

# Modelación y simulación de disipadores de calor para procesadores de computadora en COMSOL Multiphysics

## Modeling and simulation of heat sinks for computer processors in COMSOL Multiphysics

*Sulin Garro Acón\**

*Luis Alberto Díaz Espinoza*

*Jian Liang*

*Fabio Martínez Hernández*

*William Meneses Fuentes*

*Huber Ortega Padilla*

*Gabriel Ramírez Chaves*

*Benito Stradi Granados<sup>1</sup>*

Garro, S; Díaz, L; Liang, J; Martínez, F; Meneses, W; Ortega, H; Ramírez, G; Stradi, B. Modelación y simulación de disipadores de calor para procesadores de computadora en COMSOL Multiphysics. *Tecnología en Marcha*. Vol. 25, N° 3. Julio-Setiembre 2012. Pág 70-80.

\* Estudiantes de la Escuela de Ingeniería de los Materiales, Tecnológico de Costa Rica. Teléfono: 2550-2213. Este trabajo fue realizado durante el curso de CM-4101 (Modelamiento y Simulación), de la Escuela de Ingeniería de los Materiales, Tecnológico de Costa Rica.

<sup>1</sup> Profesor, Escuela de Ingeniería en Materiales, Tecnológico de Costa Rica. Teléfono: 8849-8605  
Correo electrónico: [escientist@hotmail.com](mailto:escientist@hotmail.com)

## Resumen

En este estudio se analizó la transferencia de calor en tres disipadores de calor utilizados para enfriar los procesadores de computadoras de escritorio.

El objetivo de estos disipadores es evitar el sobrecalentamiento de la unidad de procesamiento y la consecuente reducción de la vida útil del computador. Los disipadores de calor se modelaron usando COMSOL Multiphysics con las dimensiones reales de los dispositivos y la generación de calor se modeló con una fuente puntual.

Luego se modificaron los diseños de los disipadores para lograr una temperatura más baja en la zona más caliente del procesador. El resultado fue una reducción en la temperatura en el rango de 5-78 grados Kelvin, al rediseñarse el disipador de calor con variaciones factibles como la reducción del grosor de las placas de intercambio de calor y el aumento de su número.

Esto demuestra la posibilidad de desarrollar diseños optimizados para disipadores de calor que no requieran más materiales sino una mejor ingeniería. El trabajo se inició como parte del curso CM-4101 Modelización y Simulación.

## Palabras clave

Transferencia de calor, disipador de calor, modelización, simulación, elementos finitos.

## Abstract

In this study, the heat transfer of three desktop-computer heat sinks was analyzed.

The objective of using these heat sinks is to avoid overheating of the computer's processing unit and in turn reduce the corresponding loss in the unit's service time. The heat sinks were modeled using COMSOL Multiphysics with the actual dimensions of the devices, and heat generation was modeled with a point source.

In the next step, the heat sink designs were modified to achieve a lower temperature in the higher temperature location on the heat sink. The results were temperature reductions in the range of 5-78 degrees Kelvin, by making feasible variations in design such as reducing the thickness of the heat exchanger fins and increasing their number.

This paper demonstrates that there is room to develop improved designs that do not require more materials but rather a better engineering design. Initial work was done in the course CM-4101 Modeling and Simulation.

## Key words

Heat transfer, heat sink, modeling, simulation, finite elements.

## Introducción

El desarrollo de nuevas tecnologías en procesadores electrónicos ha producido procesadores cada vez más poderosos, que influyen todas las facetas de nuestra vida diaria. Con procesadores más poderosos, una consecuencia ha sido el incremento en la generación de calor. El calor generado en un procesador se debe principalmente a su alta frecuencia y a la alta densidad de los transistores en el integrado (Ujaldón, 2005). Este calentamiento afecta de forma directa la falla de los procesadores, las soldaduras y las uniones, debido a la fusión de materiales constitutivos al alcanzar elevadas temperaturas. Otros efectos indeseables son los esfuerzos internos generados por la dilatación y la contracción térmica. Ambos factores, el incremento de la temperatura y los estreses internos, limitan la vida útil del procesador a una cierta cantidad de ciclos de calentamiento y enfriamiento (Harper, 2005).

Según la ley empírica de Moore, el número de transistores se duplica aproximadamente cada dos años en un circuito integrado como resultado de la reducción en su tamaño, lo que también genera un aumento en la densidad de transistores por unidad de área. Este incremento en la densidad de circuitos también involucra una mayor generación de calor, lo cual lleva a una creciente necesidad de nuevas ideas y tecnologías para la disipación del calor en la implementación de los nuevos procesadores (Bar-Cohen *et al.*, 2007). Es así que el diseño de los disipadores de calor se ha visto obligado a evolucionar a través del estudio de la transferencia de calor con materiales y tecnologías que disipen calor con mayor eficacia y garanticen la operación del procesador dentro de las temperaturas de diseño durante su vida útil.

El disipador o intercambiador de calor es el encargado de la evacuación de calor desde un elemento con alta temperatura hacia un medio con menor temperatura. Su propósito es aumentar el área superficial expuesta al agente que se usa para enfriar, el cual generalmente es aire a temperatura ambiente o algún refrigerante (Harper, 2005). La transferencia de calor ocurre en la superficie del disipador de calor, la cual está compuesta por aletas o láminas cuyas características varían dependiendo, entre otros factores, de si existe circulación forzada del aire o solo convección natural.

Para reducir o eliminar los esfuerzos producidos por el calentamiento, se requiere de una adecuada selección de materiales y la minimización de los cambios abruptos de temperatura. Los materiales utilizados con frecuencia son aleaciones de aluminio o cobre que poseen una alta conductividad combinada, pero un bajo coeficiente de expansión térmica que permite uniones con otros materiales que tienen también un bajo coeficiente de expansión térmico (Harper, 2005). En las uniones se deben considerar materiales con baja resistencia térmica, que garanticen el contacto uniforme entre superficies, y en donde la diferencia de coeficientes de expansión térmica entre componentes no comprometa las propiedades mecánicas del dispositivo.

Es conveniente que el acabado sea negro para mejorar la radiación, lo cual se puede lograr, por ejemplo, al anodizar el aluminio, con lo cual se logra una mayor emisividad comparado con el metal original. De forma similar, el cobre que se usa para fabricar las aletas suele ser pintado o platinado para incrementar la emisividad. Puede ocurrir también que muchas veces se deje el metal expuesto y entonces únicamente se protege de la corrosión. En todos los casos, el acabado no debe aumentar la resistencia de la transferencia de calor del disipador de calor al fluido enfriante (Chitode, 2009).

Los factores considerados para mejorar el desempeño de un disipador, en otras investigaciones, fueron el aumento de la longitud, el ancho, la altura, el espesor y el número de aletas (Manivannan *et al.*, 2010), y sus autores confirman que las dimensiones que tienen mayor influencia en la transferencia de calor son la variación de la longitud (21,87%), de la altura (27,58%) y del ancho (27,53%), para un disipador rectangular compacto con aletas rectangulares rectas de sección uniforme.

Se puede utilizar un paquete de simulación para reproducir la operación de un disipador en su operación tradicional y servir también para proponer nuevas configuraciones. Por ejemplo, una nueva configuración puede considerar más aletas y diferentes formas. Estas configuraciones se pueden evaluar de forma preliminar para elegir la más prometedora, con la que se puede pasar a la etapa de construcción de un prototipo. Desde luego, existen ahorros importantes, no solo de tiempo, sino

Cuadro I. Nomenclatura

Símbolo	Variable	Unidades
$s$	Constante de Stefan Boltzmann	$W/(m^2K^4)$
$e$	Emisividad del material	
$h_{trans}$	Coefficiente convectivo de transferencia calor	$W/(m^2K)$
$k$	Coefficiente de conductividad térmica	$W/(mK)$
$n$	Vector normal a la superficie de transferencia de calor	
$Q$	Calor generado	$W/m^2$
$\nabla$	Operador diferencial	
$T$	Temperatura	K
$\nabla T$	Gradiente de la temperatura	
$T_{ambtrans}$	Temperatura ambiente	K
$T_{ext}$	Temperatura externa	K

también de recursos, al probar las configuraciones en un ambiente virtual y no tener que construir cada caso en un taller para luego probarlo.

La necesidad de computarizar este proceso de diseño también se ha hecho evidente con la creciente industria de micro y nanoelectrónica, cuyas exigencias de diseño por limitaciones de espacio, peso y materiales hacen necesario un diseño en computadora previamente a cualquier prototipo. De esta forma, se desarrollan investigaciones *in silico* sobre cómo se puede hacer la disipación de calor en escalas micro y nano en donde un disipador de calor tradicional es muy grande. Así, se han generado planteamientos de otras formas de refrigeración, como el uso de un líquido refrigerante en microcanales. En esta área también se han investigado tecnologías de enfriamiento en nanocomponentes como los basados en materiales termoeléctricos, donde se busca homogeneizar las llamadas “manchas solares” en la distribución de temperatura en un microchip y lograr un enfriamiento uniforme por medio de materiales semiconductores (Bar-Cohen *et al.*, 2007).

Otro de los temas estudiados actualmente para la mejora en los sistemas de disipación de calor es la predicción del flujo en microcanales (Thome *et al.*, 2010), el efecto del espesor, la influencia del tipo de material utilizado en ellos (Kosar, 2009) y el efecto de la forma del microcanal en la caída de presión (Dang *et al.*, 2010).

En otro trabajo de modelación se estudió el efecto al variar las dimensiones de un microalfiler de un disipador sobre el flujo de aire (Koz *et al.*, 2011). En ese trabajo se demuestra cómo la relación entre las dimensiones del microalfiler puede ayudar a mejorar la transferencia al influir sobre la turbulencia del fluido y cómo puede alcanzarse una mayor uniformidad de temperatura para lograr un sistema concentrado.

Otras investigaciones en transferencia de calor simuladas con COMSOL Multiphysics que han llegado a importantes resultados en la mejora de disipadores, son las del estudio de disipadores de pozo (Zanchini *et al.*, 2009) y el modelaje de intercambiadores de tubos con aletas (Comini *et al.*, 2008).

### Metodología

Se simularon tres disipadores de calor, numerados I, II y III, que se utilizan en computadoras de escritorio. La geometría de estos se varió para mejorar su desempeño y se modelaron en estado estable.

Los disipadores I y III se modelaron en 3D, mientras que el II se trabajó en 2D. Los modelos en 2D y 3D pueden prepararse en Autocad, SolidWorks, Inventor u otro *software* para diseño asistido por computadora y posteriormente se pueden importar a COMSOL Multiphysics. Sin embargo, resulta preferible en estos casos el desarrollo de la arquitectura del disipador de calor directamente en

COMSOL Multiphysics, para evitar problemas con la geometría a la hora de la conversión de formatos de un software a otro, y así fue como se procedió en este trabajo.

El módulo de COMSOL Multiphysics utilizado fue el de Transferencia de Calor, para conducción en sólidos, en el cual se aplican las ecuaciones 1, 2 y 3. La solución de la ecuación diferencial (1) genera el perfil de temperaturas en el sólido,

$$n \cdot (k \nabla T) = Q + h_{trans} (T_{ext} - T) + \sigma \epsilon (T_{ambtrans}^4 - T^4) \quad (1)$$

en donde

- $T$  es la temperatura.
- $n$  es el vector normal a la superficie del sólido que apunta hacia afuera de la superficie.
- $k$  es la conductividad térmica del material.
- $\nabla$  es el operador diferencial.
- $\nabla T$  es el gradiente de la temperatura.
- $Q$  es la magnitud de la fuente de energía que se aplica a todo el volumen.
- $h_{trans}$  es el coeficiente de transferencia de calor que se aplica a todo el volumen.
- $T_{ext}$  es la temperatura externa al sólido percibida en la periferia del material.
- $\sigma$  es la constante de Stefan Boltzmann.
- $\epsilon$  es la emisividad del cuerpo que irradia calor.
- $T_{ambtrans}$  es la temperatura del medio ambiente.

El lado izquierdo se refiere al proceso de transferencia de calor en el sólido, y en el lado derecho se tiene la generación homogénea de energía dentro del sólido, la transferencia de energía por convección dentro del sólido, y en el último término la transferencia de calor por radiación de todo el sólido. Las variables en negrita son vectores.

Para nuestro análisis no se utilizó un componente de radiación o convección, ya que estos no existen dentro del sólido, solo en la superficie, y por lo tanto radiación y convección se deben tomar en cuenta en las condiciones de frontera. Para reducir la dificultad del modelo, se nota en este caso que en las

condiciones de frontera el efecto de la radiación no es importante, debido a la presencia de enfriamiento por convección forzada (Cengel, 2007).

En las superficies que se consideraron térmicamente aisladas, es decir, adiabáticas, se utilizó la ecuación 2,

$$n \cdot (k \nabla T) = 0 \quad (2)$$

y en las superficies internas donde se aplica la continuidad del flujo de calor se utilizó la ecuación 3.

$$n \cdot (k_1 \nabla T - k_2 \nabla T) = 0 \quad (3)$$

La ecuación 3 define que el calor que ingresa por medio del material 1 va a salir a través del material 2. Esto es un balance de energía necesario para las interfaces en donde el calor de un componente fabricado en cobre es transferido a través de la interfaz a un componente hecho de aluminio u otro material similar. La nomenclatura sigue las mismas definiciones que para la ecuación 1.

El mallado de los modelos se realizó en COMSOL Multiphysics. Se utilizó una malla con elementos finitos triangulares y se verificó la independencia de los resultados con el tamaño de los elementos tras varias simulaciones para los tres modelos. En el cuadro 2 se muestran los detalles del mallado.

**Cuadro 2. Especificación del mallado de los disipadores I, II y III**

Disipador	Tipo de elemento	Cantidad de elementos
I	Triangular	58 428
II	Triangular	9 541
III	Triangular	62 594

Los subdominios se dividieron por materiales; en el cuadro 3 se especifican los materiales considerados.

Las condiciones de frontera consideradas fueron las siguientes:

1. En las aletas ocurre la transferencia de calor por convección forzada hacia el fluido de enfriamiento.
2. Existe continuidad en la transferencia de calor en las fronteras donde se unen materiales distintos.
3. Otras superficies conductoras de calor son adiabáticas, conducen el calor hacia las aletas pero no hacia el fluido de enfriamiento. En el

Cuadro 3. Materiales utilizados en los disipadores de calor

Material	Conductividad térmica [W/(m*K)]	I	Disipador II	III
Cobre	400	aletas	-	núcleo
Aluminio	160	base	base	aletas
Bronce	170	-	aletas	-

disipador de calor II la base también ayuda en la disipación de calor:

En las ilustraciones, las dimensiones están en metros. Las fuentes puntuales de calor para los disipadores de calor I, II y III tenían potencias de  $1e-4/abs((x-0.119)*(y-0.195)*(z-2.5e-3))$  W/m<sup>3</sup>,  $1.8e-10/abs((x-0.0715)*(y-0.0315))$  W/m<sup>2</sup> y  $1/(abs((x-0.03)*(y-0.04)*(z-0)))$  W/m<sup>3</sup>, respectivamente.

### Resultados y discusión

Los disipadores se modelaron por medio de COMSOL Multiphysics, un *software* de análisis y modelamiento de sistemas descritos por ecuaciones diferenciales parciales. Utiliza el método de solución por elementos finitos y puede ser aplicado a problemas en las ciencias e ingeniería. En este *software* de modelación se desarrollaron los diseños de los disipadores de calor y sus variaciones para disminuir la temperatura más alta en la superficie del procesador:

### I. Disipador de calor I

Este disipador cuenta con dos brazos a 90°, aletas delgadas, canales en la base y aletas cilíndricas en la parte de abajo de los brazos. El procesador, colocado en el centro, genera el calor transferido hacia y disipado por las aletas. En su instalación normal, este modelo específico usa dos ventiladores centrífugos que soplan aire entre las aletas para disipar el calor por convección forzada. El modelo se realizó en 3D y se presenta en la figura 1. Las características geométricas y los resultados de simulación se observan en el cuadro 4.

La base de aluminio cuenta con canales (figura 2). En la simulación inicial se despreció el flujo de calor a través de la base. Se mostró la mejora en la eficiencia de este disipador, simulando que existe transferencia por convección a través de los canales y las pequeñas aletas cilíndricas que inicialmente fueron despreciadas.

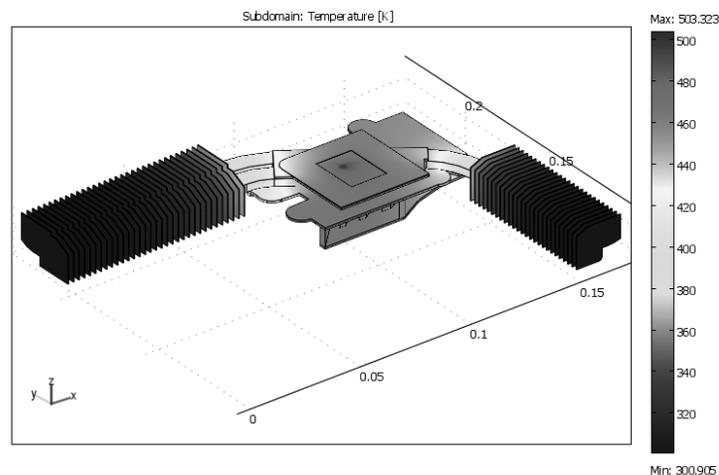


Figura 1. Disipador de calor I, transferencia por convección solo por las aletas.

Cuadro 4. Geometría y resultados del disipador de calor I.

Modelo I	Coefficiente convección (W/m <sup>2</sup> K)	Área superficial (m <sup>2</sup> )	Espesor aletas (mm)	Número de aletas	Distancia entre aletas (mm)	Temperatura mínima (K)	Temperatura máxima (K)
Inicial	150	0,041	0,27	59	2,23	300.905	503.323
Final	150	0,045	variable	70	variable	299.628	425.312

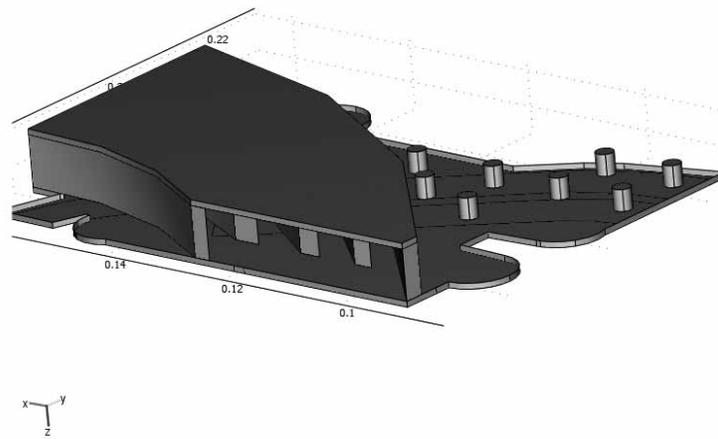


Figura 2. Canales de la base de aluminio y aletas extras en la base del disipador de calor.

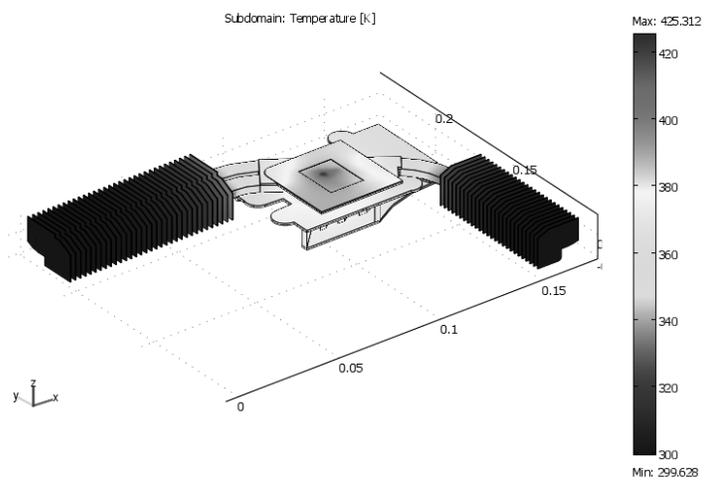


Figura 3. Disipador de calor I, transferencia de calor por convección por las aletas y los canales de la base.

En este caso, se tiene una fuente puntual de calor sobre el disipador que se indica con un punto rojo en la superficie. La tarea del disipador de calor es reducir la temperatura por debajo de un máximo operacional aceptable. En este caso, el resultado de aumentar en 11 unidades las aletas y permitir el flujo forzado por los canales en la base del disipador; permitió una reducción de temperatura de 78.011 K en la máxima temperatura. De ahí que se pueda lograr, con variaciones en geometría y un flujo convectivo por las aletas y la base, una temperatura mucho más baja que la inicial.

## 2. Disipador de calor II

Este disipador está formado por brazos y aletas de bronce montados sobre una base de aluminio. Funciona con un ventilador axial que sopla aire sobre el disipador de calor y genera transferencia de calor por convección forzada en las aletas. Se simuló el caso donde el punto que genera el calor se encuentra alejado de las aletas y por la tanto constituye un caso

crítico porque la temperatura tenderá a un máximo al encontrarse la fuente de calor alejada del área de contacto con el refrigerante.

En el cuadro 5 se muestran los detalles del diseño, las variaciones aplicadas y las temperaturas máximas. Se realizaron tres cambios al diseño original del disipador de calor: El primero fue la reducción del espesor de las aletas, pasando de 1 mm de espesor inicial a 0,3 mm en el modelo final. El segundo cambio fue ampliar la distancia entre las aletas de 1 a 2 mm. El tercer cambio fue el incremento del número de aletas de 15 a 21.

El resultado de las modificaciones al diseño es una disminución de 78.369 K, lo cual es una reducción considerable en la máxima temperatura del disipador de calor.

## 3. Disipador de calor III

Este es el tipo de disipador que se coloca sobre el procesador del computador y encima del disipador

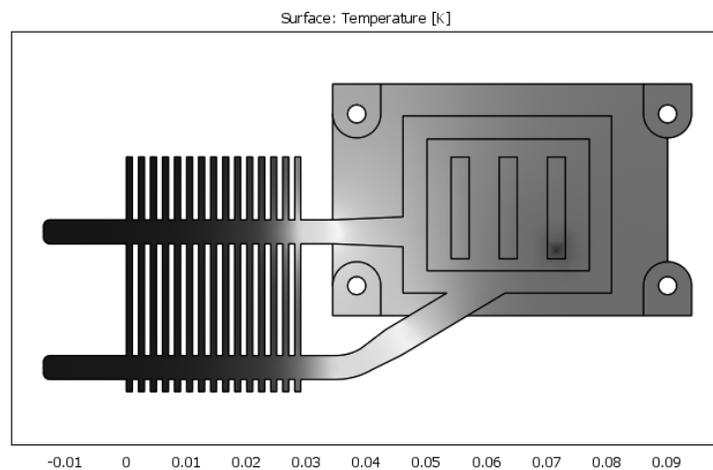


Figura 4. Disipador de calor II, la fuente de calor se encuentra hacia la esquina inferior derecha.

Cuadro 5. Geometría y resultados del disipador de calor II.

Modelo II	Coefficiente convección (W/m <sup>2</sup> K)	Perímetro de aletas (m)	Espesor aletas (mm)	Número de aletas	Distancia entre aletas (mm)	Temperatura mínima (K)	Temperatura máxima (K)
Inicial	150	1,08	1	15	1	303.601	429.63
Final	150	1,48	0,3	21	2	298.833	351.26

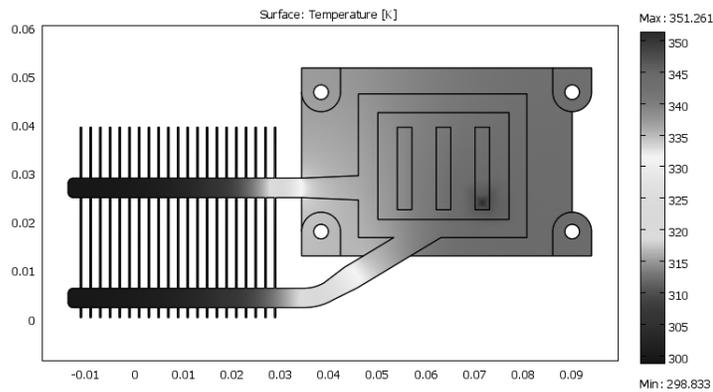


Figura 5. Disipador de calor II, aumento en el número de aletas y disminución del espesor.

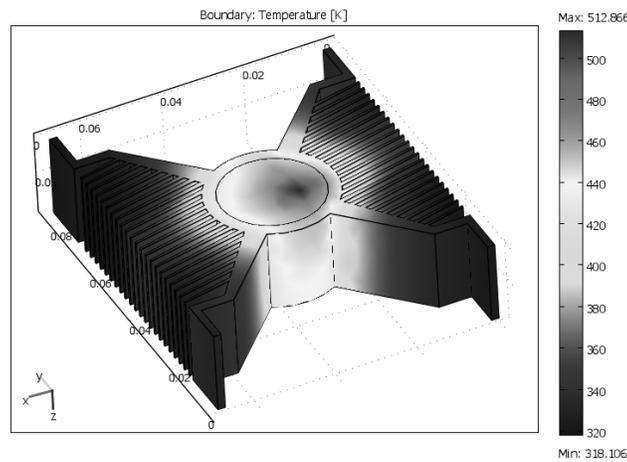


Figura 6. Disipador de calor III, la fuente de calor se encuentra hacia el centro.

Cuadro 6. Geometría y resultados del disipador de calor III.

Modelo III	Coefficiente convección (W/m <sup>2</sup> K)	Área superficial (m <sup>2</sup> )	Espesor aletas (mm)	Número de aletas	Distancia entre aletas (mm)	Temperatura mínima (K)	Temperatura máxima (K)
Inicial	150	0,040	0,7	48	2	318.106	512.866
Final	150	0,078	0,7	90	2	305.124	507.484

se instala un ventilador tipo axial para circular aire, que es el fluido refrigerante.

Se buscó mejorar la transferencia de calor del disipador al aumentar el número de aletas. Se variaron los materiales para observar el comportamiento del perfil de temperaturas. En este trabajo se reporta

solo la selección final, en donde la sección cilíndrica interna es de cobre y las aletas son de aluminio, que es la configuración más económica.

El disipador de calor III presenta una disminución en la temperatura máxima de 5.382 K, esto es el resultado de que, a pesar de que el cilindro del

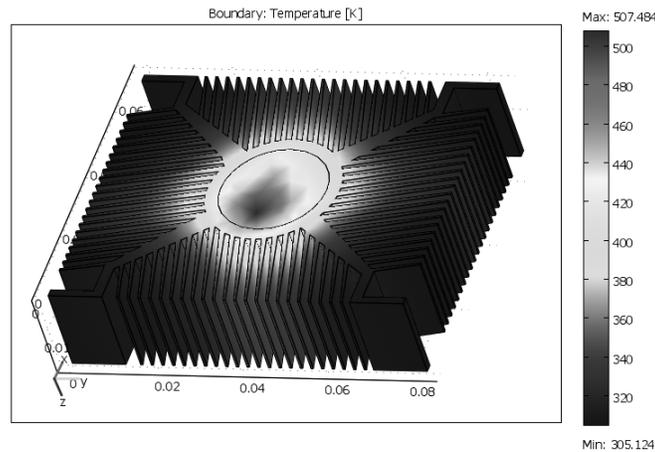


Figura 7. Disipador de calor III, aumento del número de aletas.

centro del intercambiador es de cobre y es un buen conductor; las aletas son de aluminio y este tiene una conductividad mucho menor que la del cobre, lo cual crea resistencia en la disipación del calor. Una alternativa podría ser construir todo el intercambiador en cobre pero el costo del dispositivo sería mucho mayor. Esto demuestra que la solución más económica no necesariamente es la más eficiente.

## Conclusiones

Se analizaron tres disipadores de calor utilizando COMSOL Multiphysics, observándose que se pueden hacer mejoras al diseño al modificar la arquitectura del dispositivo.

En el disipador de calor I, se observó una disminución de la temperatura en 78 011 K en la temperatura máxima con respecto al diseño original.

En el disipador de calor II, la mejora resulta del aumento de las aletas y la disminución del espesor de estas. La temperatura máxima se redujo en 78 369 K.

Por último, en el modelo III se agregó un mayor número de aletas. La temperatura máxima disminuyó en 5,4 K. Se observó que, aunque la temperatura máxima no se redujo en gran medida, la distribución de la temperatura mejoró a través del disipador al existir más aletas.

En estas modificaciones, eventualmente se tienen que considerar varios factores, entre ellos el costo de los materiales, el espacio disponible para instalar los disipadores y la caída de presión del aire por los espacios libres entre las aletas a la hora de dimensionar el disipador de calor.

## Agradecimientos

Los autores desean agradecer la colaboración con bibliografía especializada del Dr. Scott Mainwaring (Eugene P. and Helen Conley Professor) y Judy Bartlett, del Instituto Helen Kellogg para los Estudios Internacionales de la Universidad de Notre Dame.

The authors wish to thank the collaboration with specialized literature from Dr. Scott Mainwaring (Eugene P. and Helen Conley Professor) and Judy Bartlett at the Helen Kellogg Institute for International Studies of the University of Notre Dame.

## Bibliografía

- Bar-Cohen, A.; Wang, P. & Rahim, E. (2010). *Thermal Management of High Heat Flux Nanoelectronic Chips*. Z-Tec Publishing, Bremen Microgravity Science and Technology 19 3/4, 48-52.
- Cengel, Y.A. (2007). *Transferencia de Calor y Masa: Un enfoque práctico*. México: McGraw-Hill.
- Chitode, J. (2009). *Industrial Electronics*. India: Technical Publications.

- Comini, G. & Savino, S. (2009). *Accuracy of one-dimensional design procedures for finned-tube heat exchangers*. Applied Thermal Engineering 29, 2863-2869.
- Dang, T.; Teng, J.-T. & Chu, J.C. (2010). *A study on the simulation and experiment of a microchannel counter-flow*. Applied Thermal Engineering 30, 2163-2172.
- Harper, C.A. (2005). *Electronic Packaging and Interconnection Handbook*. New York: McGraw-Hill.
- Kosar, A. (2009). *Effect of substrate thickness and material on heat transfer*. International Journal of Thermal Sciences 49, 635-642.
- Koz, M.; Ozdemir, M.R. & Kosar, A. (2010). *Parametric study on the effect of end walls on heat transfer and fluid*. International Journal of Thermal Sciences 50, 1073-1084.
- Manivannan, S.; Prasanna, S.; Arumugam, R. & Sudharsan, N. M. (2010). *Multi-objective optimization of flat plate heat sink*. International Journal of Advanced Manufacturing Technolgy 52, 739-749.
- Stradi, B. (2011). *Introduction to Comsol Multiphysics Workbook*. Cartago: Institute of Technology of Costa Rica.
- Thome, J. & Consolini, L. (2010). *Prediction of critical flux in microchannels*. Microfluidics Based Microsystems: Fundamentals and Applications, DOI 10.1007/978-90-481-9029-4\_6, 107-120.
- Ujaldón, M. (2005). *Procesadores Gráficos para PC*. España: Ciencia-3.
- Zanchini, E.; Lazzari, S. & Priarone, A. (2009). *Improving the thermal performance of coaxial borehole heat exchangers*. Energy 35, 657-666.