

Disipación de la energía generada en un circuito electrónico utilizando un TPTC (*heat pipe*)

Using a heat pipe (TPTC) for dissipating energy generated by an electronic circuit

Rodrigo Correa¹, Oscar Reyes² y Jeison Marín³

RESUMEN

El presente artículo reporta los resultados de una investigación experimental relacionada con la determinación de la eficiencia térmica de un tubo para la transferencia de calor (TPTC o *heat pipe*) comparada con la de dos elementos comúnmente utilizados para disipar calor en un circuito, esto es, un ventilador y una aleta. En los ensayos se varió la frecuencia de la alimentación a un circuito de potencia estándar, manteniéndose constantes los demás parámetros. Se utilizó un diseño estadístico de experimentos como herramienta analítica. Para todos los experimentos el TPTC, inesperadamente, tuvo la menor eficiencia térmica, aunque tiene la ventaja de ser pasivo, poseer un pequeño volumen y carecer de partes móviles.

Palabras clave: transferencia de calor, disipación de energía en un circuito, efecto Joule.

ABSTRACT

This paper presents an experimental investigation aimed at estimating the thermal efficiency of a heat pipe compared to the most common elements for removing heat from a circuit (i.e., an electric fan and a fin - extended surface). The input voltage frequency for a standard power circuit was changed for the experiments, whilst all the other parameters were kept constant. An experimental statistical design was used as an analytical tool. Unexpectedly, the heat pipe showed the lowest thermal efficiency for all the experiments, although it had the advantage of being a passive element having low volume and no mobile parts.

Keywords: heat transfer, energy dissipated by a circuit, Joule effect.

Recibido: febrero 25 de 2009

Aceptado: marzo 2 de 2010

Introducción

Un TPTC es un dispositivo eficiente de elevada conductancia térmica que facilita el transporte de energía (calor). Este transporte se realiza de una sección de alta temperatura, mediante la evaporación de un fluido, a otra de menor temperatura, donde ocurre su condensación; estos fenómenos opuestos tienden a orientar el sistema hacia el equilibrio térmico. Si bien esta invención data de hace varias décadas, aún quedan retos por resolver como el incremento de su capacidad de remoción de energía, lograr mayor flexibilidad estructural, nuevos diseños para reducir el impacto de la orientación gravitacional sobre su eficiencia térmica, nuevos materiales que le permitan resistir ambientes químicamente hostiles, modelos matemáticos rigurosos que describan su comportamiento y faciliten la optimización de su operación, y por último, la disminución de costos. Para su completo análisis es necesario recurrir a conceptos básicos de transferencia de calor, mecánica de fluidos, termodinámica y diseño estadístico de experimentos. Bergels (2003), Dunn *et al.* (1978) y Mejía (2006) describen los fenómenos hidrodinámicos y de transferencia de calor que son la base para el diseño y construcción de un TPTC. Debido al auge que ha tenido la electrónica en los últimos tiempos, los TPTC son ahora una alternativa técnicamente viable para su enfriamiento frente a los métodos tradicionales. En la electrónica estos dispositivos térmicos

tienen la función de transportar el calor generado por una fuente, disminuir el gradiente de temperatura del elemento electrónico y controlar su temperatura. Sus dimensiones son del orden de los milímetros de espesor y de longitud variable y pueden retirar cantidades de energía por unidad de tiempo que oscilan entre los 10 y los 200 W (Ravibabu, 2010; Reid, *on line*; Simpson, 1991; Xie, *on line*). En este mismo sentido, un problema relativamente común en los diseños electrónicos es la carencia de un pronóstico preciso de la generación de calor que se tendrá durante su operación y por ende, el posible incremento incontrolado en la temperatura, lo que originará daños prematuros y situaciones de riesgo al funcionar incorrectamente (Hong, 1998; Mikyoung, 2006; Zuo, 2001).

En este artículo se presentan algunos resultados experimentales relacionados con la contrastación de la eficiencia térmica de un TPTC (ubicado en dos posiciones espaciales sobre un circuito electrónico de potencia) frente a la de un ventilador y una superficie extendida (aleta).

Metodología experimental

Para comparar la distribución de temperatura en estado transitorio de un sistema electrónico de potencia antes y después de instalar un TPTC, se construyó un circuito electrónico elemental. Se reali-

¹ Ingeniero químico, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. M.Sc., en Control y M.Sc., en Ingeniería Química, Ph.D., Lehigh University, USA, Profesor titular, Universidad Industrial de Santander, Colombia, crcorrea@uis.edu.co

² Ingeniero electrónico, Universidad Industrial de Santander, Colombia. PhD(c), Profesor asistente, Universidad Industrial de Santander, Colombia. omreyes@uis.edu.co

³ Ingeniero electrónico, Universidad Industrial de Santander, Colombia, M.Sc., en Ingeniería Electrónica, Universidad Industrial de Santander, Colombia. Profesor, Unidades Tecnológicas de Santander, Colombia. jeison.marin@uts.edu.co

zaron experimentos encaminados a comparar la eficiencia térmica de un TPTC frente a otro dispositivo de enfriamiento electrónico pasivo como la aleta y a otro activo como un ventilador.

Equipos utilizados

Para las pruebas se utilizó una cámara termográfica con el objeto de observar la distribución de temperatura en función del tiempo. El rango inferior del equipo es de 5 K, mientras que el superior es de 1.000 K. Se utilizó un amplificador de potencia en donde se mantuvo el transistor en su región activa para que consuma la mayor potencia posible. El circuito utilizado fue muy sencillo con el fin de tener un control sobre él y la potencia que consume. Se seleccionó de tal forma que sirve como ejemplo de un circuito que disipa alta potencia y posee una arquitectura fácil de reproducir; el transistor se puede alimentar con una "tensión puerta-surtidor" de 12 V a diferentes frecuencias y una fuente de alimentación de corriente directa de 5 V. Se utilizaron cuatro resistencias de 1 Ω en paralelo entre la fuente de alimentación y el drenador del transistor con capacidad de 10 W cada una, es decir, una resistencia equivalente de 0,25 Ω o 0,5 Ω para potencia alta y baja, respectivamente. El transistor *MOSFET IRFP450* de potencia tiene una "resistencia de drenador-surtidor" (R_{ds}) equivalente a 0,33 Ω . En el transistor existe una "corriente de drenador – surtidor" de 8,62 A para alta potencia.

Para el caso de baja potencia se utilizó con el mismo circuito, solo que al variar la resistencia de carga su corriente fue de 6,02 A. Se alimentó con una tensión de 12 V en continua, a 10 Hz, 100 Hz y 1 KHz, con un ciclo de trabajo del 53,33% con el propósito de que el transistor trabaje como un *switch*. El circuito es controlado por medio de un oscilador LM555 a una tensión pico de 5 V y donde la frecuencia de operación se ajusta por medio de varios condensadores. A la salida se conectó un optoacoplador que amplifica la señal a 12 V a la misma frecuencia y ciclo de trabajo. También corrige los picos indeseables de la señal que pueden perjudicar el funcionamiento del transistor. Se utilizó un ventilador de 50 x 50 x 15 mm, 1200 r. p. m. y de potencia nominal de 1,92 W y una aleta rectangular de aluminio compuesto de 15 superficies (láminas) de 50 x 50 x 20 mm.

Diseño de experimentos

Con el fin de disponer de un análisis cuantitativo de resultados y de limitar el número de experimentos, se recurrió al diseño estadístico de experimentos Moreno (1993). Se realizaron pruebas para comparar la eficiencia de un TPTC frente a dos tipos de disipadores de calor muy comunes operándose el circuito a baja y alta potencia. Para cada uno de estos experimentos se determinó la distribución de temperatura del circuito en función del tiempo, antes y después de instalarle un TPTC en dos posiciones, una horizontal y otra vertical. De igual manera, se operó el circuito con diferentes frecuencias en la tensión de alimentación.

Identificación de variables

Las variables que afectan el funcionamiento del transistor son su potencia, la temperatura ambiente, el tipo de disipador de calor y su frecuencia de trabajo. En la determinación y comparación de la eficiencia de los disipadores se acopló cada disipador al transistor para una frecuencia de operación definida y luego se midió la temperatura. a efecto de hallar el efecto de la presencia del TPTC sobre la distribución de temperatura del transistor, éste se acopló en *posición vertical* (en donde el evaporador y la zona adiabática están en posición vertical mientras que el condensador está en po-

sición horizontal) y la *posición horizontal* (el evaporador, la zona adiabática y el condensador están en posición horizontal) al transistor, midiéndose la temperatura cada 25 segundos para diferentes frecuencias de operación del circuito electrónico.

Determinación y comparación de la eficiencia de los disipadores

a. La eficiencia del disipador de calor se determinó mediante el análisis de la distribución de temperaturas antes y después de implementarlo. Se mantuvieron como factores fijos la temperatura ambiente ($T_a = 25$ °C) y la frecuencia de trabajo del transistor ($f = 0$); a frecuencia cero, el transistor consume la mayor potencia. Los factores que se hacen variar son el tipo de disipador de calor y la potencia del transistor. El factor "ti-po de disipador" consiste de cuatro niveles: sin disipador, aleta, ventilador y TPTC. Se definieron unas hipótesis, con el objetivo de determinar cuál de los tres tipos de disipadores de calor seleccionados era el más efectivo, utilizando como parámetro de medición la temperatura promedio del transistor. Las hipótesis nula (H_d) y la alternativa (A_d) correspondientes a este experimento fueron:

H_d : todos los disipadores tienen la misma eficiencia.

A_d : por lo menos dos disipadores tienen eficiencia diferente.

b. El factor "potencia" se lleva a dos niveles, el de *baja* potencia (11,97 W) y el de *alta* potencia (24,52 W). Con este experimento se puede determinar si en ambos niveles la eficiencia térmica es igual. La hipótesis nula (H_p) y la alternativa (A_p) correspondientes a este experimento fueron:

H_p : la eficiencia es la misma a cualquier potencia.

A_p : la eficiencia es diferente para ambas potencias.

c. También se determinó si hay interacción entre los dos factores anteriores. Las hipótesis nula (H_{dp}) y la alternativa (A_{dp}) correspondientes a este experimento fueron:

H_{dp} : la interacción entre estos factores sobre la temperatura es la misma.

A_{dp} : la interacción es diferente.

Para cada una de esas pruebas se utilizó el mismo transistor, la temperatura ambiente se mantuvo constante y con una frecuencia de operación cero. Se tomaron datos de temperatura del transistor de forma aleatoria durante diez minutos de operación utilizando la cámara termográfica. Para comprobar si las hipótesis planteadas eran ciertas o no, se recurrió a la elaboración del Anova. Luego se observó si el tamaño de la muestra para la prueba de cada una de las hipótesis era la correcta. Con el fin de comparar la eficiencia relativa entre un disipador y otro se recurrió al *test de rango múltiple de Duncan*. Este test es superior a otros disponibles para detectar diferencias entre pares de medias y con su ayuda se pudo comparar si había o no relación entre los disipadores. Se calculó la eficiencia térmica de los disipadores tomando como referencia los resultados del experimento que no usa ningún disipador.

Modelos empíricos de ajuste

Se propuso un modelo empírico proveniente del ajuste de datos experimentales para predecir el funcionamiento de un TPTC utilizando la distribución de temperatura para frecuencias de operación cero, bajas, medias y altas. Se mantuvieron fijos los factores temperatura ambiente ($T_a = 25$ °C), la corriente de drenador-sur-

tidor ($I_d = 8,26A$) y el ciclo de trabajo (53,33%). El factor variante fue la frecuencia de trabajo del transistor que consta de cuatro niveles, cero, baja frecuencia (10 Hz), frecuencia media (100 Hz) y alta frecuencia (1 KHz). El experimento consistió en determinar cómo funciona el TPTC (su distribución de temperatura en función del tiempo) a ciertas frecuencias de operación del circuito. Las hipótesis correspondientes a la frecuencia de trabajo del transistor fueron:

H_i : la temperatura a diferentes frecuencias es la misma.

A_j : la temperatura a por lo menos dos frecuencias distintas, es diferente.

Después de un análisis de resultados preliminares, se propuso utilizar un modelo de ajuste curvas tipo exponencial en donde se estimará el grado de correlación de cada uno de los factores y su interacción entre ellos. Para realizar los experimentos con los factores TPTC en posición horizontal y TPTC en posición vertical, se implementaron como se observa en la figura 1, respectivamente. El modelo exponencial de ajuste de datos es de la forma

$$\Delta T = T_{\max}(1 - e^{-t/\tau}) \quad (1)$$

donde ΔT es la diferencia de temperatura del sistema respecto a la temperatura ambiente, T_{\max} la temperatura máxima, t el tiempo y τ el tiempo de asentamiento, ambos en segundos. Se realizaron pruebas a distintas frecuencias de la tensión de operación del transistor con el TPTC en posición vertical y horizontal, así como en el caso de ausencia de éste. Para comparar el desempeño de un disipador de calor con otro se utilizó el parámetro *eficiencia térmica* (E_T) del dispositivo definido como la razón de cambio de temperatura del transistor con disipador (ΔT_D) respecto del cambio de temperatura sin disipador (ΔT_{SD}),

$$E_T = \left(1 - \frac{\Delta T_D}{\Delta T_{SD}} \right) * 100 \quad (2)$$

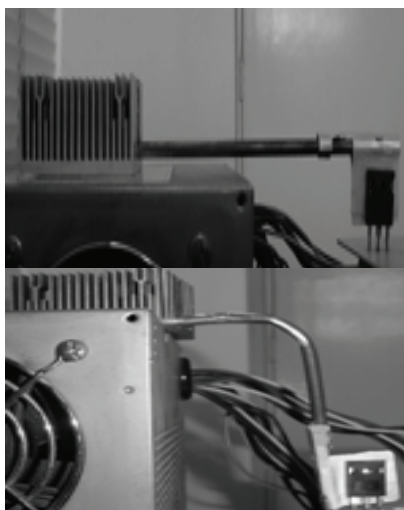


Figura 1. Transistor con TPTC horizontal y vertical, respectivamente

Resultados

Para la determinación de la distribución de temperatura con y sin TPTC se tomaron los datos de temperatura cada 25 segundos durante los primeros tres a cuatro minutos de operación. El cursor de

la cámara térmica se ubicó en el lugar donde la temperatura era la más alta en el transistor.

Distribución de temperatura antes y después de implementar el TPTC

A continuación se presentan algunos de los resultados experimentales relacionados con la distribución de temperatura y obtenidos a frecuencia 0 y 1.000 Hz.

Continua (frecuencia 0 Hz)

Las gráficas de operación con una tensión continua se muestran en la figura 2. La expresión para la predicción de la temperatura del transistor sin disipador es

$$\Delta T = 189.84(1 - e^{-t/45.71}) \quad (3)$$

De igual manera, se determinaron los modelos de ajuste para los TPTC instalados en posición horizontal y vertical respectivamente,

$$\Delta T = 150.08(1 - e^{-t/39.45}) \quad (4)$$

$$\Delta T = 124.08(1 - e^{-t/32.9}) \quad (5)$$

Para su operación en continua, la temperatura del transistor sin disipador es muy alta y puede ocasionar problemas en un ambiente cerrado al irradiar calor a los demás elementos del sistema. Cuando se emplea un TPTC instalado en forma horizontal la temperatura disminuye, protegiendo el transistor de altas temperaturas, aunque es de superior desempeño el disipador de calor en posición vertical.

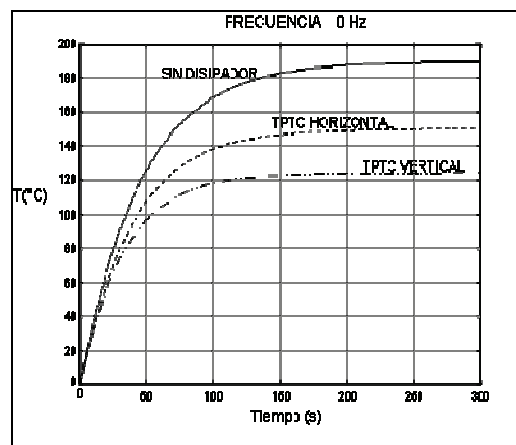


Figura 2. Temperatura en función del tiempo a frecuencia de 0 Hz.

Se evidenció en todos los experimentos que el TPTC operó más eficientemente en posición vertical.

Alta frecuencia (1 kHz) (Figura 3).

El modelo empírico de ajuste que predice la temperatura del transistor sin disipador se presenta como:

$$\Delta T = 140.89(1 - e^{-t/56.84}) \quad (6)$$

Lo mismo se realiza con el TPTC en posición horizontal y vertical, como se aprecia en las ecuaciones (7) y (8), respectivamente,

$$\Delta T = 80.77(1 - e^{-t/39.49}) \quad (7)$$

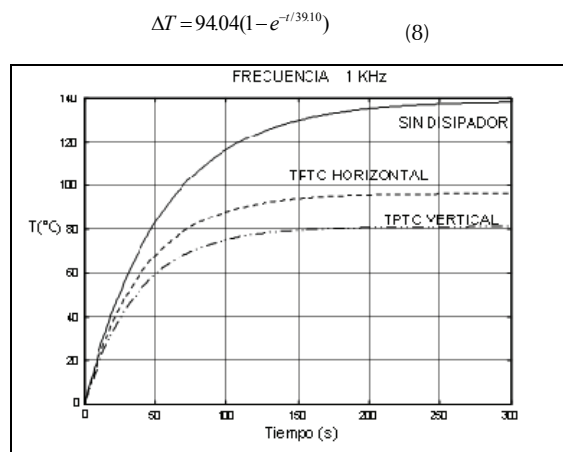


Figura 3. Temperatura en función del tiempo a frecuencia de 1 KHz

Se concluye que para una operación a 1 KHz la temperatura del transistor sin disipador es muy alta, pero baja comparada con la de continua (0 Hz), donde la temperatura es extremadamente alta; es parecida al caso de 10 Hz y 100 Hz. Si se utiliza el TPTC horizontal la temperatura baja considerablemente y su constante de tiempo se prolonga, protegiendo al transistor de cambios de temperatura bruscos al arranque. Es también evidente que es superior el desempeño del disipador de calor instalado en posición vertical.

Comparación entre disipadores

Ahora se comparará lo ocurrido al transistor sin disipador a diferentes frecuencias. Se observa en la figura 4 que en el transistor cuando opera con tensión en continua su temperatura es más alta, y a frecuencias entre 10 Hz y 1 KHz, la temperatura es aproximadamente la misma. La respuesta a este fenómeno no es tan obvia, porque a simple vista se observa que la temperatura no depende de la frecuencia de operación (dentro del ancho de banda del transistor), sino de la potencia promedio, que es la misma en los tres casos. A potencias altas el transistor llega a un punto donde la temperatura es casi incontrolable.

En la figura 5 vemos que el TPTC en posición horizontal tiene una eficiencia similar a cualquier frecuencia excepto cuando ésta es cero (continua); conviene utilizar esta posición cuando la potencia que consume el transistor es baja.

Al igual que en la figura anterior, en la figura 6 se observa que el TPTC en posición vertical tiene una eficiencia similar a cualquier frecuencia de la alimentación.

Esta posición se puede utilizar cuando la potencia es muy alta, ya que tiene una eficiencia térmica elevada y superior a la del TPTC horizontal. Se observa una alta temperatura nuevamente cuando el circuito opera con tensión continua.

Desempeño de un TPTC frente a otros disipadores

Las eficiencias térmicas de cada uno de los disipadores determinada con respecto al transistor operando con potencia baja y sin disipador, se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Eficiencia de los disipadores para bajas potencias.

Ventilador	81,71 %
Aleta	47,74 %
TPTC	37,56 %

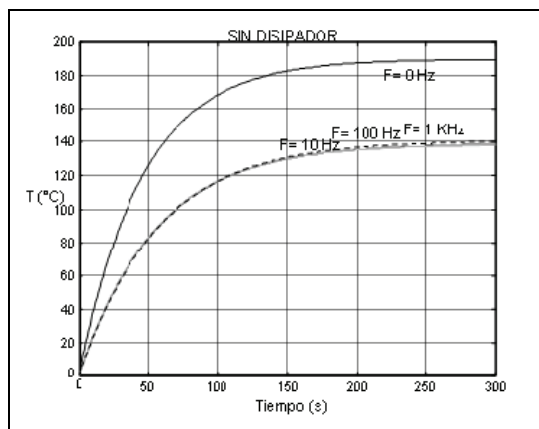


Figura 4. Temperatura del transistor en función del tiempo y sin disipador

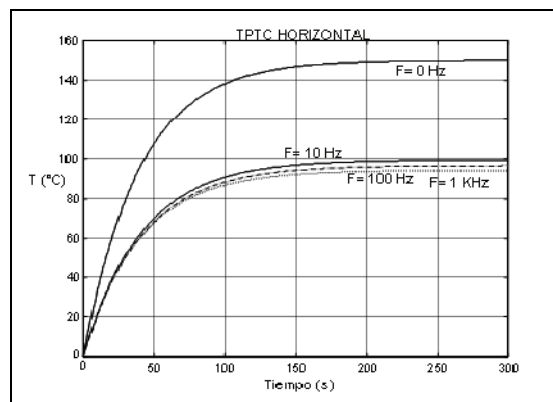


Figura 5. Temperatura en función del tiempo para un TPTC instalado horizontalmente

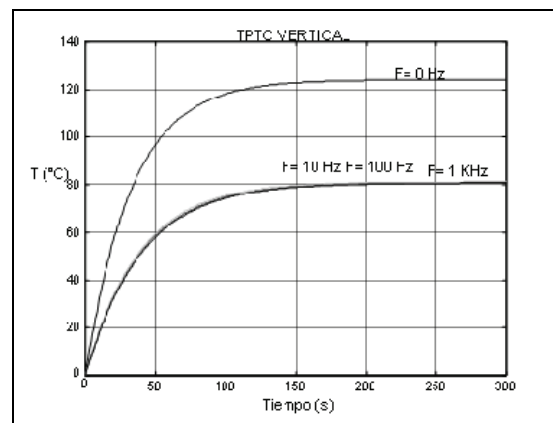


Figura 6. Temperatura en función del tiempo para un TPTC instalado verticalmente

A pesar de que hay una buena eficiencia del TPTC, no se compara con la del ventilador, aunque es cercana a la de la aleta. Para el caso de potencia alta se nota en la tabla 2 que hay diferencias significativas entre todos los disipadores, es decir, las eficiencias entre unos y otros, con respecto a la temperatura, son comparables, siendo mejor el ventilador, luego la aleta y por último el TPTC en posición vertical. Se puede afirmar, entonces, que hay una diferencia muy marcada entre los tres disipadores y el transistor sin disipador.

Tabla 2. Eficiencia de los disipadores para altas potencias

Ventilador	55,76 %
Aleta	42,52 %
TPTC	39,32 %

Pese a que la eficiencia en el TPTC es alta, no se compara con la del ventilador, si bien es cercana nuevamente a la de la aleta. Los resultados demuestran que la eficiencia del ventilador es superior, y aún más, a bajas potencias. Esta diferencia significativa para disipar el calor se debe en gran parte a que el ventilador utiliza el mecanismo de convección forzada. El segundo en efectividad es la aleta; es tal vez el dispositivo más sencillo y económico que se encuentra en el mercado. El último en efectividad fue el TPTC (lo cual no indica que el disipador sea inapropiado), pues aun así posee una eficiencia constante comparable con los otros dos disipadores y muy cercana a la de la aleta. En la tabla 3 se resumen las ventajas y desventajas de estos dispositivos.

Conclusiones

Pese a las conocidas ventajas de un TPTC, y contra toda expectativa, se encontró que este tipo de dispositivo evidenció para todos los experimentos la menor eficiencia térmica comparable con la de una aleta y la de un ventilador. Del análisis siguiendo la distribución de temperatura en el tiempo se deduce que la disipación de calor es eficiente, decreciendo temperaturas de operación de 190 °C a 124 °C en posición vertical y de 190 °C a 150 °C en posición horizontal, obteniendo una eficiencia térmica del 21 al 35%.

Tabla 3. Ventajas y desventajas de los disipadores utilizados

Aleta	
Ventaja	Desventaja
Es económico. Tiene una efectividad cercana al 50%.	Solo puede actuar sobre un dispositivo a la vez. El calor se disipa por conducción y luego por convección y radiación, provocando que otros elementos cercanos se calienten.
Ventilador	
Ventaja	Desventaja
Tiene una eficiencia muy alta. Es más económico que un TPTC.	No se puede utilizar en dispositivos que se encuentren encerrados y/o en un ambiente a altas temperaturas. Necesita de energía eléctrica. Posee partes móviles.
TPTC	
Ventaja	Desventaja
Fácilmente maleable. Se pueden instalar con varios dispositivos pequeños en serie o en integrados. Su funcionamiento es totalmente mecánico.	El precio de un TPTC es relativamente elevado. Tiene una menor efectividad comparada con los dos anteriores.

En otras pruebas disminuyeron las temperaturas de operación de 139 °C a 81 °C en posición vertical y de 139 °C a 110 °C en posición horizontal, con una eficiencia entre el 29 y el 42%. Además, los modelos empíricos de ajuste de curvas propuestos describen de forma apropiada el comportamiento del disipador en este sistema, observándose de ellos que el TPTC es un disipador eficiente al inicio y en el estado estable. Aun así, el TPTC es un elemento que no se puede descartar, ya que tiene buena capacidad de disipación de energía y su uso es conveniente en aplicaciones en donde la confiabilidad de sus componentes sea un requerimiento de seguridad. Ha de tenerse presente que la duración de los experimentos fue de semanas. No obstante, se deben tener en cuenta otros aspectos al momento de diseñar o seleccionar el dispositivo de enfriamiento apropiado, siendo por ejemplo la confiabilidad del sistema el consumo extra de energía a largo plazo y el espacio disponible para el dispositivo, aspectos que no fueron incluidos en este trabajo.

Bibliografía

- Bergles, A., Evolution of cooling technology for electrical, electronic, and microelectronic equipment., IEEE Trans., on components and packing technologies., Vol. 26, No. 1, March 2003, pp. 6-15.
- Dunn P., Reay, D., Heat Pipes., 2a edición, Gran Bretaña, ed. Pergamon Press, Vol. 24, 1978, pp.1-55.
- Hong, X., The use of heat pipes in personal computers., IEEE.,1998, pp. 442-448.
- Mejía, C., Estudio comparativo en la aplicación de tubos de calor (heat pipes)., tesis UIS, 2006, pp.1-102.
- Mikyong, L. M., Petch, H. P., IEEE Trans., on Components and Packaging Technologies., Vol. 27, No. 1, 2006, pp. 20-216.
- Moreno, W., Aplicaciones al diseño y análisis de experimentos., 1a ed., UIS(ed.), 1993, pp.10-34.
- Ravibabu, P., Rajshekar, K., Rohit K., Heat pipes-integrated circuits coolers., Nanoelectronics Conference., Univ. of Thrissur, India, 2010, pp.260-264.
- Reid R., Heat pipe activity in the Americas -1990 to 1995 (s/f). Disponible en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.41.7160&rep=rep1&type=pdf> (consultada en enero 29 de 2008).
- Simpson, C., The fundamental of thermal design., Electronic Design., Sept., 1991, pp. 95-100.
- Xie, H., The use of heat pipes in the cooling portables unit high power packages (s/f)., Disponible en: <http://www.thermacore.com/pdfs/>. (consultada en marzo 12 de 2008).
- Zuo, J., High heat flux heat pipe mechanism for cooling of electronics., Vol. 24, IEEE, 2001, pp. 220-225.