

# Utilización de gases no condensables como sistema de seguridad pasivo en termosifones bifásicos

Pablo Marquez-Cortés<sup>1</sup>, Luis Cortes-Rojas<sup>2</sup>, Ary Cortes-Araya<sup>3</sup>, Francisco López-Vallejos<sup>4</sup>, Alexis Fuentealba-Orrego<sup>5</sup>, Mary Torrico-Claure<sup>6</sup>, Camilo Flores-Condori<sup>7</sup>, Luis H.R. Cisterna<sup>8</sup>

<sup>1,2,3,4,7,8</sup>Laboratorio de Termosifones Bifásicos – LABTER-UTA, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Tarapacá, Chile.

<sup>5,6</sup>Centro Avanzado de Manufactura – CAM-UTA, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Tarapacá, Chile.

<sup>1</sup>pablo.marquez.cortes@alumnos.uta.cl, <sup>2</sup>luis.cortes.rojas@alumnos.uta.cl, <sup>3</sup>ary.cortes.araya@alumnos.uta.cl, <sup>4</sup>francisco.lopez.vallejo@alumnos.uta.cl, <sup>5</sup>afuentealba@academicos.uta.cl, <sup>6</sup>mctorricoc@academicos.uta.cl, <sup>7</sup>cfflores@uta.cl, <sup>8</sup>lrodriguez@academicos.uta.cl

## Resumen

En este trabajo se realizó un estudio experimental de un termosifón bifásico que utiliza gases no condensables (GNC) como sistema pasivo de seguridad. El dispositivo fue cargado con 200 ml de agua destilada y 1 bar de aire como GNC. Se estudió el desempeño térmico en tres tasas de transferencia de calor: 100, 150 y 200 W. Además, fue analizada la tasa de calentamiento del dispositivo cuando el sistema de enfriamiento del condensador fue desligado, simulando una falla en el proceso de enfriamiento. Los resultados experimentales fueron comparados con los obtenidos en un termosifón bifásico sin GNC, mostrando que, dependiendo de la tasa de transferencia de calor impuesta en el evaporador, el uso de GNC puede reducir hasta un 60% la tasa de calentamiento del dispositivo e inclusive permitir un equilibrio térmico del dispositivo a una determinada temperatura de seguridad.

**Palabras clave:** Termosifón bifásico, Gas no condensable (GNC), Sistema pasivo de seguridad (SPS).

## Abstract

In this work an experimental study of a two-phase thermosyphon using non-condensable gases (NCG) as a passive safety system was carried out. The device was charged with 200 ml of distilled water and 1 bar of air as NCG. Thermal performance was studied at three heat transfer rates: 100, 150 and 200 W. In addition, the heating rate of the device was analyzed when the condenser cooling system was disconnected, simulating a failure in the cooling process. The experimental results were compared with those obtained in a two-phase thermosyphon without NCG, showing that depending on the heat transfer rate imposed on the evaporator, the use of NCG can reduce up to 60% the heating rate of the device and even allow a thermal equilibrium of the device at a certain safety temperature.

**Keywords:** Two-phase thermosyphon, Non-condensable gas (NCG), Passive safety system (PSS).

## 1.Introducción

En los diferentes campos del quehacer del hombre, el transporte de calor ha sido, es y seguirá siendo, un tema de permanente interés. Es por esto, que en este último tiempo se han desarrollado diferentes e innovadores tipos de intercambiadores de calor, que responden a diferentes necesidades y restricciones específicas de la industria [1]. Entre estos se destacan los intercambiadores de calor gas-gas asistidos por termosifones bifásicos. Los termosifones bifásicos pueden ser definidos como superconductores de calor que trabajan en ciclos cerrados de vaporización y condensación de un determinado fluido de trabajo [2].

Este tipo de dispositivo puede ser dividido en tres secciones: evaporador, condensador y sección adiabática. El evaporador es la sección donde el calor es suministrado al dispositivo, vaporizando el fluido de trabajo contenido en este. El vapor generado sube por diferencia de presión hacia la región del condensador, donde se transfiere el calor al ambiente, provocando la condensación del vapor. El líquido condensado vuelve nuevamente al evaporador por acción de la gravedad, cerrando así el ciclo térmico [3].

Los intercambiadores de calor que operan con termosifones bifásicos reúnen múltiples características prácticas como: alto grado de compacidad y bajo costo

de fabricación y de mantenimiento. Habitualmente, estos dispositivos intercambian calor con fluidos que circulan debido a la utilización de ventiladores y/o extractores. No obstante, cuando los equipos utilizados para hacer circular los fluidos externos fallan, la temperatura de operación del termosifón puede aumentar abruptamente, debido principalmente a la inercia térmica del propio dispositivo y a la radiación térmica emitida por las paredes del intercambiador de calor, que generalmente se encuentra a una temperatura mayor que la del termosifón. Este aumento de temperatura genera un aumento en la presión interna del termosifón que en casos extremos puede llevar a la explosión del dispositivo o inutilidad del propio intercambiador de calor, generando un potencial peligro físico y ambiental.

De esta forma, el objetivo principal de este trabajo es estudiar la utilización de gases no condensables (GNC) como una solución práctica, pasiva y económica para el tipo de problemática planteada. Los GNC actuarán como un amortiguador térmico, o en otras palabras, actuará como sistema pasivo de seguridad (SPS) que permitirá disipar de forma efectiva el calor residual del proceso, evitando la sobrepresión y consecuentemente la falla del dispositivo. Diferentes trabajos que son presentados en la literatura, que tratan el comportamiento de los GNC al interior de termosifones bifásicos [3-6], sin embargo, ninguno de ellos señala alguna aplicación similar a la propuesta en este trabajo. La idea de utilizar GNC como solución surge a partir del diseño del proyecto de tubos de calor de conductancia variable (VCHP) [4-5], que permite generar un perfil de temperatura a lo largo del condensador, dependiendo de la potencia suministrada al evaporador. La incorporación de GNC deliberadamente en termosifones y/o tubos de calor permite obtener características particulares de transferencia de calor durante el funcionamiento, puesto que el gas no condensable es barrido junto con el flujo de vapor y, al no condensarse, se acumula al final del condensador. Asimismo, la presencia de GNC se puede utilizar para controlar el rango de temperaturas de funcionamiento del sistema durante el inicio de operación, lo que es una posibilidad particularmente atractiva en dispositivos donde se requiere control de la temperatura mínima y máxima de operación [6].

## 2. Metodología.

### 2.1 Bancada experimental.

La Figura 1 muestra el esquema conceptual del banco experimental utilizado en este trabajo, el cual está formado por: Termosifón Bifásico (1); Sistema de alimentación de calor instalado en la sección del evaporador (2). Este sistema es formado por dos bloques de aluminio de 200 mm de largo, donde fueron

instaladas dos resistencias eléctricas del tipo cartucho conectadas en paralelo con una resistencia térmica de  $29,1 \Omega$ ; Fuente de poder, marca ISO-TECH, modelo IPS303DD (3), encargado de alimentar y controlar las resistencias; Intercambiador de calor tipo serpentín de 320 mm de largo efectivo (4), fabricado a partir de una tubería de cobre tipo M de  $\frac{1}{4}$ ", el cual es utilizado para retirar el calor del condensador, en su interior circula agua con flujo másico controlado con un flujómetro; Sistema de alimentación del agua de enfriamiento, formado por un estanque de 550 litros y una bomba centrífuga de 0,5 HP (5); Conmutador de datos, marca Agilent, modelo 34970a (6), encargado de registrar los datos de temperatura del termosifón bifásico el cual va conectado a los sensores de temperaturas tipo K con error promedio de  $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ; Computador (7), utilizado para registrar los datos obtenidos del sistema.

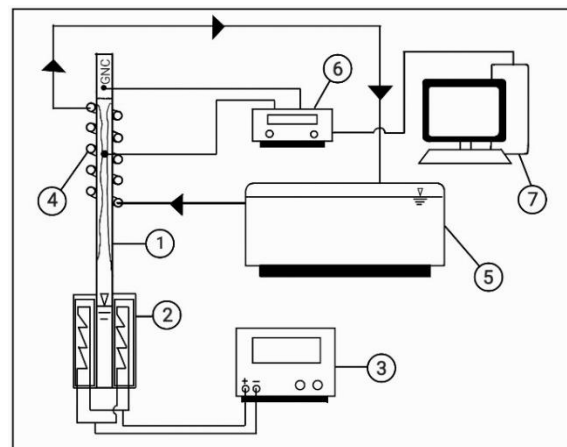


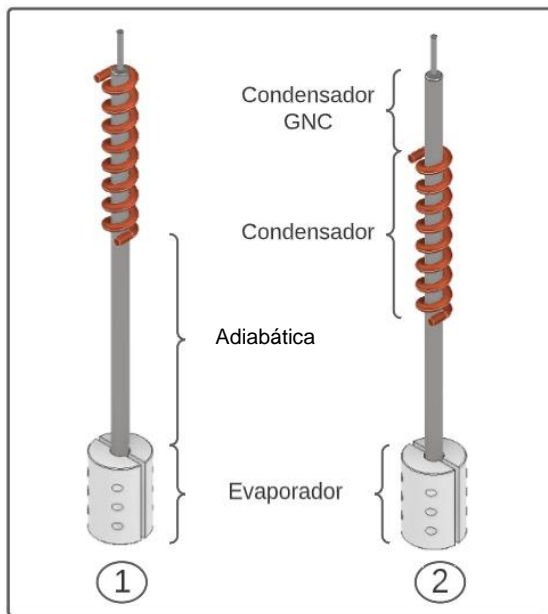
Figura 1. Esquema del banco experimental.

El termosifón bifásico fue fabricado de acero inoxidable 316L, con 25,4 mm de diámetro exterior, 23,4 mm de diámetro interior y una longitud de 700 mm; el extremo inferior fue sellado con una tapa de acero inoxidable de 3 mm de espesor y el extremo superior cuenta con una reducción para el tubo umbilical de diámetro de  $\frac{1}{4}$ ", el cual se conecta con una válvula SWAGELOK, serie: NK4719 55-4BK-VA de entrada y salida  $\frac{1}{4}$ " de acero inoxidable. El proceso de fabricación, limpieza y cargamento fue realizado según lo recomendado por Mantelli [3]. El termosifón fue cargado con 200 ml de agua destilada, lo que corresponde a un factor de llenado de 60% (relación entre el volumen del fluido de trabajo y el volumen del evaporador).

### 2.2 Procedimiento Experimental.

Fueron estudiadas dos configuraciones de termosifones bifásicos, las cuales son especificadas en el esquema de la Figura 2. En la primera configuración, la cual es nombrada en este trabajo como "termosifón patrón", se operó sin la presencia de GNC, donde el tamaño de la

sección adiabática fue de 180 mm y el intercambiador de calor tipo serpentín (320 mm) fue instalado en la parte superior del termosifón como se muestra en la Figura 2.1. Fueron instalados 8 sensores de temperaturas tipo K a lo largo del termosifón, siendo estos distribuidos de forma equidistantes en cada una de las secciones de la siguiente forma: tres en el evaporador, dos en la sección adiabática y tres en el condensador. Además, se instalaron dos termopares para el control del agua de enfriamiento, a la entrada y salida del serpentín.



**Figura 2.** Esquema de las dos configuraciones: (1) Termosifón Patrón, (2) Termosifón con SPS

En la segunda configuración, la cual será llamada de termosifón con sistema pasivo de seguridad (SPS), el termosifón fue presurizado con 1 bar de aire que corresponde al GNC utilizado en este trabajo. Una sección adicional fue incorporada al termosifón, posicionada en la parte superior del dispositivo y denominada de sección pasiva. El tamaño de la sección pasiva fue de 130 mm, que corresponde al área necesaria para disipar 100 W por convección natural y una temperatura de pared de 230 °C, que corresponde a la temperatura de seguridad establecida en este trabajo. La sección adiabática fue reducida para 50 mm y la sección del condensador, esto es, el intercambiador de calor tipo serpentín de 320 mm, fue posicionado entre la sección adiabática y la sección pasiva como se muestra en la Figura 2.2. Fueron instalados 10 sensores de temperaturas tipo K a lo largo del termosifón, siendo estos distribuidos de forma equidistantes en cada una de las secciones de la siguiente forma: tres en el evaporador, uno en la sección adiabática, tres en el condensador y tres en la sección pasiva. Además, fueron instalados dos termopares para el control del

agua de enfriamiento, a la entrada y salida del serpentín.

Para cada una de las configuraciones, fueron testeadas tres tasas de transferencias de calor: 100, 150 y 200 W, manteniendo constante el flujo másico y temperatura del agua de enfriamiento en  $18,1 \pm 0,2$  g/s y 25 °C respectivamente. En cada una de las tasas de transferencia de calor estudiada, fue registrado el régimen transitorio y régimen permanente del dispositivo para identificar el inicio de operación y la capacidad de transferencia de calor, es decir, desempeño del termosifón bifásico. Posteriormente, fue analizado el comportamiento del dispositivo ante una falla en el sistema de enfriamiento, para esto, fue desconectada la bomba de enfriamiento. Luego de alcanzado el régimen permanente en cada una de las tasas de transferencia de calor estudiadas, fue establecido como temperatura crítica de seguridad la temperatura de 230 °C, y así analizar la tasa de calentamiento del dispositivo. Esto último se refiere, al tiempo que el dispositivo se demoró en alcanzar la temperatura crítica de seguridad a partir de la temperatura de régimen permanente para cada una de las tasas de transferencia de calor estudiadas. Es importante destacar que el régimen permanente fue determinado cuando la variación máxima de la temperatura promedio en cada una de las secciones fue menor a 0,5 °C.

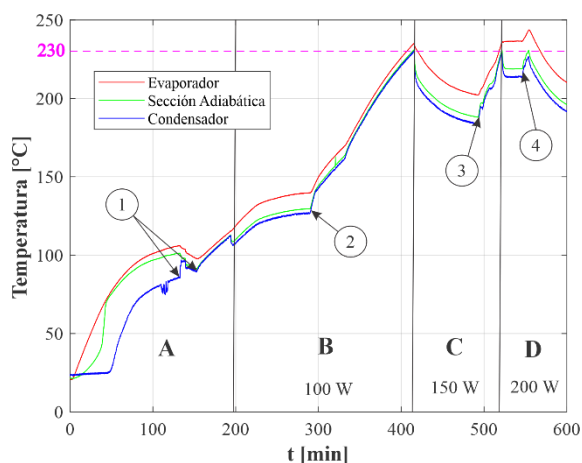
### 3. Resultados y Discusiones.

La Figura 3 muestra el gráfico de los promedios de las temperaturas en el evaporador, la sección adiabática y el condensador en función del tiempo para las diferentes tasas de transferencia de calor estudiadas. El gráfico fue dividido en 4 regiones de operación. La primera región de este gráfico, región A, corresponde al proceso de purga del dispositivo. Para realizar el proceso de purga, inicialmente fue suministrada una tasa de transferencia de calor de 100W y se esperó hasta que la temperatura promedio de la sección adiabática fuera mayor que 100°C, garantizando que todo el dispositivo se encuentre a una presión interna mayor que 1 bar. Posteriormente se abrió la válvula swagelok para la eliminación de los GNC, lo cual es representado en el punto (1) de la Figura 3. Se observa que después de realizada la purga existe un aumento abrupto en la temperatura de la sección adiabática y condensador, homogeneizando la temperatura del dispositivo y garantizando la retirada de los gases no condensables. Es importante destacar que el proceso de purga fue realizado con el objetivo de contar con un termosifón que sirva como patrón para comparar tanto el desempeño del dispositivo como la tasa de calentamiento después de simulada la falla en el dispositivo.

La región B del gráfico muestra el termosifón bifásico operando a 100 W. El régimen permanente fue

conseguido cuando la temperatura de vapor fue igual a  $129,6^{\circ}\text{C}$  (Punto 2 de la Figura 3). Una vez alcanzado el régimen permanente a  $100\text{W}$ , fue desligada la bomba centrífuga utilizada para bombear el fluido de enfriamiento y retirar el calor del dispositivo, con el objetivo de simular la falla. Se observa a partir del momento de desligamiento de la bomba, un aumento acelerado de las temperaturas del termosifón con una tasa de calentamiento igual a  $0,8^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .

Cuando la temperatura de la sección adiabática alcanzó los  $230^{\circ}\text{C}$ , que corresponde aproximadamente a una presión interna del dispositivo igual a  $27,9\text{ bar}$ , el sistema de enfriamiento del termosifón fue ligado nuevamente, al mismo tiempo que la tasa de transferencia de calor fue aumentada para  $150\text{ W}$ . El régimen transitorio de esta nueva condición de contorno es mostrado en la región C de la Figura 3. El régimen permanente de esta región fue alcanzado cuando la temperatura de la sección adiabática fue de  $188,9^{\circ}\text{C}$  (Punto 3 de la Figura 3). Posteriormente, se vuelve a desligar la bomba centrífuga y las temperaturas del termosifón aumentaron con una tasa de enfriamiento de  $1,45^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . Finalmente, fue aumentada la tasa de transferencia de calor a  $200\text{ W}$  (región D de la Figura 3). En este caso el régimen permanente fue alcanzado a  $219^{\circ}\text{C}$  (Punto 4 de la Figura 3) y una tasa de calentamiento de  $1,61^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , después de simulada la falla en el sistema de enfriamiento.

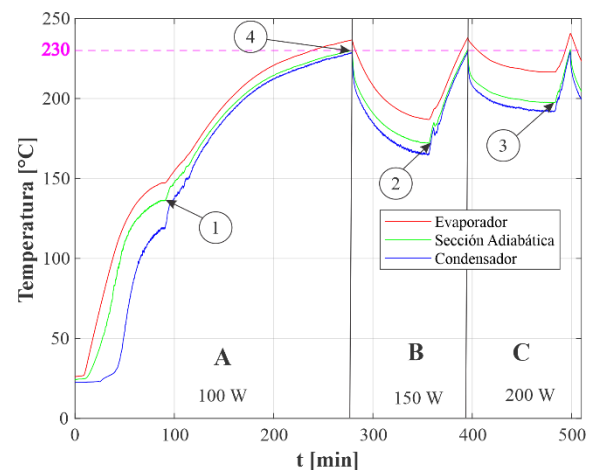


**Figura 3.** Temperaturas promedio del evaporador, adiabática y condensador en función del tiempo para el termosifón patrón.

La Figura 4 muestra el gráfico de los promedios de las temperaturas en el evaporador, la sección adiabática y el condensador en función del tiempo para las diferentes tasas de transferencia de calor estudiada en el termosifón operando con el sistema pasivo de seguridad (SPS). Esto es con la incorporación de GNC, según se muestra en el esquema de la Figura 2.

En la región A de la Figura 4 se muestra el funcionamiento del termosifón con SPS operando a

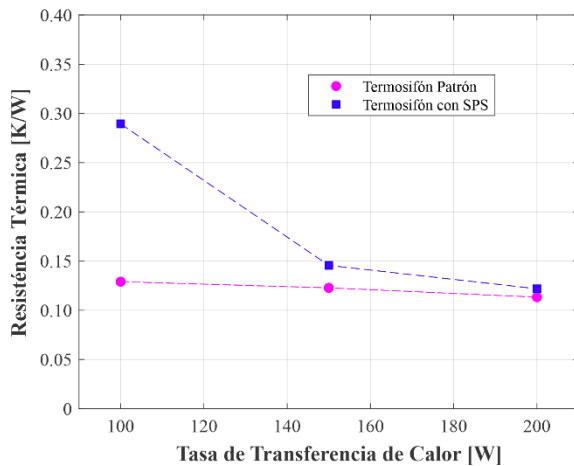
$100\text{ W}$ . Se observa que el régimen permanente fue alcanzado cuando la temperatura del vapor fue igual a  $136,4^{\circ}\text{C}$  (Punto 1 de la Figura 4). En ese momento y después de desligada la bomba centrífuga, para simular la falla del dispositivo, se observa un aumento de las temperaturas del termosifón menos pronunciado en comparación al termosifón patrón, con una tasa de calentamiento de  $0,49^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . En la región B de la Figura 4 se muestra la operación del termosifón a  $150\text{ W}$ , donde el régimen permanente fue alcanzado a  $172,6^{\circ}\text{C}$  (Punto 2 de la Figura 4) y a una tasa de calentamiento de  $1,37^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , después de desligada la bomba de enfriamiento. Finalmente, en la última etapa del experimento, región C de la figura 4, se observa que el régimen permanente fue alcanzado a  $198,1^{\circ}\text{C}$  (Punto 3 de la Figura 4) y luego de desconectar la bomba centrífuga, el termosifón aumentó su temperatura interna hasta  $230^{\circ}\text{C}$  con una tasa de calentamiento de  $2,14^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , mayor a la observada en el termosifón patrón.



**Figura 4.** Temperaturas promedio del evaporador, adiabática y condensador en función del tiempo para el termosifón patrón con SPS.

Con el objetivo de comparar tanto la eficiencia térmica del termosifón como la tasa de calentamiento de los termosifones bifásicos con y sin el SPS son presentados los gráficos de la Figura 5 y 6. El gráfico de la figura 5 muestra la resistencia térmica del termosifón en función de la tasa de transferencia de calor para cada uno de los termosifones estudiados, esto es: termosifón patrón y termosifón con SPS. Se observa que el termosifón patrón presentó una resistencia térmica constante, con un valor aproximado de  $0,12^{\circ}\text{C}/\text{W}$  independientemente de la tasa de transferencia de calor, la cual siempre fue menor que la resistencia del termosifón con SPS. Por un lado, cuando la tasa de transferencia de calor fue igual a  $200\text{ W}$ , ambos termosifones presentaron resistencias térmicas prácticamente iguales. Por otro lado, cuando los termosifones operaron a  $100\text{ W}$ , se observa que la resistencia térmica del termosifón con SPS fue

prácticamente el doble de la resistencia térmica del termosifón patrón. Esto puede indicar que los GNC ocupan parte de la sección del condensador, reduciendo así el área de transferencia de calor y en consecuencia la temperatura de las regiones inferiores del condensador aumenta, perjudicando así la capacidad de transferir calor del dispositivo. Cuando los dispositivos trabajaron a 150 W se observó un comportamiento similar al mostrado por los dispositivos en 200 W.

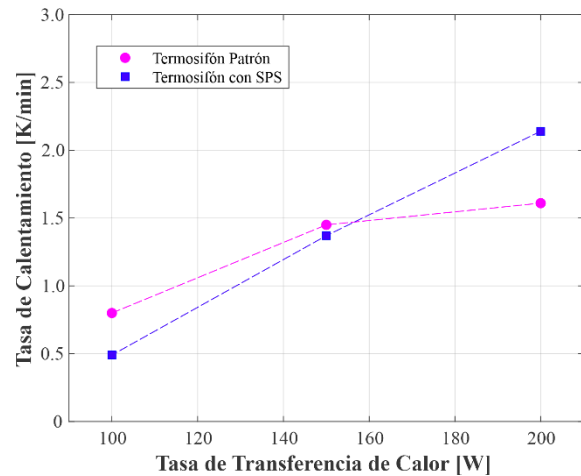


**Figura 5.** Resistencia térmica en función de la tasa de transferencia de calor.

Cuando se analiza el comportamiento de los dispositivos mediante la tasa de calentamiento del termosifón, se evidencia, que cuando la tasa de transferencia de calor fue de 100 W, la tasa de calentamiento del termosifón con SPS fue 1.63 veces menor en comparación a la del termosifón patrón. Además, se observa en la Figura 4 que después de desconectada la bomba de enfriamiento en la operación del termosifón a 100W, el dispositivo alcanza un nuevo régimen permanente de forma pasiva a la temperatura de 230°C en la sección adiabática (Punto 4 de la Figura 4), confirmando de esta manera, que si posible, la disipación de forma pasiva del calor a partir de la utilización de GNC.

Además, cuando los termosifones bifásicos operaron a 200 W, se observa que la tasa de calentamiento del termosifón patrón presentó un valor 1,34 veces menor que la tasa de calentamiento del termosifón con SPS. Esto puede ser asociado a que, durante el régimen permanente de este dispositivo aún con el sistema de enfriamiento, la presión del vapor del fluido de trabajo comprimió los GNC por sobre la región del condensador, de esta manera, parte del reservatorio del gas no condensable quedó expuesto al ambiente, intercambiando parte del calor por convección natural. Por lo tanto, cuando el sistema de enfriamiento fue desligado, la región disponible para actuar como disipador pasivo fue reducida, haciendo que sea más rápido el calentamiento hasta 230°C, que fue la

temperatura definida como temperatura de seguridad de este experimento.



**Figura 6.** Tasa de calentamiento en función de la tasa de transferencia de calor.

#### 4. Conclusión.

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo se concluye que, la utilización de una cierta cantidad de GNC puede permitir la operación segura de un termosifón bifásico y actuar como un SPS, permitiendo un mayor tiempo de reacción en caso de que exista la falla en el sistema de enfriamiento. Sin embargo, es necesario destacar que la funcionalidad y eficiencia de este sistema pasivo de seguridad, depende fuertemente de la tasa de transferencia de calor, la cual determina la cantidad de GNC con la que debe ser cargado el dispositivo y el área de transferencia de calor que debe ser dejada como sección pasiva.

Lo anterior es evidenciado en dos casos extremos, en el primer caso, cuando la tasa de transferencia de calor fue de 100W, se observó que justo antes de la falla del sistema de enfriamiento, el termosifón con SPS operó con una resistencia térmica mayor que el termosifón patrón, evidenciando que la presión del vapor no fue capaz de comprimir los GNC fuera de la región del condensador, reduciendo el área de transferencia de calor. En el segundo caso, cuando el termosifón operó con 200 W, el vapor comprimió los GNC por sobre el condensador exponiendo parte de la sección pasiva antes de lo esperado por el proyecto. De esta manera ~~Así~~, se recomienda el desarrollo de modelos matemáticos que permitan determinar la cantidad de GNC que debe ser incorporado en el termosifón, en función de la tasa de transferencia de calor y del área disponible como sección pasiva.

Para finalizar, esta investigación comprueba la hipótesis acerca de la utilización de gas no condensable como un sistema de protección en los termosifones bifásicos, llegando a ser un sistema pasivo de seguridad

de bajo costo y seguro para la industria de energía térmica y transferencia de calor.

## 5.Referencias

[1] Rozas, C., Moraga, N., Bubnovich, V., & Letelier, M. (2012). Desarrollo Histórico de los Tubos de calor y sus aplicaciones.

[2] Shah, R. K., & Sekulic, D. P. (2003). Fundamentals of heat exchanger design. John Wiley & Sons.

[3] Mantelli, M. B. H. (2021). Thermosyphons and heat pipes: theory and applications. Springer International Publishing.

[4] Cisterna, L. H., Tavares, E. G., Milanez, K. W., Uhlmann, T. W., Milanez, F. H., & Mantelli, M. B. (2016). Loop thermosyphon model for condensers with non-condens-able gas applied to distillation units. 18th IHPC and 12th IHPS.

[5] Faghri, A. (1995). Heat pipe science and technology. Global Digital Press.

[6] Zhou, X., & Collins, R. E. (1995). Condensation in a gas-loaded thermosyphon. International journal of heat and mass transfer, 38(9), 1605-1617.