

# Estudio experimental de termosifones bifásicos con relación largo-diámetro interno constante para aplicaciones geotérmicas

Matías Salinas Moreno<sup>1</sup>, Nelson Melo Arce<sup>2</sup>, Alexis Gabriel Fuentealba Orrego<sup>3</sup>, Mary Torrico Claire<sup>4</sup>, Camilo Flores Condori<sup>5</sup>, Luis H.R. Cisterna<sup>6</sup>.

<sup>1,2,5,6</sup>Laboratorio de Termosifones Bifásicos – LABTER-UTA, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Tarapacá, Chile.

<sup>3,4</sup>Centro Avanzado de Manufactura- CAM-UTA, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Tarapacá, Chile.

<sup>1</sup>[matias.ism.cl@gmail.com](mailto:matias.ism.cl@gmail.com), <sup>2</sup>[nelsonrmelo@gmail.com](mailto:nelsonrmelo@gmail.com), <sup>3</sup>[afuentealba@academicos.uta.cl](mailto:afuentealba@academicos.uta.cl), <sup>4</sup>[mctorricoc@academicos.uta.cl](mailto:mctorricoc@academicos.uta.cl),

<sup>5</sup>[cflores@uta.cl](mailto:cflores@uta.cl), <sup>6</sup>[lrodriguez@academicos.uta.cl](mailto:lrodriguez@academicos.uta.cl)

## Resumen

En este trabajo se estudió experimentalmente la validez de la relación largo-diámetro interno (L/D) como herramienta de escalamiento en termosifones bifásicos extralargos para aplicaciones geotérmicas. Fueron estudiados dos termosifones con diferentes dimensiones, manteniendo la relación L/D=110. Los resultados obtenidos muestran que el termosifón de menor tamaño y mayor diámetro operó a temperaturas de vapor mayores (hasta de 20°C) y resistencias térmicas menores (hasta 40%), mostrando que la relación L/D no es suficiente para escalar termosifones sin perder informaciones fundamentales de la operación de estos dispositivos. Fue propuesta una longitud característica, dada por  $D^2/L$ , permite reducir significativamente las diferencias entre las resistencias térmicas de ambos termosifones. Sin embargo, se sugiere que el escalamiento de termosifones bifásicos extralargos no envuelva solo aspectos geométricos del dispositivo, sino que también incluya propiedades termofísicas del fluido de trabajo, las cuales son afectadas significativamente por la temperatura de operación del vapor.

**Palabras clave:** Termosifones bifásicos; relación largo-diámetro interno; geotermia; *Hot Dry Rock*.

## Abstract

In this work, the validity of the length-to-inner diameter ratio (L/D) as a scaling tool in extra-long two-phase thermosyphons for geothermal applications has been experimentally studied. Two thermosyphons with different dimensions were studied, maintaining the L/D=110. The results obtained show that the thermosyphon of smaller size and larger inner diameter operated at higher vapor temperatures (up to 20°C) and lower thermal resistances (up to 40%), showing that the L/D ratio is not sufficient to scale thermosyphons without losing fundamental information on the operation of these devices. It was proposed a characteristic length, given by  $D^2/L$ , allows to significantly reduce the differences between the thermal resistances of both thermosyphons. However, it is suggested that the scaling of extra-long two-phase thermosyphons should not only involve geometrical aspects of the device, but also include thermophysical properties of the working fluid, which are significantly affected by the operating vapor temperature.

**Keywords:** Two-phase thermosyphon; length-to-inner diameter ratio; geothermic; *Hot Dry Rock*.

## 1. Introducción

La energía geotérmica es un tipo de recurso energético el cual tiene sus reservas en las profundidades de la tierra, donde el calor es extraído y utilizado para generar electricidad en usos industriales, agrícolas y domésticos [1]. También la energía geotérmica es considerada uno de los recursos bajos en contenidos de carbono más prometedores y capaces de reemplazar a los combustibles fósiles [2]. Los sistemas existentes para la extracción de este recurso se pueden dividir en dos tipos: Sistema geotérmico convencional

(Hidrotermal) y sistema geotérmico mejorado también conocido como *Hot Dry Rock* (HDR) [3]. Las actuales plantas geotérmicas utilizan generalmente la tecnología del vapor *flash* y seco, adecuadas para zonas con altas temperaturas y grandes profundidades, creando limitaciones geográficas para su implementación. Por otro lado, los sistemas *Hot Dry Rock* pueden ser implementados en regiones con menor potencial geotérmico en comparación con el sistema convencional y no necesariamente cerca de fuentes de agua termales [3]. Existen tres tipos de tecnologías que pueden ser utilizadas en los sistemas *Hot Dry Rock*,

estos son *Engineered Geothermal System (EGS)*, este describe el diseño de un depósito de calor para aumentar la permeabilidad del HDR. Se requieren al menos de dos perforaciones profundas que se crucen con las fisuras; el agua de la plataforma se inyecta a través de un pozo en una de las perforaciones y sale por la otra transportando el calor del HDR conducido a la profundidad de la tierra hacia el suelo, *Downhole Heat Exchanger (DHE)* Este sistema utiliza una tubería en U a través del cual el fluido de trabajo bombeado extrae el calor conducido a la pared de la tubería desde el HDR; *Super-Long Geothermal Heat Pipe (SLGHP)* [4]. El SLGHP opera en un circuito cerrado de evaporación y condensación. Mediante el principio de termosifones bifásicos el SLGHP transfiere calor desde el evaporador (Alta temperatura) hacia el condensador (Baja temperatura). El vapor es formado en el evaporador y sube hasta el extremo del tubo para transportar el calor e intercambiarlo con el ambiente. Durante este proceso, el vapor es condensado y vuelve al evaporador por acción de la gravedad cerrando el ciclo. Como el mecanismo de transferencia de calor en este dispositivo es el calor latente de cambio de fase, los gradientes de temperaturas generados desde la base del evaporador hasta el condensador son mínimos. Por lo tanto, la temperatura del fluido de trabajo no tiene un aumento considerable, por lo que los SLGHP se comportan como superconductores de calor, lo que amplía la viabilidad de utilizar esta tecnología para la extracción de calor por el sistema HDR [4].

Se debe señalar que los *heat pipe* o tubos de calor, cuando trabajan sin medios porosos también son conocidos como termosifones bifásicos, los cuales se utilizan en diversas aplicaciones que van desde enfriamiento de dispositivos electrónicos hasta sistemas de disipación térmica en reactores nucleares [5]. Los termosifones bifásicos son dispositivos de transferencia de calor altamente eficientes que utilizan como principio de trabajo ciclos bifásicos de fluidos. Estos dispositivos consisten en un tubo sellado al vacío, al cual se le introduce una cantidad controlada de fluido de trabajo el que pasa por un ciclo cerrado de evaporación y condensación. Estos dispositivos son divididos en tres zonas: el evaporador, donde se le inserta calor y se lleva a cabo la evaporación; la zona adiabática, que se encuentra aislada térmicamente y el condensador, en donde ocurre la condensación [4]. Para la aplicación de estos dispositivos en la industria geotérmica, hay que tener en cuenta las grandes profundidades que deben ser alcanzadas para explotar las reservas geotérmicas, lo que conlleva a desarrollar termosifones bifásicos super largos. Estos dispositivos presentan grandes dificultades a la hora de ser ensayados en laboratorios, debido a sus grandes dimensiones o por la falta de métodos para escalar que nos permitan reducir el tamaño del dispositivo sin

perder los principales fenómenos físicos asociados a su geometría.

Diversos autores en la literatura mencionan la existencia de una relación L/D (largo-diámetro interno) como un factor clave para el desarrollo de estos dispositivos a gran escala. Esta relación indica cuan grande es el largo del termosifón bifásico en comparación al diámetro interno. Seo *et al.* [6] y [7], estudiaron el comportamiento sobre el límite de arrastre y el rendimiento en grandes L/D. Estos autores llegaron a la conclusión que se necesitan más estudios empíricos para conseguir completar un modelo matemático que incluya esta relación en los límites de arrastre y en el desempeño térmico de estos dispositivos. Adicionalmente usando herramientas de ajustes de curvas de primer orden, estos autores determinaron una relación entre L/D y el límite de arrastre para tubos de calor.

Lin *et al.* [8], experimento sobre termosifones bifásicos superlargos para aplicaciones geotérmicas, dentro de su investigación se observa que uno de los limitantes operativos más problemáticos es el límite de arrastre para termosifones bifásicos de alta relación L/D mayores a 1200 según las dimensiones utilizadas en el experimento [8].

Cen *et al.* [9] estudió el rendimiento de transferencia de calor de un tubo de calor asistido por gravedad utilizando una relación L/D muy alta (1700 aprox según dimensiones del experimento). Los resultados experimentales obtenidos por los investigadores indicaron que los tubos de calor super largos con una relación L/D extremadamente grande, pueden trabajar con un correcto funcionamiento.

Chen *et al.* [10] realizó un estudio experimental sobre un tubo de calor extralargo asistido por gravedad de gran relación L/D (>5000), donde se observan los regímenes de flujo multifásico al interior del tubo de calor y como estos se relacionaban como el rendimiento del dispositivo. En base a los resultados de la experimentación, se observó que el termosifón super largo funciona en cuatro regímenes de flujo distintos, uno de ellos provocado directamente por la alta relación L/D utilizada. El régimen de ebullición en géiser donde la temperatura de la superficie muestra fluctuación periódica. La ebullición en géiser es más probable que ocurra en tubos de calor super largos con alta relación L/D [10]. La ebullición en géiser es un fenómeno de inestabilidad que pueden presentar los termosifones, está relacionada con la expansión abrupta del vapor en el evaporador [11].

De esta forma, la gran capacidad de transferencia de calor de los termosifones bifásicos los hace ideales para su aplicación en la industria geotérmica. Sin embargo, los principales desafíos enfrentados están asociados a la dificultad y riesgo de trabajar con termosifones de longitudes que pueden llegar hasta 100 m, sin contar antes con un estudio en escala de laboratorio, el cual debe representar de forma fidedigna los principales fenómenos físicos asociados a la longitud termosifón.

Entre los trabajos presentados anteriormente la relación L/D es mencionada como una alternativa de analizar el desempeño y los límites operacionales en termosifones bifásicos super largos. Sin embargo, ningún trabajo de la literatura ha presentado un estudio manteniendo la relación L/D constante como una alternativa de escalamiento de este tipo de dispositivos. En ese contexto, el objetivo de este trabajo es estudiar experimentalmente dos termosifones bifásicos de cobre con una relación L/D constante e igual a 110, de manera de comparar el desempeño térmico de estos dispositivos y verificar si es posible escalar termosifones apenas con el uso de la relación L/D, enfocado a aplicaciones geotérmicas.

## 2. Metodología

En este trabajo, es propuesto un montaje experimental para la medición del calor transferido por dos termosifones bifásico de distintas longitudes y diámetros, pero manteniendo una relación L/D constante, con el objetivo de analizar el desempeño de los sistemas.

### 2.1. Montaje experimental

En la Figura 1, se muestra el banco experimental utilizado en este trabajo, el cual está formado por cuatro partes: Termosifón bifásico; Sistema de alimentación de calor, formado por una resistencia eléctrica de hilo con resistencia eléctrica, alimentado por una fuente de poder marca ISO-TECH, modelo IPS303DD; Sistema de adquisición de datos, formado por un sistema de adquisición de datos marca Agilent, modelo 34970a, el cual registra los valores de temperatura del termosifón a partir de la utilización de termopares del tipo K con error máximo de  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ ; Sistema de enfriamiento formado por un intercambiador de calor tipo serpentín, construido con una tubería de cobre tipo M de  $\frac{1}{4}$ " conectada a un banco hidráulico que se encarga de bombear agua hacia el intercambiador de calor tipo serpentín que rodea la zona del condensador. El agua se encuentra a temperatura ambiente ( $25\text{-}30^\circ\text{C}$ ) y circula con un flujo másico medido con un rotámetro con rango de medida de 4 a 18 g/s y un error máximo de  $\pm 0,2$  g/s.

Fueron fabricados 2 termosifones bifásicos de cobre (Figura 2 a), con diferentes dimensiones (Tabla 1), manteniendo constante la misma relación L/D en 110 [12]. El fluido de trabajo utilizado fue agua desionizada con un factor de llenado del 100%, esto es, con la relación entre el volumen del fluido de trabajo y el volumen del evaporador igual a 1. Los diámetros nominales de los termosifones estudiados fueron de  $\frac{3}{8}$ " y  $\frac{1}{2}$ ", donde la relación entre el largo del evaporador ( $l_e$ ), sección adiabática ( $l_a$ ) y condensador ( $l_c$ ) es calculada de manera que las áreas del evaporador y las áreas del condensador sean iguales

para equiparar los flujos de calor transferidos por los dispositivos.

El termosifón con diámetro nominal  $\frac{1}{2}$ " fue fabricado con un largo total de 1532 mm y una relación entre las medidas de sus secciones  $l_e:l_a:l_c=1:3:1$ , basándose en el trabajo de Wang *et al.* [12]. El termosifón con diámetro nominal  $\frac{3}{8}$ " fue fabricado con un largo total de 1191 mm y una relación  $l_e:l_a:l_c=1:1,13:1$ , con el objetivo de mantener las áreas del evaporador y del condensador iguales en ambos termosifones, esto es, contar con una condición de tasa de transferencia de calor y flujo de calor constantes en ambos casos.

Los termosifones fueron instrumentados con 8 termopares tipo K distribuidos en las 3 zonas del termosifón (3 en el evaporador, 2 en la sección adiabática y 3 en el condensador), además, dos termopares tipo k fueron conectados en la entrada y la salida del intercambiador de calor tipo serpentín, de manera de controlar la temperatura del fluido de enfriamiento durante toda la operación del dispositivo. Finalmente, los termosifones fueron aislados térmicamente con lana de vidrio con conductividad térmica de  $0.04 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  (Figura 2 b)).

Tabla 1. Dimensiones de los termosifones

Dimensiones						
	L (mm)	$D_{in}$ (mm)	$L_a$ (mm)	$L_e$ (mm)	$L_c$ (mm)	$\Phi$ mm
1	1191	10,83	381	431	381	110
2	1532	13,93	307	920	307	110

### 2.2. Procedimiento Experimental

El desempeño de cada dispositivo será analizado a 7 tasas de transferencia de calor diferentes, que van desde 10 a 75W. Como es mencionado anteriormente fue suministrado al evaporador mediante una resistencia eléctrica de hilo de  $28 \Omega$  para el termosifón de  $\frac{3}{8}$ " y  $24,5 \Omega$  para el termosifón de  $\frac{1}{2}$ " conectadas a la fuente de poder. El calor suministrado en el evaporador es transportado por el vapor hasta el condensador donde es disipado por medio del intercambiador de calor tipo serpentín, por el cual circula un flujo másico constante para todos los casos de  $18,1 \pm 0,2$  g/s.

Para ambos termosifones el experimento inicio con una tasa de transferencia de calor de 25W y se consideró como régimen permanente cuando la variación de las temperaturas promedio de cada sección después de 10 minutos fue menor que  $0,5^\circ\text{C}$ . Una vez el régimen permanente es alcanzado la tasa de transferencia de calor fue aumentada en 50 W y posteriormente en 75 W que corresponde a la máxima tasa de transferencia de calor estudiada. Finalmente, las tasas de transferencia de calor fueron disminuidas para 60, 40, 20 y 10 W con el objetivo de analizar la histéresis del dispositivo.

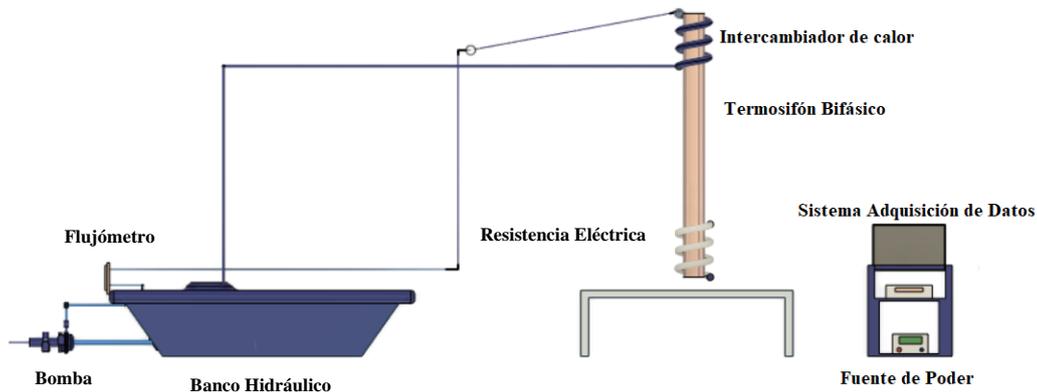


Figura 1. Esquema del banco experimental

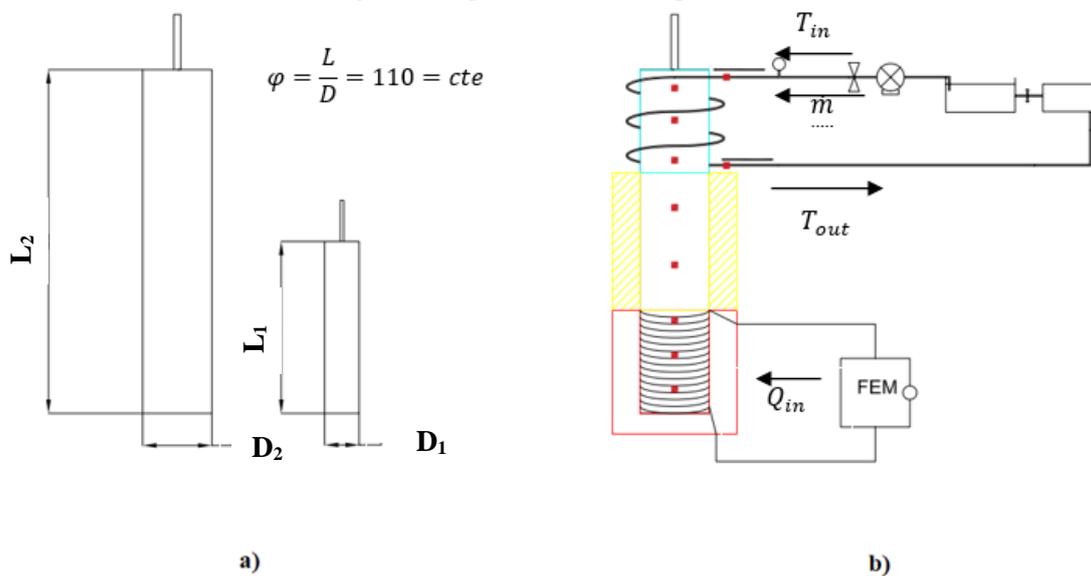


Figura 2. a) Plano bifásicos b) Esquema funcionamiento experimento

En total se realizaron 14 experimentos, los cuales buscan verificar si es posible escalar termosifones bifásicos super largos manteniendo una relación L/D constante.

Tabla 2. Potencias y voltajes de cada termosifón.

Tabla de potencias para el termosifón 1 y 2			
Termosifón 1 (3/8")		Termosifón 2 (1/2")	
V[V]	P [W]	V[V]	P [W]
26,5	25	24,8	25
37,4	50	35	50
45,8	75	42,9	75
41	60	38,3	60
33,5	40	31,3	40
23,7	20	22,1	20
16,7	10	15,7	10

### 2.3. Tratamiento de datos

Para analizar el desempeño de los termosifones es necesario calcular la cantidad de calor transferido y las resistencias térmicas presentes en el sistema, las cuales son presentadas a continuación.

#### 2.3.1. Tasa de calor

El calor insertado por la fuente de poder al termosifón bifásico se calcula mediante la ley de Joule:

$$q_{in} = I \times V \quad (1)$$

Donde I es la intensidad de corriente y V es el voltaje suministrado por la fuente de poder.

#### 2.3.2. Resistencia térmica

Las resistencias térmicas en el evaporador y en el condensador Son determinadas por las siguientes relaciones [5]:

$$R_e = \frac{T_e - T_v}{q_e} \quad (2)$$

Donde  $T_e$  es la temperatura en el evaporador,  $T_v$  es la temperatura del vapor y  $q_e$  es la resistencia térmica en el evaporador.

$$R_c = \frac{T_v - T_c}{q_c} \quad (3)$$

Donde  $T_c$  es la temperatura en el condensador,  $T_v$  es la temperatura del vapor y  $q_c$  es la resistencia térmica en el condensador.

### 3. Resultados

Las Figuras 3 (termosifón 1) y 4 (termosifón 2) muestran el comportamiento de las temperaturas medias del evaporador, sección adiabática y condensador en función del tiempo para cada una de las tasas de transferencia de calor estudiadas en este trabajo.

Se observa que ambos termosifones presentan grandes oscilaciones en las temperaturas cuando la tasa de calor transferida fue inferior a 25 W. Estas oscilaciones pueden ser atribuidas al fenómeno de *Geysier Boiling*, el cual es caracterizado por las oscilaciones simétricas de la temperatura del evaporador y condensador [11], es decir, cuando aumenta abruptamente la temperatura del evaporador, las temperaturas de la zona adiabática y el condensador disminuyen abrupta e instantáneamente. De la misma forma, cuando la temperatura del evaporador disminuye abruptamente, las temperaturas de las demás secciones aumentan instantáneamente, evidenciando el ciclo de liberación y formación de burbujas de vapor durante el régimen de *Geysier Boiling* [13]-[14].

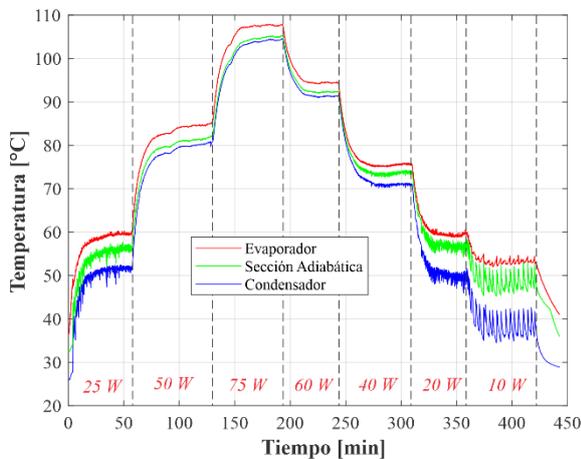


Figura 3. Comportamiento de las temperaturas del termosifón 1 en función del tiempo.

Además, se observa que el termosifón 2 (Figura 4) independientemente de la tasa de transferencia de calor

analizada, siempre alcanzó el régimen permanente a temperaturas significativamente menores que las registradas en el termosifón 1 (Figura 3), lo cual puede llevar a pensar que el termosifón 2 operó con un desempeño mayor que el termosifón 1.

Lo anterior puede ser mejor representado a través del gráfico de la temperatura de vapor en función de la tasa de calor presentado en la Figura 5. Este tipo de gráfico es usualmente utilizado para evaluar gráficamente el desempeño en termosifones bifásicos, donde se considera que el dispositivo que opera con mejor desempeño es aquel que presenta menor temperatura de vapor para una misma tasa de transferencia de calor [5].

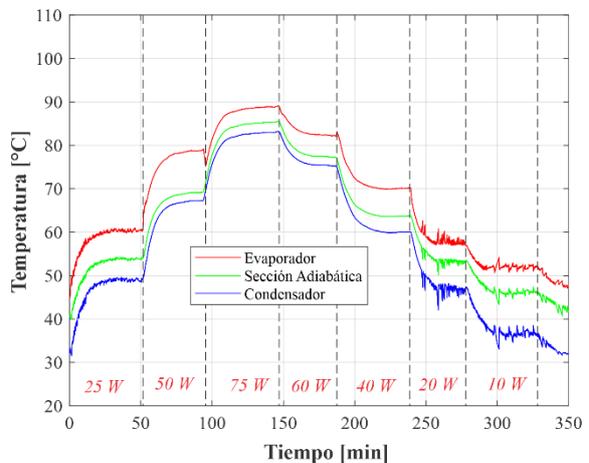


Figura 4. Comportamiento de las temperaturas del termosifón 2 en función del tiempo.

De esta forma, se observa en la Figura 5 que el termosifón 2 presenta mejor desempeño que el termosifón 1, donde las diferencias son incrementadas a la medida que la tasa de transferencia de calor aumenta, por ejemplo, existe una diferencia de aproximadamente 3°C para a tasa de transferencia de calor de 10 W y de aproximadamente 20°C para la tasa de transferencia de calor de 75W. Estos resultados muestran que la relación L/D constante no es suficiente para conseguir escalar termosifones bifásicos, analizando desde el criterio comparativo de la temperatura de vapor en función de las tasas de transferencia de calor.

Otra forma de analizar el desempeño de los termosifones bifásicos es a partir de la comparación de las resistencias térmicas en función de la tasa de transferencia de calor, lo que es mostrado en la Figura 6. Se observa que para potencias menores que 20 W, las resistencias térmicas de ambos termosifones es prácticamente igual, con una diferencia en promedio menor a 5%. Sin embargo, para tasas de transferencia de calor mayores que 20 W, se observa un aumento significativo en las diferencias de las resistencias de estos termosifones. El termosifón 1 presenta una resistencia térmica de por lo menos 40% mayor que la

observada en el termosifón 2, lo que sugiere, según este criterio, que el termosifón 1 es el que presenta mejor desempeño térmico, contraponiéndose a las conclusiones obtenidas con el gráfico de la Figura 5. No obstante, al igual que en el criterio anterior, los resultados indican que la relación  $L/D$  constante, no es suficiente para conseguir escalar termosifones bifásicos, que es el foco principal de este trabajo.

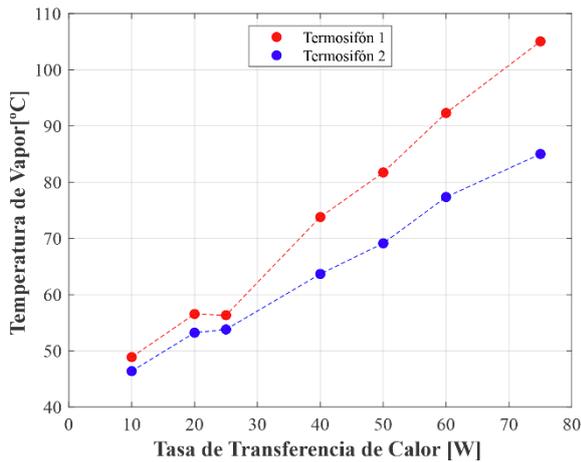


Figura 5. Desempeño de los termosifones en función de la temperatura de vapor y la tasa de transferencia de calor.

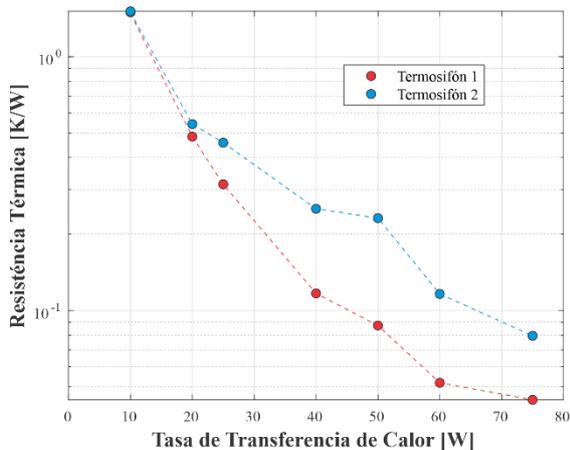


Figura 6. Resistencias térmicas en función de la tasa de transferencia de calor.

La Figura 7 presenta un gráfico entre las resistencias térmicas de ambos termosifones en función de la tasa de transferencia de calor por unidad de longitud característica del termosifón bifásico, la cual es definida:

$$L_c = \frac{D_{in}^2}{L} \quad (4)$$

El objetivo principal de este gráfico es delinear una nueva opción en la búsqueda de una relación entre el

largo y el diámetro interno que permita escalar termosifones bifásicos extralargos.

Se observa en la Figura 7 que las diferencias entre las resistencias térmicas de ambos termosifones fueron reducidas en comparación con el gráfico de la Figura 6. Es importante resaltar que la utilización de la longitud característica produjo un desplazamiento no simétrico en las resistencias térmicas de los dispositivos, lo que dificulta la comparación directa (Figura 7). De esta forma, un método de interpolación lineal fue utilizado para determinar las diferencias en los valores de la resistencia en ambos termosifones. Los resultados obtenidos muestran que la diferencia entre las resistencias térmicas de los dos termosifones fue siempre menor a 30%, valor que es menor al observado en el gráfico de la Figura 6, pero aún lo suficientemente grande como para concluir que apenas con la utilización de la longitud característica (ecuación 4) es suficiente para el escalamiento de termosifones bifásicos extralargos. Así, se sugiere la realización de más experimentos con termosifones de diferentes dimensiones, pero manteniendo constante la longitud característica de la ecuación (4). Además, se debe considerar que las diferencias observadas en las temperaturas de vapor de ambos termosifones (Figura 5), genera cambios significativos en las propiedades termofísicas del fluido de trabajo, principalmente en la densidad y la viscosidad que son las propiedades asociadas en la interacción entre el vapor que sube desde el evaporador hasta el condensador y el líquido condensado que baja desde el condensador hasta el evaporador, generando una interfase que envuelve tanto fuerzas viscosas como fuerzas de inercia [5]. Esta información debe ser considerada cuando el objetivo es obtener una relación que permita escalar termosifones bifásicos extralargos.

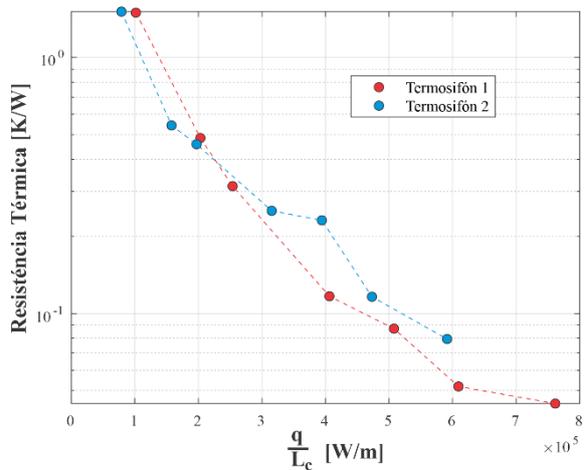


Figura 7. Resistencias térmicas en función de la tasa de transferencia de calor por unidad de longitud característica.

#### 4. Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo fue verificar si la relación entre el largo total del termosifón y el diámetro interno del dispositivo es suficiente para el escalamiento de termosifones bifásicos extralargos.

Fueron estudiados dos termosifones bifásicos con diferentes dimensiones, manteniendo constante la relación L/D.

Fue analizado el desempeño térmico de los dispositivos, donde se observó que el termosifón 1 operó con temperaturas de vapor mayores (diferencias hasta de 20°C) y resistencias térmicas menores (diferencias mayores a 40%) que el termosifón 2, para todas las tasas de transferencia de calor estudiadas.

A partir de estos resultados se concluye que la relación geométrica L/D constante no es suficiente para escalar termosifones bifásicos.

Una longitud característica fue propuesta para reducir las diferencias entre las resistencias térmicas de ambos termosifones, obteniendo diferencias menores a 30%. Sin embargo, se sugiere la realización de nuevos experimentos con termosifones bifásicos con diferentes dimensiones y longitud característica constante. Además, se sugiere que el análisis de escalamiento de termosifones bifásicos extralargos no envuelva apenas aspectos geométricos del dispositivo, sino que también incluya propiedades termofísicas del fluido de trabajo como la densidad y la viscosidad.

## 5. Referencias

- [1] Gupta, H. K., & Roy, S. (2006). *Geothermal Energy: An Alternative Resource for the 21st Century* (1.ª ed.). Elsevier Science.
- [2] Kubik, M. (2006). The Future of Geothermal Energy. *The Future of Geothermal Energy*. <https://doi.org/10.2172/1220063>
- [3] Aghahosseini, A., & Breyer, C. (2020). From hot rock to useful energy: A global estimate of enhanced geothermal systems potential. *Applied Energy*, 279, 115769.
- [4] Huang, W., Cen, J., Chen, J., Cao, W., Li, Z., Li, F., & Jiang, F. (2022). Heat extraction from hot dry rock by super-long gravity heat pipe: A field test. *Energy*, 247, 123492. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123492>
- [5] Mantelli, M. B. H. (2021). *Thermosyphons and Heat Pipes: Theory and Applications* (2021 ed.). Springer.
- [6] Seo, J., Bang, I. C., & Lee, J. Y. (2016). Length effect on entrainment limit of large-L/D vertical heat pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 97, 751-759.
- [7] Seo, J., & Lee, J. Y. (2016). Length effect on entrainment limitation of vertical wickless heat pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 101, 373-378.
- [8] Lin, T., Quan, X., & Cheng, P. (2022). Experimental investigation of superlong two-phase closed thermosyphons for geothermal utilization. *International Journal of Thermal Sciences*, 171, 107199. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.107199>
- [9] Cen, J., Li, F., Li, T., Huang, W., Chen, J., & Jiang, F. (2021). Experimental Study of the Heat-Transfer Performance of an Extra-Long Gravity-Assisted Heat Pipe Aiming at Geothermal Heat Exploitation. *Sustainability*, 13(22), 12481. <https://doi.org/10.3390/su132212481>
- [10] Chen, J., Cen, J., Huang, W., & Jiang, F. (2021). Multiphase flow and heat transfer characteristics of an extra-long gravity-assisted heat pipe: An experimental study. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 164, 120564. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120564>
- [11] Tecchio, C., Oliveira, J., Paiva, K., Mantelli, M., Galdolfi, R., & Ribeiro, L. (2017). Geyser boiling phenomenon in two-phase closed loop-thermosyphons. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 111, 29-40. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.03.092>
- [12] Wang, X., Yao, H., Li, J., Wang, Y., & Zhu, Y. (2019). Experimental and numerical investigation on heat transfer characteristics of ammonia thermosyphons at shallow geothermal temperature. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 136, 1147-1159.
- [13] Londoño Pabón, N. Y., Florez Mera, J. P., Serafin Couto Vieira, G., & Barbosa Henriques Mantelli, M. (2019). Visualization and experimental analysis of Geyser boiling phenomena in two-phase thermosyphons. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 141, 876-890. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.06.052>
- [14] 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>