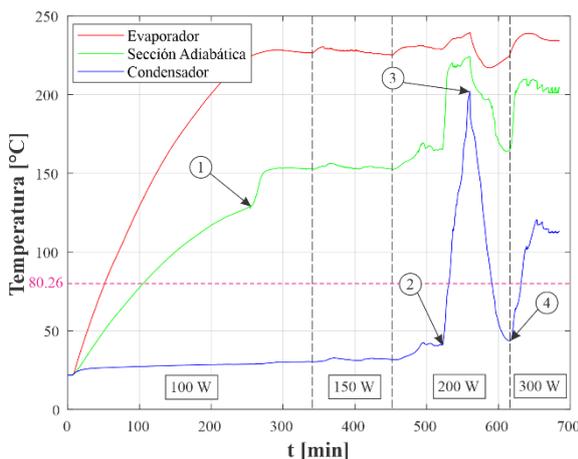


Figura 3. Temperaturas promedio del Termosifón 1 en función del tiempo.

Posterior a esto, se aumentó la tasa de transferencia de calor a 150 W, donde no se observaron grandes diferencias en relación a la tasa de calor anterior, sugiriendo nuevamente la existencia del problema de congelamiento en el condensador. La tasa de calor fue aumentada a 200 W y se esperó a que el sistema alcance el régimen permanente. Se observó un leve aumento en la temperatura del dispositivo, sin embargo, aún con la temperatura del condensador menor a 80,26°C, se infiere que el problema de congelamiento este asociado a la alta capacidad de enfriamiento del condensador, que establece su régimen permanente a temperaturas inferiores a la temperatura de fusión del naftaleno. Para probar la hipótesis anterior, fue desconectado el sistema de enfriamiento, evidenciado en el punto (2) de la Figura 3. Se observa un aumento súbito en la temperatura de vapor y condensador, alcanzando su máximo en el punto (3), donde el vapor de naftaleno alcanzó la parte superior del termosifón, descongelando el naftaleno en todo el dispositivo. Lo anterior comprueba la hipótesis de que el congelamiento del naftaleno está asociado a la alta capacidad de enfriamiento del condensador.

En el punto (3) nuevamente se conecta el sistema de enfriamiento del condensador. Se observa como abruptamente disminuyen las temperaturas en el evaporador, zona adiabática y condensador, volviendo a las condiciones establecidas antes del desligamiento del sistema como se muestra en el punto (4), esto es, las temperaturas del condensador vuelven a estar por bajo de la temperatura de fusión del naftaleno, evidenciando congelamiento en las partes superiores del condensador. Finalmente, la tasa de transferencia de calor fue aumentada a 300 W; con esta condición se observa el inicio de operación del termosifón, evidenciado por un aumento abrupto de la temperatura del vapor y condensador, el cual sobrepasa la temperatura de congelamiento para el naftaleno, operando como un superconductor de calor. En esta condición se observan pequeñas oscilaciones en la

temperatura de la zona adiabática y condensador, las cuales no pueden ser asociadas directamente al fenómeno de *Geyser Boiling* (GB), una vez que no fueron observadas estas oscilaciones en la sección del evaporador, según lo se menciona en [1] y [7].

La Figura 4 muestra el comportamiento de las temperaturas promedio del Termosifón 2 en función del tiempo para cada una de las tasas de transferencia de calor testeadas.

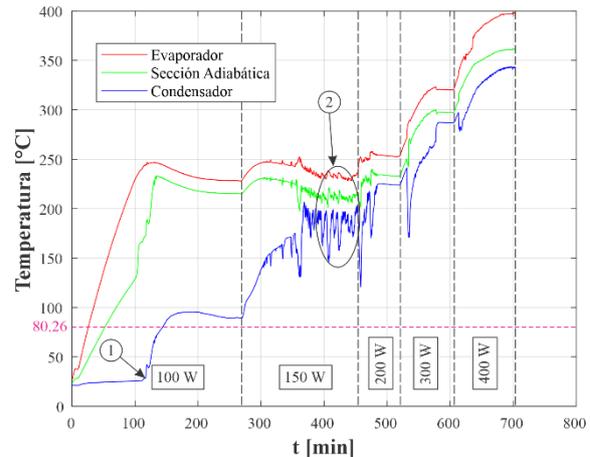


Figura 4. Temperaturas promedio del Termosifón 2 en función del tiempo.

Se puede observar que cuando la tasa de transferencia de calor fue de 100 W, el inicio de operación del Termosifón 2 ya es alcanzado, como se muestra en el punto (1) de la Figura 4, evidenciado por el aumento súbito de la temperatura del evaporador y condensador, donde todo el termosifón se encuentra a temperaturas mayores que el punto de fusión del naftaleno, es decir, que ya está operando sin ningún residuo de naftaleno sólido en el interior del termosifón. Este resultado muestra que la utilización de una pequeña cantidad de agua en el dispositivo, permite acelerar el proceso de inicio de operación en termosifones bifásicos operando con naftaleno como fluido de trabajo.

Al aumentar la tasa de transferencia de calor a 150 W, se observa que el termosifón operó en el régimen de GB, el cual se caracteriza por las oscilaciones simétricas en las partes del evaporador y condensador [7], lo cual se puede ver en el punto (2) de la Figura 4. Cuando el Termosifón 2 operó a 200 W, el fenómeno de GB no se observó más. A partir de 200W hasta 400W, el Termosifón 2 se comporta como un superconductor de calor, consiguiendo transferir el calor impuesto en el evaporador con pequeñas diferencias de temperatura entre el evaporador y el condensador.

Finalmente, es realizada una comparación del desempeño térmico de ambos termosifones, es decir,

de la capacidad de transferir calor. Para esto es utilizado el gráfico de la Figura 5, donde se presenta la resistencia térmica de los dispositivos en función de la tasa de transferencia de calor.

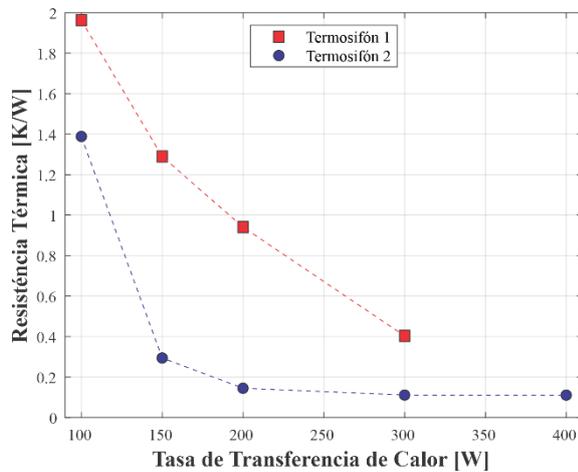


Figura 5. Resistencias térmicas de los Termosifones 1 y 2 en función de la tasa de transferencia de calor.

Se observa que para todas las tasas de transferencia de calor estudiadas el Termosifón 2 siempre presenta menor resistencia térmica que el Termosifón 1, mostrando que para las tasas de transferencia de calor estudiadas, una cierta cantidad de agua en el termosifón de naftaleno permite no solamente mejorar el inicio de operación del dispositivo, sino que también operar en el régimen permanente con un desempeño hasta 4 veces mayor si nos basamos apenas en la tasa de transferencia de calor de 300 W que es donde el Termosifón 1 comenzó a operar como superconductor de calor.

4. Conclusiones

Los experimentos realizados con el termosifón operando solamente con naftaleno como fluido de trabajo mostró que la tasa de transferencia de calor en la cual el dispositivo comienza a operar como un superconductor de calor es de 300 W, anterior a esto, el termosifón no logra iniciar su operación debido a que el condensador no alcanza la temperatura de fusión del naftaleno, por lo que al condensarse el naftaleno, se comienza a solidificar en las paredes interiores del termosifón actuando como un tapón que impide el paso del vapor, retrasando así el inicio de operación de este.

Por otra parte, los experimentos realizados con el termosifón que utiliza la mezcla de naftaleno-agua, mostraron que el inicio de operación del termosifón ocurre a tan solo 100 W. Esto se debe a que el agua cambia de fase antes que el naftaleno, permitiendo así aumentar de manera uniforme la temperatura de las

paredes por arriba de la temperatura de fusión del naftaleno, evitando así el congelamiento de este fluido de trabajo.

Se puede ver que la resistencia térmica del termosifón que contiene una pequeña cantidad de agua es menor a la resistencia térmica del termosifón que funciona solo con naftaleno, es decir, que la utilización de una pequeña cantidad de agua en la operación del termosifón no sólo acelera el proceso de inicio de operación, sino también mejora el desempeño del dispositivo.

El termosifón de agua y naftaleno operó según lo esperado de un termosifón convencional sin manifestar diferencias de la presencia del agua en este dispositivo como lo fue mostrado por Carneiro *et al.* [5], donde se observó que para una cierta cantidad de agua se separaban las temperaturas en el condensador, evidenciando claramente la presencia de un termosifón de agua y un termosifón de naftaleno por separado. En este caso, con la proporción de agua que se trabajó no fue posible observar este fenómeno. Es importante destacar que esto puede ser acontecido debido a las bajas potencias utilizadas en este estudio en relación a las potencias utilizadas en [5].

Finalmente, se recomienda en estudios futuros la utilización de distintas tasas de transferencia de calor con el fin de identificar la transición entre lo observado en este trabajo y lo presentado por Carneiro *et al.* [5]. Por otra parte, se recomienda investigar cuáles serían las proporciones de naftaleno-agua que permiten maximizar el desempeño del termosifón y mejorar el inicio de operación del dispositivo.

5. Referencias

- [1] Mantelli, M. B. H. (2021). *Thermosyphons and Heat Pipes: Theory and Applications* (2021 ed.). Springer.
- [2] Anderson, W.(2007). “Intermediate temperature fluids for heat pipes and loop heat pipes 5th International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC)”.
- [3] Mantelli, M. B. H. , Angelo, W. B., & Borges, T. (2010). “Performance of naphthalene thermosyphons with non-condensable gasses - Theoretical study and comparison with data”. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(17-18).
- [4] Kniess, CT, Mantelli, MBH, Cunha, A., Martins, GJM, Nuernberg, GV, Angelo, W., ... Coelho, CE (2007). “Estudio experimental de termosifones de mercurio y naftalina”. En la 14ª Conferencia Internacional de Tubos de Calor.
- [5] CARNEIRO, Julia F., et al. *EXPERIMENTAL STUDY OF A TWO-PHASE CLOSED THERMOSYPHON CHARGED WITH AN*

IMMISCIBLE MIXTURE. Heat Pipe Science and Technology, An International Journal, 2014, vol. 5, no 1-4.

[6] Milanez, F. H & Mantelli, M. B. H. (2016). "A two-phase loop Thermosyphon with Naphthalene as Working Fluid". 16th International Heat Pipe Conference (16th IHPC).

[7] Cisterna, L. H., Milanez, F. H., & Mantelli, M. B. (2021). Prediction of geyser boiling limit for high temperature two-phase thermosyphons. International Journal of Heat and Mass Transfer, 165, 120656. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120656>