

## Disipadores de calor de minicanales y minialetas: Una revisión del estado del arte

Víctor Manuel Hernández Montecillo<sup>1</sup>, Yakelin Hernández García<sup>2</sup>, Alan Cerroblanco Ortiz<sup>3</sup>, Francisco Uriel Duarte Rostro<sup>4</sup>, Leonardo Sáinz García<sup>5</sup>, Esaú Hernández Carlos<sup>6</sup>, J. Luis Luviano Ortiz<sup>7</sup>.

Universidad de Guanajuato  
vm.hernandezmontecillo@ugto.mx<sup>1</sup>  
y.hernandez.garcia@ugto.mx<sup>2</sup>  
a.cerroblancoortiz@ugto.mx<sup>3</sup>  
fu.duarterostro@ugto.mx<sup>4</sup>  
l.sainzgarcia@ugto.mx<sup>5</sup>  
e.hernandezcarlos@ugto.mx<sup>6</sup>  
luis.luviano@ugto.mx<sup>7</sup>

### Resumen

La disipación de calor en componentes electrónicos ha sido de vital importancia debido al creciente desarrollo de los mismos, ya que su mejora continua, miniaturización, alta potencia y exactitud provocan altos flujos de calor, los cuales tienen que ser controlados debido a que esto impacta al funcionamiento óptimo de los sistemas electrónicos. El objetivo de este artículo es recopilar información y resultados de diferentes trabajos recientes sobre las distintas formas de transferencia de calor en estos dispositivos y cómo se ha atacado este problema desde diferentes enfoques. Una solución está en la implementación de diferentes geometrías variando sus parámetros dimensionales y encontrando el más adecuado para cada fenómeno cuidando parámetros como la caída de presión, resistencia térmica, número de Reynolds, entre otros. Otro enfoque con alta tendencia es el uso de diferentes sustancias, diferentes al agua y aire comúnmente utilizadas, como fluido de trabajo, ya que estudios recientes han revelado que la implementación de nanofluidos para estas aplicaciones brindan buenos resultados en comparación con el agua o aire debido a su capacidad de transferencia de calor por sus propiedades termofísicas, logrando bajas potencias de bombeo en comparación a los trabajos en donde se utiliza metal líquido de diferentes aleaciones.

**Palabras clave:** Nanofluidos, minialetas, convección, minicanales

### Introducción

La transferencia de energía es observable en la naturaleza de distintas maneras y en distintas escalas, la evaluada a través de este documento es la transferencia de calor. A su vez, este tipo de movimiento de energía está limitado a tres formas ampliamente estudiadas, estas son la convección, conducción y radiación. La transferencia de calor por convección se compone de dos mecanismos simultáneos. El primero, es la transferencia de calor por conducción, debido al movimiento molecular, a la que se adiciona la transferencia de energía por el movimiento de algún fluido que se mueven accionadas por una fuerza externa, que puede ser un gradiente de densidad (convección natural), o una diferencia de presión producida mecánicamente (convección forzada) o una combinación de ambas. Es un fenómeno interesante que será analizado a través de la revisión de distintos proyectos encontrados en el estado del arte presentados a través de este trabajo.

Las leyes que gobiernan la transferencia de calor son las ecuaciones de continuidad, momento y energía. A continuación se hace una descripción de dichas ecuaciones.

#### Ecuación de Continuidad

La ecuación de continuidad es un producto de la Ley de Conservación de la Masa, que desarrolla que en un conducto, sin importar su sección, mientras no existan derivaciones, la cantidad de flujo a la entrada debe salir íntegramente del sistema.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

### Ecuación de Momento

La ecuación simplificada para un caso tridimensional es aplicable a los trabajos encontrados en la búsqueda del estado del arte, a continuación se muestran las derivaciones para cada componente cartesiano.

$$\rho_f \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu_f \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho_f \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu_f \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$\rho_f \left( u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu_f \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

### Ecuación de Energía

La ecuación de energía existe en distintas variantes derivadas para aplicaciones específicas, para los distintos modelos mostrados se utilizarán dos de ellas.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\rho_f C_{p,f}}{k_f} \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (6)$$

Aplicando las ecuaciones descritas en los anteriormente, podemos desarrollar los modelos computacionales o experimentales que se describen en los artículos referenciados en este trabajo. Estas ecuaciones matemáticas describen el fenómeno de transferencia de calor. La solución a problemas complejos de este tipo se lleva a cabo por medio de software especializado, empleando algún método de discretización (método finito, volumen finito o diferencias finitas).

### Nomenclatura de las ecuaciones (1)-(6)

$\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial z}$	Derivada parcial de la velocidad en i con respecto de cada componente cartesiana
$\frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial z}$	Derivada parcial de la velocidad en j con respecto de cada componente cartesiana
$\frac{\partial w}{\partial x}, \frac{\partial w}{\partial y}, \frac{\partial w}{\partial z}$	Derivada parcial de la velocidad en k con respecto de cada componente cartesiana
$\rho_f$	Densidad del fluido de trabajo
$u, v, w$	Velocidad en i, j, k
$\frac{\partial P}{\partial x}, \frac{\partial P}{\partial y}, \frac{\partial P}{\partial z}$	Derivada parcial de la presión con respecto de cada componente cartesiana
$\mu_f$	Viscosidad del fluido
$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$	Segunda derivada parcial de la velocidad en i con respecto a cada componente cartesiana
$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}, \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$	Segunda derivada parcial de la velocidad en j con respecto a cada componente cartesiana
$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}, \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}, \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}$	Segunda derivada parcial de la velocidad en k con respecto a cada componente cartesiana
$C_{p_f}$	Calor específico del fluido
$k_f$	Coefficiente convectivo del fluido
$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$	Segunda derivada parcial de la temperatura con respecto a cada componente cartesiano
$\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z}$	Primera derivada parcial de la temperatura con respecto a cada componente cartesiano

### Nanofluidos como fluido de trabajo

Dominic *et al.* [1] estudiaron el efecto de onda sobre la transferencia de calor en un disipador de minicanales ondulados utilizando agua ionizada y nanofluido de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /agua. Los resultados mostraron un incremento de la caída de presión y del número de Nusselt con el aumento de la ondulación relativa. Sin embargo, cuando reemplazaron agua por nanofluido como refrigerante, incrementó el rendimiento térmico del disipador de calor. La refrigeración de un microprocesador para ordenadores fue investigada por Shoukat *et al.* [2] en el que emplearon diferentes tipos de nanofluido (nanopartículas de óxido de aluminio y óxido de plata,) en un disipador de calor con aletas del tipo alfiler. Determinaron que los nanofluidos utilizados como refrigerantes incrementaron la transferencia de calor en comparación con el agua. Además, el nanofluido  $\text{AgO-H}_2\text{O}$  proporcionó una razón de transferencia de energía de 7.17% mayor que cualquier nanofluido utilizado. Ataei *et al.* [3] investigaron experimentalmente la disipación de calor de una superficie calentada mediante el uso de minicanales y el empleo de agua destilada, nanofluido de  $\text{TiO}_2$ -agua, nanofluido de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -agua y nanofluido híbrido de  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ -agua. Los nanofluidos analizados resultaron ser más eficientes. Kumar y Sarkar [4] investigaron los efectos de la velocidad, temperatura de entrada y la proporción de mezcla de nanofluidos  $\text{Al}_2\text{O}_3$  híbridos y con nanopartículas de nanotubos de carbono multipared tratados con ácido (MWCNT) en varias proporciones de mezcla (10:0 a 0:10) sobre el rendimiento termo-hidráulico. Las características térmicas como el coeficiente de transferencia de calor, número de Nusselt, la caída de presión y el factor de fricción incrementaron con la fracción de partículas MWCNT en el nanofluido híbrido.

El análisis del comportamiento termohidráulico en un disipador de calor de minicanal con geometrías de cabecera convencional y optimizada fue estudiado por Awais y Kim [5] mediante el uso del nanofluido  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -agua y agua destilada como refrigerantes. Los resultados experimentales y numéricos mostraron una buena concordancia, el disipador de calor de minicanal con la geometría de cabecera optimizada exhibió un coeficiente de transferencia de calor general un 17 % más alto y una reducción del 43 % en la caída de presión. Bahiraei y Heshmatian [6] por su parte, han revisado los estudios recientes realizados sobre el uso de nanofluidos a base de nanopartículas de carbono, óxido,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CuO}$ , silicio,  $\text{ZnO}$ , diamante y oro, así como nanopartículas magnéticas y nanofluidos híbridos en el enfriamiento de productos electrónicos. Mientras que, Mashali *et al.* [7] han investigado experimentalmente la mejora de la transferencia de calor y el

comportamiento de un novedoso nanodiamante que fluye en condiciones de flujo turbulento para su aplicación en un sistema de refrigeración cerrado. Obteniendo que la inclusión de nanopartículas en agua desionizada como fluido base ha producido una mejora considerable (hasta un 27 %) del coeficiente de transferencia de calor por convección de refrigeración. Kumar y Sarkar [8], realizaron una simulación numérica del flujo de convección forzada laminar del nanofluido  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -agua, el nanofluido híbrido  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – MWCNT y otros nanofluidos híbridos, en un dissipador de calor de minicanal utilizando un modelo de mezcla de dos fases. Mediante esta simulación se encontró un coeficiente máximo de transferencia de calor para un nanofluido híbrido de 0.01 % en volumen ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  +MWCNT) (7:3) para una profundidad de minicanal de 0.5 mm y aumenta entre un 30% y un 35% con la disminución del diámetro hidráulico del canal de 0.0015 m a 0.001 m. La caída de presión se ha encontrado máxima para el minicanal de 0.5 mm de profundidad de canal. Se ha observado una mejora máxima del coeficiente de transferencia de calor del 15.6 % sin un incremento apreciable en la caída de presión mediante el uso de nanofluidos híbridos. Con el desarrollo de un modelo detallado de dinámica de fluidos computacional (CFD) no isotérmico tridimensional completo, Al-Baghdadi *et al.* [9] estudiaron el rendimiento térmico del dissipador de calor de microcanal que trabaja con varios refrigerantes (agua, nanofluidos: agua- $\text{SiO}_2$ , agua-CuO y agua-  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). El estudio reveló que estudiar los parámetros de rendimiento de un dissipador de calor de microcanal en función de Re es engañoso debido a la diferencia en las propiedades termofísicas de los diferentes refrigerantes, y el emplear nanofluidos en un dissipador de calor de microcanal no es práctico, ya que el agua es más barata y segura. Sarafraz y Arjomandi [10], llevaron a cabo una investigación experimental sobre el rendimiento térmico de un microcanal que trabaja con nanosuspensiones de indio líquido de óxido de cobre; para ello, dispersaron nanopartículas de óxido de cobre (con un tamaño medio de partícula de 50 nm) en el indio líquido y los experimentos se realizaron a 170 °C para evitar la solidificación. Obtuvieron que la relación no lineal entre el flujo de calor aplicado y el coeficiente de transferencia de calor de la nanosuspensión de CuO/In da como resultado una mejora en el coeficiente de transferencia de calor a flujos de calor más altos.

Bahiraei, Jamshidmofid y Goodarzi [11] evalúan los atributos termo hidráulicos en un dissipador con micro canales con costillas y canales secundarios por el cual fluyen nano fluidos con nanopartículas de grafeno-plata. Los resultados muestran que con el implemento de las costillas y canales secundarias se reduce la caída de presión, al aumentar el número de Reynolds la temperatura disminuye, aumenta la uniformidad y las regiones con temperatura más altas disminuyen, aumenta el coeficiente de transferencia por convección. En la Figura 1 se muestra el diseño del dissipador de calor. Akbari, Khodabandeh, Kahbandeh, Toghraie y Khalili [12] analizan el flujo laminar para el flujo de nanofluidos f-GN, se analizan microcanales con cavidad y el objetivo principal es determinar el efecto de la condición de contorno de la velocidad de entrada para dos estructuras en microcanal rectangular. Los resultados de este estudio muestran que cambiar el camino en el inicio y el final del microcanal crea diferencias en el campo de flujo. Las geometrías mostradas en la Figura 2, representan a los modelos utilizados para el análisis.

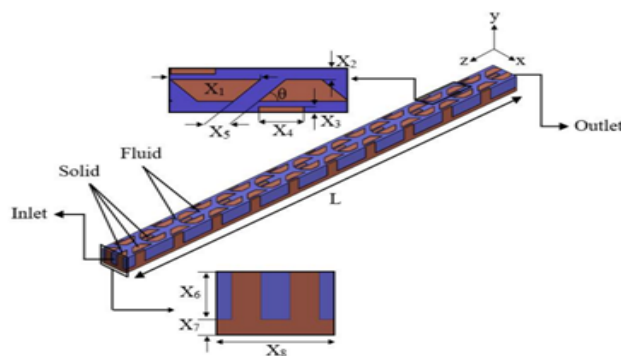


Figura. 1 – Diagrama esquemático y parámetros del microcanal [11].

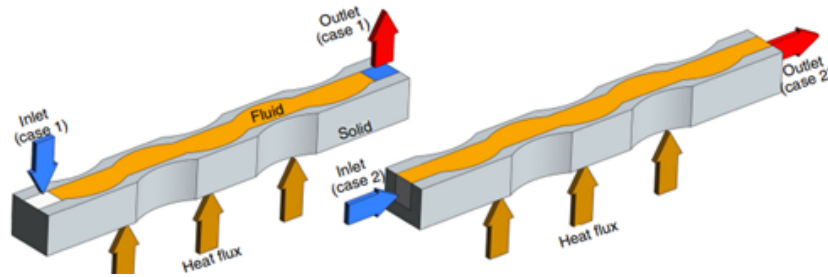


Figura. 2 – Nuevo diseño de microcanal considerado en este estudio para diferentes condiciones de entrada y salida [12].

## Metal líquido

Sarowar [13] estudió el rendimiento térmico de un disipador de calor de mini-canal con cinco materiales de sustrato diferentes (nitruro de aluminio, óxido de berilio, diboruro de hafnio, diboruro de titanio y diboruro de circonio) y cuatro aleaciones diferentes de galio como fluido de trabajo. Se ha encontrado que el disipador de calor hecho de nitruro de aluminio (AlN) muestra un rendimiento superior a todos los demás materiales de sustrato. El material refrigerante óptimo encontrado tras el análisis es el GaIn. Empleando un modelo de resistencia térmica en el que se consideraron los efectos de entrada hidrodinámicos y térmicos, Xiang *et al.* [14] calcularon las resistencias térmicas totales de disipadores de calor de microcanales a base de agua y galio. Realizando el estudio de una sola variable y de una multivariable, y obteniendo los valores críticos de los parámetros geométricos basado en las regiones factibles tridimensionales, los resultados indicaron que solo cuando la longitud del disipador de calor es menor que la longitud crítica, o la altura del microcanal es mayor que la altura del canal crítico, o el ancho del microcanal es mayor que el ancho del canal crítico, o el ancho de la aleta es más pequeño que el ancho crítico de la aleta, el disipador de calor a base de galio logra una resistencia térmica menor que la del a base de agua.

## Efecto de los parámetros geométricos en el desempeño de la transferencia de calor

Es de especial interés en el desarrollo de disipadores de calor el mejorar el desempeño térmico sin cambiar las condiciones de operación, como el fluido de trabajo o tipo de materiales. En estos casos, se puede lograr una mejora en el desempeño al modificar la geometría del disipador, con la intención de lograr un efecto en el flujo que pueda reducir la presión de bombeo (para reducir costos de operación), u obteniendo una mejora en los parámetros que influyen en el desempeño en la transferencia de calor, como el número de Nusselt y el coeficiente convectivo. En esta sección se presentan los avances recientes en el diseño de intercambiadores de calor al hacer un cambio u optimización de los parámetros de diseño geométricos.

## Minicanales: Patrones periódicos

Rezaee *et al.* [15] realizaron una investigación numérica y experimental de cuatro modelos mejorados de disipadores de calor con aletas refrigerados con agua, en el que modificaron la longitud de las aletas y el paso longitudinal. Los modelos mejorados de los disipadores de calor se muestran en la Figura 3. Los resultados muestran que, en comparación con el caso convencional con minicanales rectos, los modelos propuestos presentaron valores más altos de caída de presión y del coeficiente convectivo. Se registraron valores de aumento entre el 87,5% y el 284,6% para la caída de presión y entre el 73,3% y el 121,1% para el coeficiente de transferencia de calor.

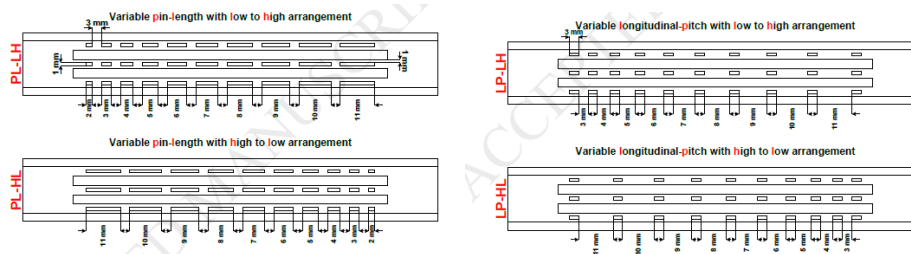


Figura. 3 – Configuración y detalles de los disipadores de calor considerados para el análisis [15].

Con la finalidad de evitar la ineficiencia del rendimiento térmico de los disipadores de calor con mini-canales rectos, Tikadar *et al.* [16] estudiaron numéricamente la transferencia de calor de un nuevo disipador de mini-canal interconectado refrigerado por agua (ICMCHS), en el que colocaron dos interconectores (IC) transversalmente entre dos mini canales de contraflujo (CMC) repartiendo el dominio del flujo en tres zonas. Lim y Lee [17] propusieron un disipador de calor de doble capa con la finalidad de obtener contraflujo. El disipador de calor está formado por capas de dos canales y una estructura de cabecera/plenaria que sirve como ruta de preflujo para el contraflujo en los canales. El estudio fue desarrollado experimentalmente, en el que se encontró que la resistencia térmica muestra un valor significativamente pequeño de  $10^{-4}$  K-m<sup>2</sup>/W orden, lo que indica la ventaja de rendimiento de transferencia de calor del nuevo disipador de calor. El rendimiento termo-hidrodinámico de los disipadores de calor de mini-canal para el espaciado de las aletas de 0.2 mm a 1.5 mm con varios arreglos de flujo dual fue investigado numéricamente por Tariq *et al.* [18]. Ellos determinaron una distribución uniforme de la temperatura en todas las disposiciones de doble flujo analizadas. La disminución máxima de la temperatura base se presentó en la disposición de flujo rectangular de entrada-salida (sin separación) en un 14.3%, 15.4%, 16.06% y 15.6% para una separación de aletas de 0.2 mm, 0.5 mm, 1 mm y 1.5 mm, respectivamente, en comparación con la disposición convencional de flujo único que utiliza agua como refrigerante.

Zeng y Lee [19], exploraron la capacidad del método de optimización de topología basado en la densidad para diseñar disipadores de calor planos enfriados por agua. Los diseños de canales no convencionales y las estructuras de aletas con buen rendimiento se generan a través de la optimización de la topología. La comparación de rendimiento de su modelo mostró que los disipadores de calor de topología optimizada podrían ahorrar hasta un 50.9 % de potencia de bombeo con el mismo requisito de rendimiento térmico. Mediante la optimización del disipador de calor de microcanal refrigerado por agua con muesca y aleta, Li *et al.* [20] investigaron en detalle los efectos combinados de los parámetros de la estructura (diámetro de la aleta, la profundidad del hoyuelo y el espaciado de la corriente) en la estructura del flujo y la transferencia de calor. Con los resultados, el aumento del diámetro de la aleta y la disminución del espacio de la corriente pusieron de manifiesto el aumento de  $Nu/Nu_0$  bajo todos los  $Re$  estudiados. Las estructuras de flujo inducidas por la aleta de pin hicieron que el desarrollo del flujo de separación en el hoyuelo ocurriera con anticipación. Además, una profundidad del hoyuelo relativamente pequeña resultó beneficiosa para mejorar la transferencia de calor en condiciones de  $Re$  más bajas; y con el análisis de optimización de la configuración del cálculo automático mediante el método de búsqueda de patrones para lograr mejores TP se obtuvo el incremento máximo de 10.3 %, en  $Re = 200$ .

## Minicanales: Patrones oblicuos y ondulaciones

Deldar y Khoshvaght-Aliabadi [21] estudiaron numéricamente el rendimiento termohidráulico de diferentes ranuras complejas en un disipador de calor y tomaron como referencia la ranura recta, en el que utilizan agua como refrigerante. Ellos determinaron que las ranuras propuestas muestran valores de 2.25 y 8.54 veces más altos en el coeficiente convectivo de transferencia de calor y de caída de presión que el modelo de referencia, respectivamente. Por otro lado, Yang *et al.* [22] propusieron y estudiaron numéricamente un disipador de calor de microcanal híbrido que combina múltiples canales oblicuos secundarios (MMC-SOC) y el uso del fluido dieléctrico HFE-7100. El caudal volumétrico  $q_v$  varió de 211 a 580 mL/min, con números de canal de Reynolds entre 278 y 905 para flujos de calor  $q'' = 20, 25, 30$  y  $35$  W/cm<sup>2</sup>. Obteniendo así, para disipadores de calor con altura de canal  $H_c = 60$   $\mu$ m una reducción del 11% en  $\Delta P$  y una reducción del 24% en  $R_t$  en comparación con el disipador de calor de microcanal de colector convencional (MMC) para  $q_v = 580$  ml/min y  $q'' = 20$  W/cm<sup>2</sup>. Para el caudal volumétrico máximo de 580 mL/min (el número de Reynolds correspondiente



del disipador de calor MMC-SOC alcanzó hasta 883) y un flujo de calor de  $20 \text{ W/cm}^2$ , los valores de  $(\Delta P/\Delta P_0)$  para disipadores de calor con  $H_c = 60 \mu\text{m}$  y  $H_c = 100 \mu\text{m}$  fueron 0.89 y 0.88, respectivamente.

## Microcanales: Materiales no convencionales

Paniagua-Guerra y Ramos-Alvarado [23] en este trabajo se hace una investigación sobre el desempeño de un diseño híbrido de disipadores de calor refrigerados por líquido, esto a través de simulaciones en CFD de un conjunto de disipadores de calor de micro chorros híbridos formados por un par de colectores de canales fractales, utilizados como conductos de entrada y salida de líquido (fabricados en resina estereolitografía), una matriz de micro chorros que chocan para un enfriamiento uniforme, y un disipador de calor metálico unido a una fuente de calor. En la Figura 4 se muestra la geometría propuesta del disipador de calor. Los resultados muestran que permitió optimizar los canales de flujo al identificar las regiones donde la generación de entropía es mayor, se sugirió una optimización de la transferencia de calor dentro del disipador de calor para mejorar significativamente el rendimiento térmico de los disipadores de calor y se observó que el calor disipado a través del disipador de calor de resina de fotopolímero es despreciable.

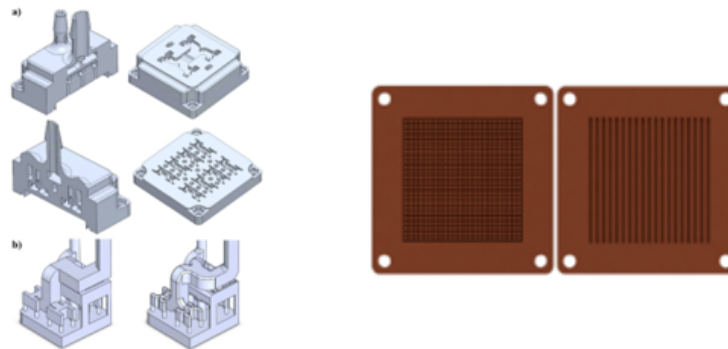


Figura. 4 – Vistas de la sección transversal de los canales incrustados en la carcasa de resina y placas de impacto que muestran minialetas cuadradas [23].

## Minicanales: Patrones de serpiente

Gorzin *et al.* [24] realizaron un estudio experimental y numérico de una nueva propuesta de disipador de calor del tipo serpiente con minicanal para mejorar la refrigeración líquida con agua en un CPU. Del análisis encontraron que al cambiar el diseño del minicanal recto convencional a la geometría propuesta, la temperatura de la placa base disminuye un 11.2% y el número de Nusselt aumenta 4.2 veces en el caudal másico máximo estudiado. Aunado a esto, la resistencia térmica para el disipador de calor propuesto es menor que la del minicanal recto. Por su parte, Imran *et al.* [25] investigaron la optimización geométrica de un disipador de calor de minicanal de serpiente 3D (SMCHS) proponiendo cuatro configuraciones para su análisis, mismas que se muestran en la Figura 5. Obteniendo que el SMCHS convencional logró una mayor caída de presión que las otras tres configuraciones, las mejoras de caída de presión fueron -28 %, -50 % y -47 %, respectivamente. Los resultados terminaron indicando que el rendimiento del dispositivo propuesto mejora efectivamente cuando se utilizan serpentines con dos entradas y dos salidas en comparación con serpentines convencionales con una entrada y una salida.

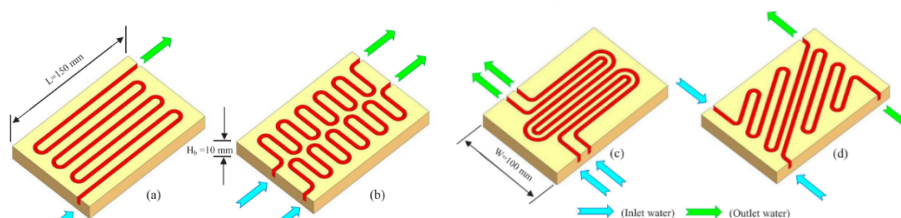


Figura. 5 – Esquema de las configuraciones de SMCHS (a) configuración A (b) configuración B (c) configuración C (d) configuración D [25].

## Minicanales: Diseños bioinspirados

Peng *et al.* [26] propusieron un novedoso disipador de calor con y sin minicanales terciarios simétricos y asimétricos para la transferencia de calor cuando cambia el ángulo de ramificación entre los minicanales primarios y secundarios, en el que se utiliza agua como fluido de trabajo. La red reticulada de las venas de la hoja fue simulada con el empleo los diámetros de Voronoi para la comparación con las venas reales de la hoja de *Oosmanthus*. Los resultados muestran que, con el aumento del ángulo de ramificación del disipador de calor con mini-canales secundarios, el vórtice en el lugar de ramificación aumenta y la potencia de bombeo se incrementa ligeramente. En la Figura 6, se muestran los dominios computacionales de los disipadores de calor propuestos.

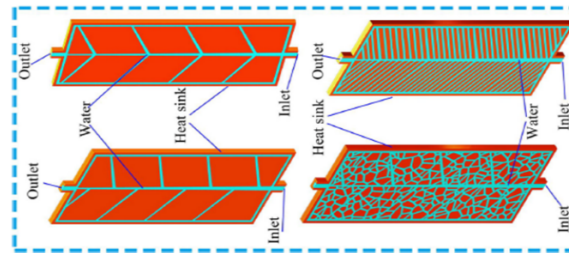


Figura. 6 - Disipadores de calor propuestos con ramificaciones entre los minicanales [26].

## Minialetas: Patrones periódicos

Wiriyasart y Naphon [27] propusieron un disipador de calor con diferentes geometrías de aletas tales como la rectangular, circular y cónica. La especificación de la pieza del disipador de calor en el estudio tiene una dimensión de 100 mm x 100 mm con un espesor total de 12.2 mm. En la superficie superior del disipador de calor está mecanizado y montado de forma homogénea con las aletas de tipo alfiler rectangular con dimensión de 90 mm x 90 mm. Hay 529 aletas, cada uno de ellas de 8 mm de altura, 2 mm de espesor, con una separación de aleta de 2,0 mm, respectivamente. En la Figura 7 se muestra el esquema de la geometría del disipador.

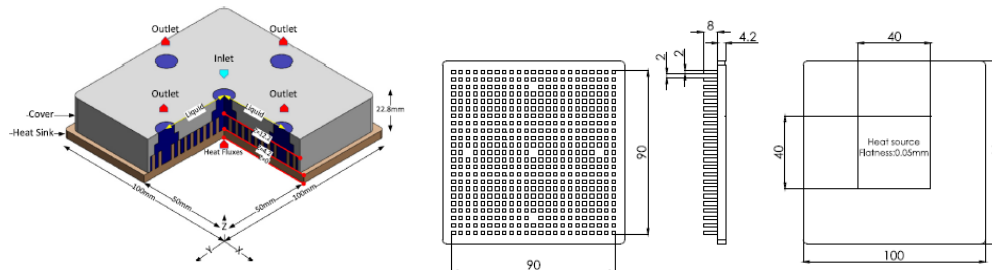


Figura. 7 – Dimensiones del disipador de calor con minialetas [27].

Fadhil *et al.* [28] propusieron un modelo de disipador de calor compacto del tipo placa-aleta en miniatura, con aletas cuadradas (PSP), circulares (PCP) y elípticos (PEP). Eligieron agua pura y 3% de nano-fluidos de SiO<sub>2</sub>-agua como fluido de trabajo. Ellos determinaron que número de Nusselt, la caída de presión y el rendimiento térmico aumenta cuando la temperatura de la base se reduce con el empleo de los nano fluidos de SiO<sub>2</sub>-agua. El mayor número de Nusselt es de casi el 98% para el PCP, mientras que el valor más bajo de la temperatura base es de aproximadamente el 25% para el PCP y el PSP. Además, el desempeño térmico es favorable tanto para PCP como para PEP.



Sukhor *et al.* [29], en su estudio modelan e investigan sistemáticamente las características de transferencia de calor computacional del nanofluido híbrido  $Al_2O_3$ -Cu/agua en un microdisipador de calor; usando una concentración de volumen en el intervalo de 0.1%-0.5% para el fluido de trabajo y simulando el disipador de calor de aleta de micropin hexagonal con disposición escalonada mostrado en la Figura 8. Observaron que cuanto menor es el espacio entre las aletas, mayor es el número de Nusselt y a medida que el paso transversal se reduce de 3.81 mm, 2.81 mm a 1.81 mm, la mejora de éste es de aproximadamente un 5 % por cada 1 mm de disminución en el espaciado de las aletas. Además, de que hubo un aumento del 10 % en el coeficiente de transferencia de calor a una concentración de nanofluido del 0.5 % en comparación con el 0.1 %. Sin embargo, el aumento en la concentración de nanopartículas aumentó la viscosidad del nanofluido, lo que no es deseable para la situación de flujo hidrodinámico debido al aumento en la caída de presión que eventualmente requerirá una mayor potencia de bombeo.

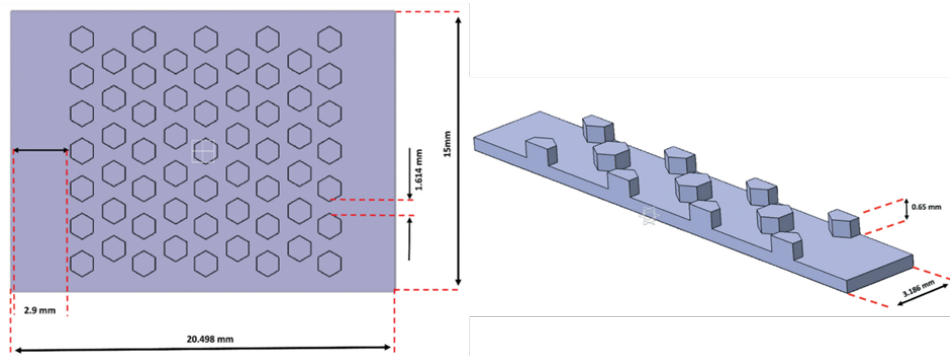


Figura. 8 – Disipador de calor de aleta de micro aleta hexagonal [29].

Arshad *et al.* [30] llevaron a cabo la simulación numérica 2D transitoria de disipadores de calor con aletas basado en material de cambio de fase (PCM) para investigar la transferencia de calor y las características del campo de flujo con un grosor de aleta de 2 mm y 3 mm, y una fracción de volumen de aleta constante del 9%, actuando como potenciador de la conductividad térmica (TCE). Además, en la base de cada disipador de calor fueron proporcionados tres niveles de potencia de calentamiento de entrada diferentes de 4, 5 y 6 W. Mostrando así, como resultados numéricos que el PCM empleado con baja temperatura mantiene la temperatura base del disipador de calor en límites más bajos y se observó una fusión uniforme dentro del disipador de calor con aletas. Con el aumento del nivel de potencia de calentamiento, el tiempo de fusión del PCM se redujo para los disipadores de calor de espesor de aleta. Al aumentar el nivel de potencia de 4 a 6 W, para el caso de aletas de 3 mm de espesor, el tiempo de fusión aumentó en un 6.63%, 3.59% y 1.90% por disipador, en comparación con el disipador de aletas de 2 mm. Finalmente, las nuevas correlaciones normalizadas para el cálculo de la fracción líquida y los resultados de  $Nu$  revelan que la fracción líquida y  $Nu$  se pueden definir como una función de  $Fo \cdot Ste \cdot Ra_{tp}^{0.155} \cdot Ra_{hf}^{0.01}$  y  $Fo \cdot Ste \cdot Ra_{tp}^{0.166} \cdot Ra_{hf}^{0.25}$ , respectivamente, para espesores de aleta de 2 mm y 3 mm disipadores de calor con aletas. Mediante los atributos térmicos e hidráulicos de un nuevo nanofluido ecológico que incluye nanoplaquetas de grafeno, Bahiraei *et al.* [31] estudian un mini disipador de calor con tres aletas de pines diferentes (circulares, triangulares y en forma de gota). Mediante el análisis de cada modelo, se obtuvo que el aumento de la fracción de partículas o la velocidad reduce la temperatura en la superficie de calentamiento y también mejora la uniformidad de la distribución de la temperatura. Tanto a velocidad constante como a potencia de bombeo invariable, el disipador de calor equipado con aletas circulares conduce al mejor rendimiento, mientras que el equipado con aletas triangulares da como resultado la peor eficiencia. Además, para el bloque de líquido equipado con aletas circulares, la resistencia térmica se reduce un 3.63 % con un incremento de la concentración de 0.025 % a 0.075 %; teniendo de esta manera, una resistencia térmica menor que el equipado con aletas triangulares o en forma de gota a la concentración más alta aun cuando su concentración es la más baja.

## Minialetas: Sección transversal variable

Diversos estudios han demostrado que la inclusión de aletas como divisores conectados en las placas rectas delgadas pueden disminuir el flujo y reducir la caída de presión en los disipadores de calor de placa con aletas de tipo afiler (PPFHS). Por ello que Hosseinirad *et al.* [32] propusieron dos nuevas configuraciones de divisor, concretamente la arqueada y la ondulada, para mejorar el rendimiento hidrotérmico general de los PPFHS,

las cuales se muestran en la Figura 9. La temperatura base mínima se detecta en el modelo con divisores arqueados con disposición hacia delante.

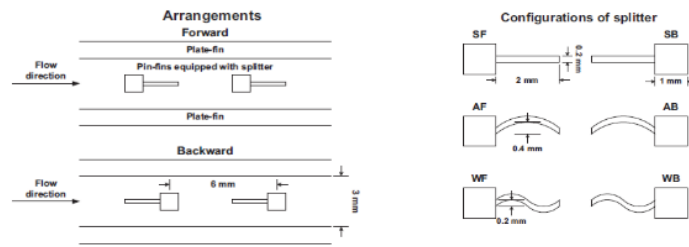


Figura. 9 – Detalles de las aletas cuadradas equipadas con diferentes divisores [32].

## Minialetas: Perforaciones y cavidades

Hosseini-rad y Khoshvaght-Aliabadi [33] propusieron combinaciones de minialetas rectas y onduladas completas e interrumpidas para mejorar el desempeño térmico de los mini-disipadores de calor que se clasifican en diferentes casos como: caso 1: recto-recto-recto (SSS), Caso 2: ondulado-ondulado-ondulado (WWW), Caso 3: recto-ondulado-recto (SWS), y Caso 4: ondulado-recto-ondulado (WSW). Ellos utilizaron agua como fluido de trabajo. Los resultados mostraron que las temperaturas de la base más bajas se encuentran en los modelos WWW, SWS y WSW con los mismos valores. Además, la interrupción de diez aletas proporciona una significativa reducción de temperatura de la base y pérdida de presión. En la Figura 10 se muestran los disipadores de calor con interrupciones.

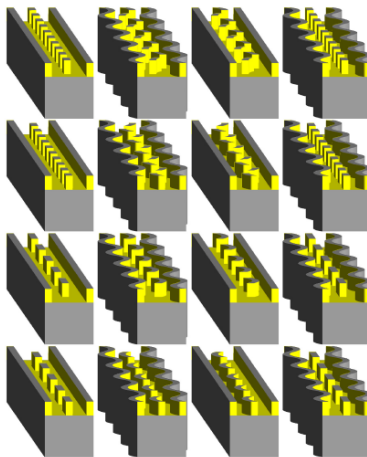


Figura. 10 - Disipadores de calor con interrupciones [33].

Hassani *et al.* [34] proponen nuevas configuraciones de aletas interrumpidas en un disipador de calor con forma de chevron refrigerado por nano-fluido  $Al_2O_3$  en fracciones de volumen de 0.5% y 1.0% y agua en régimen laminar. Se investigan los modelos con las siete interrupciones y se compara con el modelo chevron integral. Los disipadores analizados se muestran en la Figura 11. El estudio se desarrolló de manera experimental con el modelo de referencia y probaron todos los refrigerantes. Los resultados revelan que los campos de velocidad y temperatura del refrigerante se ven afectados por las diferentes interrupciones de la aleta chevrón en el disipador de calor. Simultáneamente, provoca disminuciones considerables en la caída de presión.

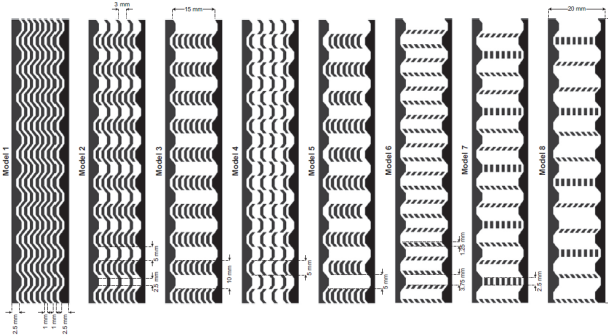


Figura. 11 – Disipadores de calor analizados basados en la aleta chevron integral [34].

Tijani, Binti [35] buscan contribuir en aumentar el tiempo de vida de los componentes electrónicos mediante el estudio de convección forzada sobre un disipador de calor con aletas perforadas, las cuales se muestran en la Figura 12. Los resultados mostraron que las aletas perforadas tienen más distribución general de temperatura, que la caída de presión es menor y que el número de Nusslet es mayor, esto se traduce a que la eficiencia térmica de las aletas perforadas mejor de 1% a 4% a comparación de las aletas sólidas.

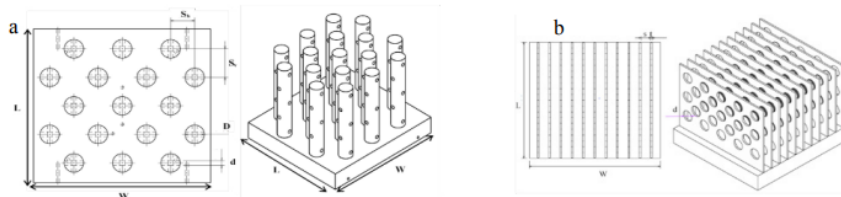


Figura. 12 – Modelos Catia (a) aletas perforadas, vista superior (izquierda) Vista isométrica (derecha), (b) placa plana perforada, vista superior (izquierda) vista isométrica (derecha) [35].

## Disipador de calor miniatura: aletas rectas y onduladas

Chamanroy, Khoshvaght-Aliabadi [36] en este análisis, se investiga el rendimiento del disipador de calor en miniatura recto (SMHS) y el disipador de calor en miniatura ondulado (WMHS) en presencia de aletas rectas y onduladas, como se muestra en la Figura 13. Los resultados muestran que el WMHS-WP 2 proporciona la máxima advección caótica y mezcla, seguido por el WMHS-SP y el SMHS-WP 1, para la misma potencia de bombeo, la tasa de transferencia de calor de todos los disipadores de calor en miniatura equipados con aletas es más alta que en los casos lisos y los gráficos de la resistencia térmica total frente al número de Reynolds muestran que el WMHS-WP 2 tiene los valores más bajos.

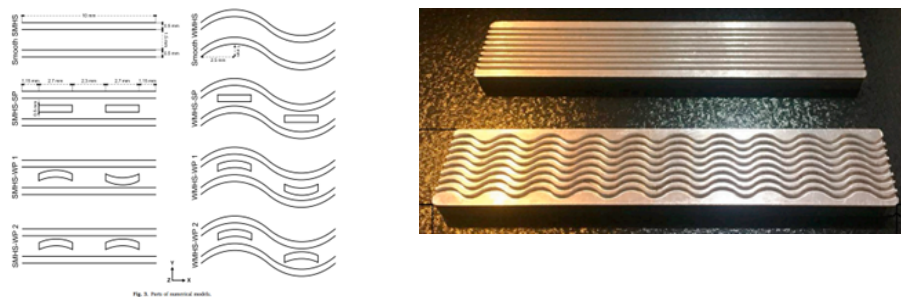


Figura. 13 – Disipadores SMHS y WMHS propuestos en la investigación [36].

## Microcanal: Costillas y cavidades

Bayrak, Olcay y Serincan [37] se hace un estudio para investigar el rendimiento termo hidráulico en diferentes diseños de disipadores con micro canales MCHS sin cavidad ni nervio (MC-NCR), con cavidad y costilla simétricas (MC-SCR), cavidad y costilla asimétricas (MC-ACR), así como se aprecian en la Figura 14. Los resultados muestran MC-SCR es el mejor en términos de transferencia de calor y rendimiento general, el aumento de temperatura se observa intensamente en el caso de MCAR, MC-SCR y MC-ACR, Los vórtices que se forman en la cavidad son un fenómeno importante para aumentar la transferencia de calor.

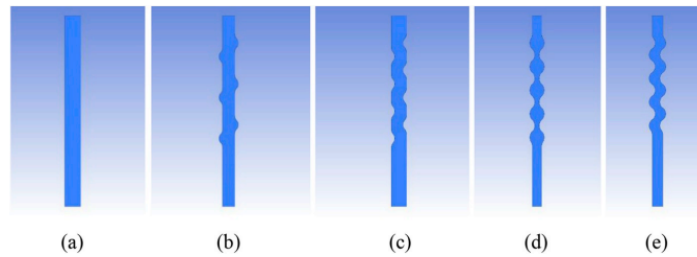


Figura. 14 – Geometrías: (a) un microcanal sin cavidad ni costilla (MC-NCR); (b) un microcanal con cavidad asimétrica (MC-AC) (c) un microcanal con costilla asimétrica (MC-AR) (d) un microcanal con cavidad y costilla simétrica (MC-SCR) (e) un microcanal con cavidad y costilla asimétrica (MC-ACR). [37].

## Microaletas

Waqas, Bhattacharyya, Souayah, Dey, Hammami, Rahimi-Gorji y Biswas [38] muestran las características de la transferencia de calor en un disipador de calor con micro aletas de alfiler en un chip de una CPU por medio de una simulación. Se encontró que el coeficiente de fricción y el número de Nusselt estaban de acuerdo con la correlación, aumento de la intensidad turbulenta mejorando la temperatura y el espesor de la capa térmica, la geometría de aleta de alfiler con  $d = 0,8$  y  $TI = 20\%$  tuvo la mayor transferencia de calor, el factor de rendimiento térmico es superior a la unidad para todos los casos probados. En la Figura 15 se muestra la geometría propuesta del disipador de calor.

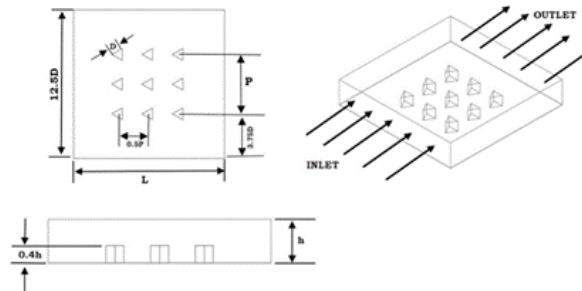


Figura. 15 – Geometría propuesta para el disipador de calor [38].

Wang, Chen, Tate, Rahimi y Zhang [39] se propone un nuevo diseño de micro aleta de alfiler, una combinación de micro aleta de alfiler convencional con una estructura enrejada, se investigaron y compararon dos tipos de diseño de aleta de pasador enrejado, VC-PF y BCC-PF, con el SPF convencional. y se investiga el comportamiento térmico de este. Los resultados muestran que, al aumentar los caudales, aumenta la mejora de la pérdida de presión mediante el uso de redes, y la reducción máxima es del 11,4 % mediante el uso de VC-PF, BCC-PF es más beneficioso para mejorar el rendimiento del calor disipación térmica en comparación con el rendimiento de SPF. El diseño del disipador de calor se muestra en la Figura 16.





- [6] Bahiraei, M. y Heshmatian, S. (2018). Refrigeración electrónica con nanofluidos: una revisión crítica. *Gestión y conversión de energía*, 172, 438–456. doi: 10.1016/j.enconman.2018.07.047.
- [7] Mashali, F., Languri, E. M., Davidson, J., Kerns, D., & Alkhalidi, F. (2018). An Experimental Study on the Convective Heat Transfer Behaviour of Diamond Nanofluids in Electronic Cooling Applications. Volume 8A: Heat Transfer and Thermal Engineering. doi:10.1115/imece2018-87481.
- [8] Kumar, V. y Sarkar, J. (2018). Simulación numérica bifásica de transferencia de calor de nanofluidos híbridos en disipador de calor de minicanal y validación experimental. *Comunicaciones internacionales en transferencia de calor y masa*, 91, 239–247. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2017.12.019.
- [9] Sadiq Al-Baghdadi, MAR, Noor, ZMH, Zeiny, A., Burns, A. y Wen, D. (2020). Análisis CFD de un disipador de calor de microcanal basado en nanofluidos. *Progreso de la ciencia y la ingeniería térmicas*, 100685. doi: 10.1016/j.tsep.2020.100685.
- [10] Sarafraz, MM y Arjomandi, M. (2018). Análisis del rendimiento térmico de un disipador de calor de microcanal enfriado con nanosuspensiones de óxido de cobre-indio (CuO/In) a altas temperaturas. *Ingeniería Térmica Aplicada*, 137, 700–709. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.04.024.
- [11] Bahiraei, Mehdi; Jamshidmofid, Mohammad; Goodarzi, Marjan (2018). Efficacy of a hybrid nanofluid in a new microchannel heat sink equipped with both secondary channels and ribs. *Journal of Molecular Liquids*, (), S0167732218342892-. doi: 10.1016/j.molliq.2018.10.003.
- [12] Akbari, O. A., Khodabandeh, E., Kahbandeh, F., Toghraie, D., & Khalili, M. (2019). Numerical investigation of heat transfer of nanofluid flow through a microchannel with heat sinks and sinusoidal cavities by using novel nozzle structure. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. doi:10.1007/s10973-019-08227-3.
- [13] Sarowar, M. T. (2021). Numerical analysis of a liquid metal cooled mini channel heat sink with five different ceramic substrates. *Ceramics International*, 47(1), 214–225. doi: 10.1016/j.ceramint.2020.08.124.
- [14] Xiang, X., Yang, J., Fan, A. y Liu, W. (2018). Una comparación entre el rendimiento de enfriamiento de disipadores de calor de microcanales a base de agua y galio con las mismas dimensiones. *Ingeniería Térmica Aplicada*, 137, 1–10. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.03.063.
- [15] Rezaee, M., Khoshvaght-Aliabadi, M., Abbasian Arani, A. A., & Mazloumi, S. H. (2019). Heat transfer intensification in pin-fin heat sink by changing pin-length/longitudinal-pitch. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 141. doi: 10.1016/j.cep.2019.107544.
- [16] Tikadar, A., Paul, T. C., Oudah, S. K., Abdulrazzaq, N. M., Salman, A. S., & Khan, J. A. (2020). Enhancing thermal-hydraulic performance of counter flow mini-channel heat sinks utilizing secondary flow: Numerical study with experimental validation. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 111. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.104447.
- [17] Lim, K., & Lee, J. (2021). Experimental study on single-phase convective heat transfer of interlocking double-layer counterflow mini-channel heat sink. *Energy Conversion and Management*, 243. doi: 10.1016/j.enconman.2021.114415.
- [18] Tariq, H. A., Anwar, M., Ali, H. M., & Ahmed, J. (2021). Effect of dual flow arrangements on the performance of mini-channel heat sink: numerical study. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 143(3), 2011–2027. doi: 10.1007/s10973-020-09617-8.
- [19] Zeng, S. y Lee, PS (2019). Optimización topológica de disipadores de calor de microcanales refrigerados por líquido: un estudio experimental y numérico. *Revista internacional de transferencia de calor y masa*, 142, 118401. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.07.051.
- [20] Li, P., Luo, Y., Zhang, D. y Xie, Y. (2018). Estudio de características y optimización de flujo y transferencia de calor en los disipadores de calor de microcanal refrigerados por agua con hoyuelo y pin-fin. *Revista internacional de transferencia de calor y masa*, 119, 152–162. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.11.112.
- [21] Deldar, S., & Khoshvaght-Aliabadi, M. (2019). Evaluation of water-cooled heat sink with complex designs of groove for application in fusion energy management. *Fusion Engineering and Design*, 140, 107–116. doi: 10.1016/j.fusengdes.2019.01.149.
- [22] Yang, M., Li, M.-T., Hua, Y.-C., Wang, W. y Cao, B.-Y. (2020). Estudio experimental sobre enfriamiento de microcanales híbridos monofásicos utilizando HFE-7100 para chips enfriados por líquido. *Revista*

- internacional de transferencia de calor y masa, 160, 120230. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120230.
- [23] Paniagua-Guerra, Luis E.; Ramos-Alvarado, Bladimir (2020). Efficient hybrid microjet liquid cooled heat sinks made of photopolymer resin: thermo-fluid characteristics and entropy generation analysis. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 146(), 118844–. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118844.
- [24] Gorzin, M., Ranjbar, A. A., & Hosseini, M. J. (2022). Experimental and numerical investigation on thermal and hydraulic performance of novel serpentine minichannel heat sink for liquid CPU cooling. *Energy Reports*, 8, 3375–3385. doi: 10.1016/j.egy.2022.02.179.
- [25] Imran, AA, Mahmoud, NS y Jaffal, HM (2018). Investigación numérica y experimental de la transferencia de calor en disipadores de calor de minicanales serpentina de refrigeración líquida con diferentes modelos de configuración nuevos. *Progreso de la ciencia y la ingeniería térmicas*, 6, 128–139. doi: 10.1016/j.tsep.2018.03.011.
- [26] Peng, Y., Yang, X., Li, Z., Li, S., & Cao, B. (2021). Numerical simulation of cooling performance of heat sink designed based on symmetric and asymmetric leaf veins. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 166. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120721.
- [27] Wiriyasart, S., & Naphon, P. (2019). Liquid impingement cooling of cold plate heat sink with different fin configurations: High heat flux applications. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 140, 281–292. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.06.020.
- [28] Fadhil, A. M., Khalil, W. H., & Al-damook, A. (2019). The hydraulic-thermal performance of miniature compact heat sinks using SiO<sub>2</sub>-water nanofluids. *Heat Transfer - Asian Research*, 48(7), 3101–3114. doi: 10.1002/htj.21532.
- [29] Sukhor, N. B., Tijani, A. S., Kubenthiran, J., & Muritala, I. K. (2021). Computational modeling of thermal characteristics of hybrid nanofluid in micro-pin fin heat sink for electronic cooling. *International Journal of Green Energy*, 18(10), 1027–1045. doi:10.1080/15435075.2021.1890086.
- [30] Arshad, A., Jabbal, M., Sardari, P. T., Bashir, M. A., Faraji, H., & Yan, Y. (2020). Transient simulation of finned heat sinks embedded with PCM for electronics cooling. *Thermal Science and Engineering Progress*, 18, 100520. doi: 10.1016/j.tsep.2020.100520.
- [31] Bahiraei, M., Heshmatian, S., Goodarzi, M. y Moayedi, H. (2019). Análisis CFD del empleo de un novedoso nanofluido ecológico en un disipador de calor de aleta en miniatura para el enfriamiento de componentes electrónicos: efecto de diferentes configuraciones. *Tecnología de polvo avanzada*. doi: 10.1016/j.ap.2019.07.029.
- [32] Hosseinirad, E., Khoshvaght-Aliabadi, M., & Hormozi, F. (2019). Effects of splitter shape on thermal-hydraulic characteristics of plate-pin-fin heat sink (PPFHS). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 143. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118586.
- [33] Hosseinirad, E., & Khoshvaght-Aliabadi, M. (2021). Proximity effects of straight and wavy fins and their interruptions on performance of heat sinks utilized in battery thermal management. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 173, 121259. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121259.
- [34] Hassani, S. M., Khoshvaght-Aliabadi, M., & Mazloumi, S. H. (2018). Influence of chevron fin interruption on thermo-fluidic transport characteristics of nanofluid-cooled electronic heat sink. *Chemical Engineering Science*, 191, 436–447. doi: 10.1016/j.ces.2018.07.010.
- [35] Tijani, Alhassan Salami; Jaffri, Nursyameera Binti (2018). Thermal analysis of perforated pin-fins heat sink under forced convection condition. *Procedia Manufacturing*, 24(), 290–298. doi: 10.1016/j.promfg.2018.06.025.
- [36] Chamanroy, Z., & Khoshvaght-Aliabadi, M. (2019). Analysis of straight and wavy miniature heat sinks equipped with straight and wavy pin-fins. *International Journal of Thermal Sciences*, 146, 106071. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2019.106071. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2019.106071.
- [37] Bayrak, Ergin; Olcay, Ali Bahadır; Serincan, Mustafa Fazil (2018). Numerical investigation of the effects of geometric structure of microchannel heat sink on flow characteristics and heat transfer performance. *International Journal of Thermal Sciences*, (), S1290072918303387–. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2018.08.030.
- [38] Alam, Mir Waqas; Bhattacharyya, Suvanjan; Souayeh, Basma; Dey, Kunal; Hammami, Faicel; Rahimi-Gorji, Mohammad; Biswas, Ranjib (2020). CPU heat sink cooling by triangular shape micro-pin-fin:

Numerical study. International Communications in Heat and Mass Transfer, 112(), 104455-. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.104455.

- [39] Wang, Xiang; Chen, Min; Tate, Derrick; Rahimi, Hamidreza; Zhang, Shunqi (2020). Numerical investigation on hydraulic and thermal characteristics of micro latticed pin fin in the heat sink. International Journal of Heat and Mass Transfer, 149(), 119157-. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119157.