

## “Tecnología de refrigeración de vanguardia para equipos electrónicos de alta potencia”

### State-of-the-Art Cooling Technology for High Power Electronic Equipment

Yakelin Hernández-García, Alan Cerroblanco-Ortiza, Sam Anthony Barrón Roblesa, Víctor Andrés Páramo Ramírez, Abel Hernández-Guerrero  
Universidad de Guanajuato División de Ingenierías Campus Irapuato Salamanca, Carretera Salamanca - Valle de Santiago km 3.5 + 1.8 Comunidad de Palo Blanco, Salamanca, Guanajuato, C.P 36885, México.

#### Resumen

En este artículo se presenta una visión general de la tecnología de refrigeración de vanguardia diseñada específicamente para equipos electrónicos de alta potencia.

Se explorará el campo de las nuevas geometrías en el diseño de disipadores de calor para equipos electrónicos de alta potencia. A medida que la demanda de rendimiento y eficiencia aumenta, los disipadores de calor tradicionales enfrentan desafíos para mantenerse al día con las crecientes demandas térmicas. Aquí, se analizarán en detalle diversas geometrías innovadoras, incluyendo estructuras de aletas optimizadas.

Este análisis de nuevas geometrías en los disipadores de calor busca proporcionar soluciones efectivas y eficientes para enfriar los equipos electrónicos de alta potencia, lo que garantiza un rendimiento óptimo, mayor durabilidad y una disminución en la posibilidad de fallas debidas al sobrecalentamiento. Además, estas innovaciones en refrigeración también pueden tener un impacto positivo en la sostenibilidad y el cuidado del medio ambiente, al permitir una gestión más eficiente de la energía y reducir el consumo global de electricidad.

Este artículo ofrece una visión general de las tendencias actuales en tecnología de refrigeración de vanguardia y destaca la importancia de explorar nuevas geometrías en el diseño de disipadores de calor para satisfacer las necesidades cada vez más exigentes de los equipos electrónicos de alta potencia en el mundo actual. Estas innovaciones representan un paso adelante en el desarrollo de soluciones de enfriamiento más eficientes y efectivas que impulsarán aún más el progreso en la industria electrónica.

#### Palabras clave:

Refrigeración de vanguardia, Equipos electrónicos de alta potencia, Disipadores de calor, Geometrías innovadoras, Eficiencia térmica, Sobrecalentamiento, Sostenibilidad ambiental, Gestión eficiente de energía, Reducción del consumo eléctrico, Tecnología de enfriamiento, Rendimiento óptimo, Durabilidad, Fallas por temperatura, Tendencias actuales, Soluciones de enfriamiento eficientes, Industria electrónica, Cuidado del medio ambiente, Eficiencia energética, Desarrollo tecnológico.

#### NOMENCLATURA

A	Area, m <sup>2</sup>
C <sub>p</sub>	Calor específico, kJ/kgK
CRT G	Coefficiente de rendimiento termohidrodinámico global
D <sub>h</sub>	Diámetro hidráulico, m
h	Coefficiente convectivo global, W/m <sup>2</sup> K

k	Conductividad térmica, W/mK
L	Longitud, m
$\dot{m}$	Flujo masico, kg/s
Mw	Peso molecular del aire, kg/kmol
Nu	Numero de Nusselt
p	Perimetro, m
P	Presion, Pa
$\Delta P$	Ca da de presi n, Pa
Pb	Potencia de bombeo, W
$\dot{q}$	Flujo de calor, W/m <sup>2</sup>
	Cantidad de calor de absorción, W
Re	Numero de Reynolds
Rc	Constante universal del aire RT
	Resistencia térmica, W/K
T	Temperatura, K
x, y, z	Componentes del sistema cartesiano
u, v, w	Componentes de velocidad en el eje x, y z m/s
$\dot{V}$	Flujo volumétrico, pie <sup>3</sup> /min

#### **Símbolos griegos**

$\alpha$	Difusividad térmica, m <sup>2</sup> /s
$\epsilon$	Emisividad, m <sup>2</sup> /s
$\mu$	Viscosidad din mica, kg/ms
$\rho$	Densidad, kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann, kg/m <sup>3</sup>

#### **Subíndices**

ent	Entrada
f	Fluido
liq	Líquido
max	Máximo

s	Superficie
sal	Salida
∞	Ambiente

## INTRODUCCIÓN

El avance de la tecnología ha llevado a una constante mejora de los dispositivos electrónicos y computadoras, logrando reducir su tamaño, complejidad y aumentar su velocidad de funcionamiento con precisión. Sin embargo, esto ha generado un problema: el aumento significativo en la generación de calor, lo que afecta negativamente la eficiencia energética y reduce la vida útil de estos dispositivos [1]. Para garantizar un funcionamiento óptimo y evitar el deterioro por altas temperaturas, es fundamental considerar las condiciones de operación [2].

En la literatura técnica, se encuentran diversas propuestas de métodos para disipar el calor, como el enfriamiento mediante gases, líquidos, termoelectricidad, tubos de calor, medios porosos, entre otros. Entre ellos, el enfriamiento por aire ha sido ampliamente utilizado durante décadas, aunque en la actualidad, se está reemplazando cada vez más por el enfriamiento líquido debido a que las propiedades termofísicas de los refrigerantes líquidos superan a las de los gases, satisfaciendo así los requisitos de enfriamiento para dispositivos electrónicos de alta potencia [3].

Los avances en la industria de la micro-manufactura han posibilitado la producción de disipadores de calor con mini-canales y micro-canales mejorados. Los disipadores de calor con micro-aletas han sido objeto de especial atención debido a que esta configuración incrementa el área y el coeficiente de transferencia de calor [4]. Diversos estudios demuestran que los disipadores de calor con microcanales superan en eficiencia termohidráulica a los disipadores convencionales, aunque presentan algunas desventajas menores, como una mayor potencia de bombeo y no uniformidad de la temperatura. No obstante, es posible reducir la potencia de bombeo utilizando mini-canales, lo que implica aumentar el diámetro hidráulico del canal [5].

Además, los pico-proyectores o proyectores portátiles son ejemplos de dispositivos electrónicos que enfrentan graves problemas térmicos debido a su diseño compacto. Para lograr una buena calidad de visualización y mejorar la eficiencia en la disipación de calor del proyector, es fundamental mantener el sistema generador del haz de luz a una temperatura de operación permisible [5,6]. Dentro de las investigaciones halladas en la literatura acerca de la disipación de calor se destaca la realizada por Dixit y Ghosh [7], quienes presentan una visión general de los estudios termo-hidráulicos monofásicos en disipadores de calor de micro y mini-canal donde es discutida la literatura relacionada con estos en corriente cruzada, contracorriente y co-corriente. Así como la generación de algunas lagunas subyacentes en los estudios de disipadores térmicos de micro y mini-canales e intercambiadores como lo son las herramientas de fabricación precisas de los canales de tamaño pequeño y, posteriormente, su unión como intercambiadores de calor que sigue siendo una tecnología costosa impidiendo una producción en masa con la precisión dimensional requerida. Las amplias variaciones en la interpretación de los datos, aparentemente en ausencia de un procedimiento estándar, han dificultado la comparación de diferentes trabajos publicados. Mientras que por su parte, Awais y Kim [8] llevaron a cabo una serie de pruebas para analizar el comportamiento termo-hidráulico en un disipador de calor de mini-canal. En sus investigaciones, utilizaron geometrías de cabecera tanto convencionales como optimizadas mediante el uso de nanofluidos ( $Al_2O_3 - H_2O$ ) y agua destilada como refrigerantes. El estudio se realizó con cinco caudales de refrigerante diferentes y tres concentraciones de nanopartículas volumétricas ( $Al_2O_3$ ) distintas en el fluido base (agua destilada). Los resultados experimentales y numéricos mostraron una buena concordancia, y se observó que el disipador de calor de mini-canal con geometría de cabecera optimizada presentaba un coeficiente de transferencia de calor un 17 % más alto y una reducción del 43 % en la caída de presión. Por otro lado, Xu y Wu [9] al realizar un estudio experimental para investigar el flujo de agua y las características de transferencia de calor por convección en diez tipos de disipadores de calor de micro-aletas de silicio con varias configuraciones de aletas y un micro-canal convencional, con una longitud de 25 mm, un ancho de 2,4 mm y una altura de 0,11 mm pudieron identificar que el mecanismo dominante de mejora de la transferencia de calor causado por las micro-aletas es el efecto hidrodinámico, incluida la perturbación del fluido, así como la rotura y reinicialización de la capa límite térmica cerca de la pared de los disipadores de calor. Además, a medida que la sección transversal de la aleta se acerca a la forma aerodinámica, la caída de presión y el factor de fricción disminuyen, teniendo así que las configuraciones de aletas densas provocan una mayor caída de presión y

factor de fricción en comparación con las escasas; y que la resistencia térmica es mucho menor para los disipadores de calor de micro-aleta que para el micro-canal convencional. En el estudio de la optimización geométrica de un disipador de calor de mini-canal de serpentina 3D (SMCHS), Imran et al. [10] propusieron cuatro configuraciones diferentes para su análisis. Los resultados obtenidos mostraron que el SMCHS convencional presentó una mayor caída de presión en comparación con las otras tres configuraciones propuestas. Las mejoras en la caída de presión para las configuraciones alternativas fueron del -28 %, -50 % y -47 %, respectivamente, indicando claramente que el rendimiento del dispositivo propuesto mejora significativamente cuando se utilizan serpentines con dos entradas y dos salidas en lugar de serpentines convencionales con una única entrada y salida.

Para la obtención de los atributos térmicos e hidráulicos, así como la eficiencia energética de un nuevo nanofluido ecológico que incluye nanoplaquetas de grafeno funcionalizadas, Bahiraei et al. [11], estudiaron 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. Hosseinirad y Khoshvaght [12], por su parte, se dedicaron a analizar diversas geometrías de disipadores de calor de aletas rectas y onduladas. Teniendo así, los resultados mostraban que la proximidad de las aletas rectas y onduladas podía afectar a los rendimientos térmicos e hidráulicos del MHS. Se comprobó que la interrupción de aletas suele conducir a una disminución simultánea de la temperatura base y de la pérdida de presión a través de MHS. Aunque los modelos modificados (o interrumpidos) de SWS y WSW proporcionan valores más altos de índice de rendimiento, el modelo básico (o integral) de SSS y WWW tiene un mejor rendimiento global en comparación con el de SWS y WSW.

## MARCO TEORICO

La disipación de calor es un fenómeno físico que se presenta en cualquier espacio en el que se encuentre un cuerpo caliente sometido a un entorno con baja temperatura, este fenómeno genera un gradiente de temperatura e implica el tránsito de energía térmica hasta llegar a un equilibrio térmico entre el entorno y el cuerpo, a este fenómeno se le conoce como transferencia de calor. Por otro lado, la transferencia de calor puede ser por conducción, convección y radiación. En el caso de la mayoría de los componentes electrónicos con pérdida de calor y con la finalidad de evitar sobrecalentamiento, el calor se transfiere al aire ambiente en niveles altos o bajos. Sin embargo, la transferencia de calor se realiza de la misma forma en casi todos los casos de electrónica, en donde el calor residual es emitido primero por una fuente de calor, posteriormente pasa a través de la placa de circuito impreso y luego al disipador de calor hasta llegar al ambiente.

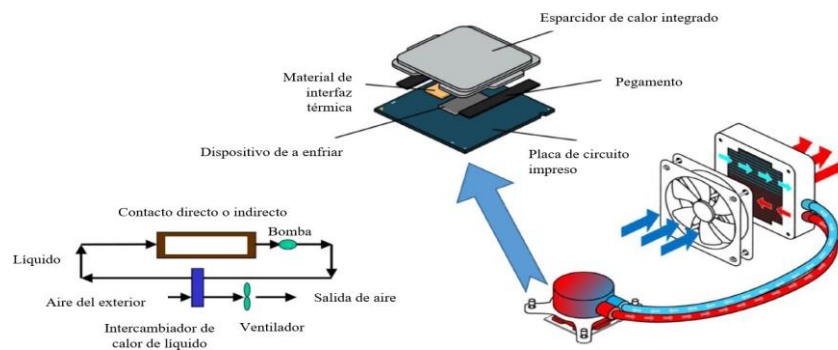


Figura 1.1.1 Diagrama de bloques y composición de un sistema de refrigeración líquida pasiva.

## METODOLOGÍA DE LOS MODELOS COMPUTACIONALES

El diseño y desarrollo de nuevas geometrías en los disipadores de calor para equipos electrónicos de alta potencia requiere una comprensión detallada del flujo de calor y la dinámica de fluidos en estos dispositivos. Para abordar este desafío, los investigadores utilizan simulaciones y modelado computacional, específicamente la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés).

La Simulación de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD): La CFD es una técnica de modelado computacional que permite simular y analizar el comportamiento de los fluidos y la transferencia de calor en sistemas complejos. En el contexto de los disipadores de calor, las simulaciones CFD son una herramienta valiosa para comprender cómo el flujo de aire y el refrigerante interactúan con la geometría del disipador y cómo se disipa el calor generado por los dispositivos electrónicos.

Ventajas de las simulaciones CFD: La principal ventaja de utilizar simulaciones CFD radica en su capacidad para proporcionar información detallada y precisa sobre el comportamiento térmico del disipador de calor. Esto permite a los investigadores evaluar diferentes configuraciones de geometrías y analizar el impacto de diversas variables, como el caudal de aire, la velocidad del flujo de refrigerante y las propiedades del material. Además, las simulaciones CFD son más rápidas y económicas que los enfoques basados en prototipos físicos, lo que acelera el proceso de diseño y optimización.

Optimización de geometrías mediante simulaciones CFD: Mediante la realización de simulaciones CFD, los investigadores pueden evaluar la eficiencia térmica de diferentes diseños de disipadores de calor. Esto incluye la comparación de las tasas de transferencia de calor, la distribución de temperaturas y la resistencia al flujo de aire en cada configuración. Los resultados obtenidos a través de las simulaciones ayudan a identificar las geometrías más prometedoras y a realizar ajustes para optimizar el rendimiento del disipador.

Validación experimental: Aunque las simulaciones CFD son herramientas poderosas, es fundamental validar los resultados con experimentos prácticos. Los prototipos basados en las geometrías simuladas se someten a pruebas en entornos controlados para comparar los datos experimentales con los resultados de las simulaciones. Esta validación asegura que las soluciones propuestas sean efectivas y confiables en situaciones reales.

La utilización de simulaciones y modelado en el diseño de disipadores de calor ha demostrado ser una estrategia exitosa para acelerar el desarrollo de nuevas geometrías y optimizar el rendimiento de refrigeración en equipos electrónicos de alta potencia. En la siguiente sección, examinaremos casos de estudio y aplicaciones prácticas donde estas innovadoras técnicas de diseño y simulación han marcado una diferencia significativa en la eficiencia térmica y el rendimiento de los dispositivos.

### Diseños propuestos de disipadores de calor con enfriamiento líquido

En esta investigación, se propusieron dos geometrías de disipadores de calor para que sean empleados al sistema de refrigeración líquida del proyector portátil. En este caso, se diseñó un conjunto de dos disipadores de calor cada uno con una geometría diferente, es decir, se construyeron en total 2 disipadores de calor (los cuales se realizaron en un software especializado en CAD). El conjunto se empleó en la superficie donde se posiciona el LED azul. Además, los bloques de agua de los disipadores fueron basados en los diseños que propuso Hernández-Montecillo [6].

Aunado a esto, se estableció una nomenclatura para nombrar de manera más sencilla los disipadores de calor propuestos, donde las primeras dos letras representan al disipador de calor DC, las siguientes letras LA representan a la zona del LED azul y las últimas letras representan al nombre de la geometría. Por lo tanto, los modelos se nombraron de la siguiente manera: disipador de calor con aletas triangulares (DC-LA-AT) y disipador de calor con aletas romboides (DC-LA-AR).

La geometría basada en la función de Voronoi (DC-LA-V) y la geometría con minicanales (DC-LA-MN), las cuales se tomaron como base para comparar los resultados de los dos diseños propuestos. Las geometrías previamente mencionadas, se detallan más adelante. En la Figura ## se muestran las dimensiones de los bloques de agua utilizados para los diseños de los disipadores de calor. Las alturas de las aletas y canales de los disipadores de calor propuestos se mantuvieron constantes e iguales a la profundidad del bloque de agua a 1.5 mm. En las zonas de inyección y extracción del fluido, se omitieron los arreglos de aletas y canales

con el objetivo de evitar estancamiento y recirculación de éste. Además, los conductos de entrada y salida del fluido (los cuales se posicionaron perpendicular a la superficie de contacto con el fluido) se establecieron de 4 mm de diámetro y 15 mm de altura para todos los modelos analizados. Por otra parte, las dimensiones

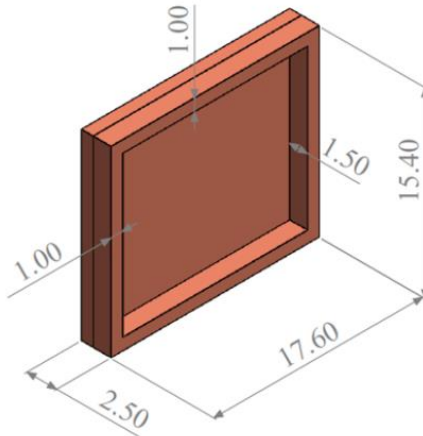


Figura 1.2.1. Dimensiones del bloque de agua empleado para el diseño del disipador de calor.

de los disipadores de calor que se van a mostrar a lo largo de este capítulo están en milímetros, a menos de que se indique lo contrario.

### Disipador de calor con aletas triangulares.

El primer diseño del disipador está conformado por un patrón de aletas triangulares intercaladas. Este patrón se diseñó con el objetivo de que se produjera el menor estancamiento posible y hacer que el fluido se enfríe de mejor manera al generar turbulencia con el cambio de dirección provocado por el patrón.

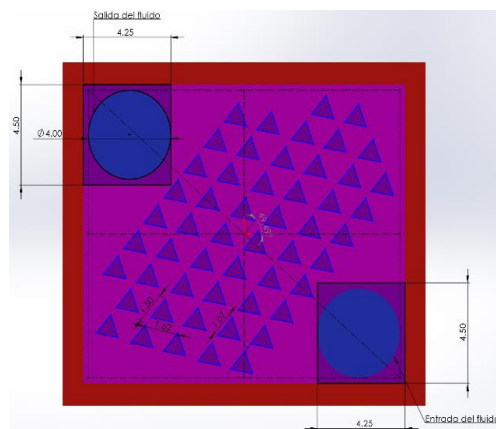
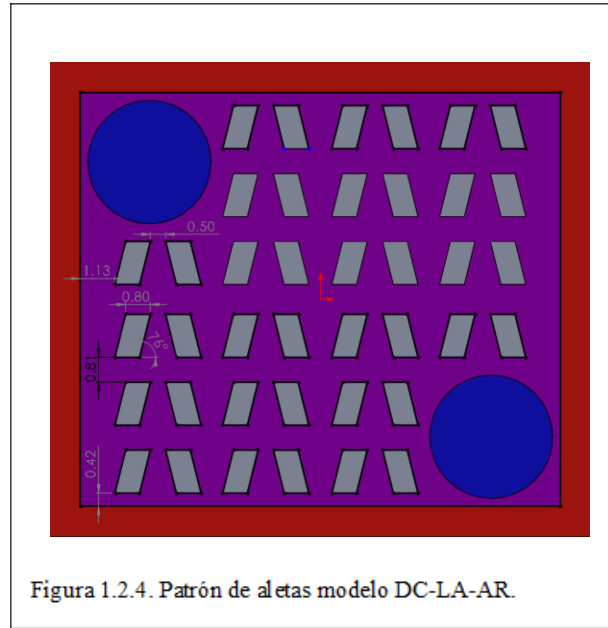


Figura 1.2.2. Distribución de aletas en el bloque de agua del disipador de calor.

### Disipador de calor con aletas romboides



Para el segundo diseño de las geometrías (DC-LA-AR), se basó en los disipadores de calor hechos por Huang, S., Zhao, J., Gong, L., & Duan, X. [13], ya que tiene capacidad general de transferencia de calor y rendimiento térmico con potencia de bombeo constante ya que tiene la caída de presión más baja y las mejores características de transferencia de calor.



### Mallado de las geometrías

Existen diferentes tipos de elementos que deben ser considerados al momento de crear una malla. En este caso el software especializado proporciona varios tipos de elementos y métodos de mallado. No obstante, para los modelos de los disipadores de calor que son considerados en este trabajo, se eligieron varios métodos de mallado debido a que las geometrías no son uniformes. En base a lo anterior, se eligieron elementos tetraédricos y hexaédricos para crear la malla en los seis dominios computacionales de cada modelo.

La Figura 1.2.5 muestra el mallado resultante de algunas zonas de los disipadores de calor analizados en este estudio.

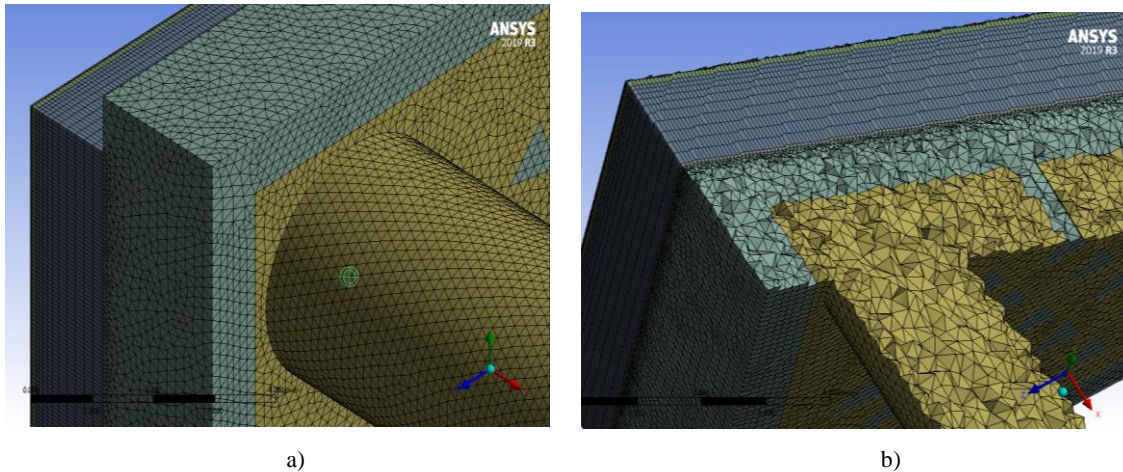


Figura 1.2.5 Mallado de algunas geometrías de los disipadores de calor; (a) dominios de los sólidos y del fluido en el modelo DC-LA-AT; (b) sección transversal del modelo DC-LVR-AT.

### Calidad del mallado

Dentro de los problemas que surgen del modelado y simulación numérica, el mallado de los dominios computacionales se lleva el mérito. Este problema es común cuando se tienen geometrías complejas, con ángulos y superficies irregulares. Por esta razón es importante que la calidad de la malla cumpla con los estándares establecidos por los desarrolladores de softwares comerciales en simulación. Además, al tener una buena calidad de malla implica a que las ecuaciones gobernantes del fenómeno lleguen a la convergencia y por ende que los resultados generados sean satisfactorios con respecto al fenómeno físico real. A consecuencia de la problemática, existen diferentes elementos que mediante la unión de caras, vértices y volúmenes se acoplan a un conjunto continuo que se denomina red de malla o simplemente malla; éstos suelen ser de dos y tres dimensiones. Por lo tanto, el triángulo y el cuadrilátero son los elementos que más se utilizan para generar una malla en dos dimensiones. En cambio, los tetraedros, hexaedros, prismas, pirámides e incluso poliedros se utilizan para generar una red de malla en tres dimensiones. En la Figura 2.1.1 se aprecian los tipos de elementos que se mencionaron anteriormente.

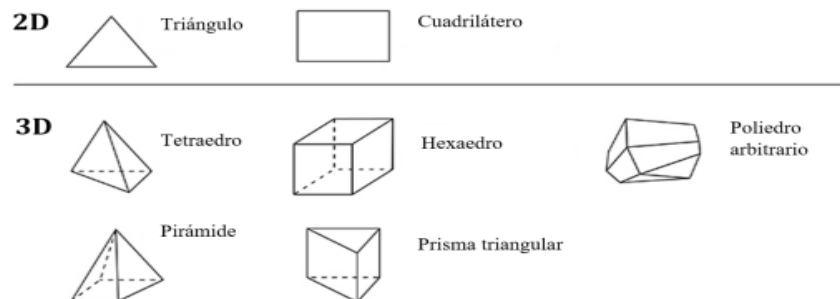


Figura 2.2.1. Tipos de elementos de malla

El método de ortogonalidad es una métrica que se utiliza para verificar la calidad de una malla, donde los elementos con valor de ortogonalidad igual o cercano a uno se consideran los mejores por la uniformidad y los elementos con valores cercanos a cero se estiman como los peores debido a la gran deformación que poseen. En la Figura 2.2.2 se muestra una gráfica del rango de calidad de malla que va de 0 hasta 1, de acuerdo con las especificaciones que proporciona el software especializado en simulación. En esta figura se



aprecia que para el rango de 0.15 a 0.20 el mallado se considera aceptable, por lo que no es forzoso tener una excelente calidad de malla para obtener resultados congruentes, en dado caso que se tenga una geometría o modelo con bastantes irregularidades.

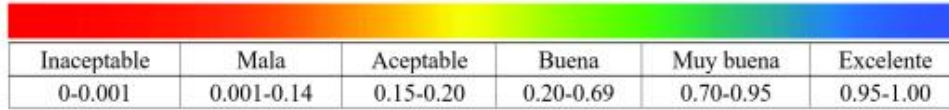
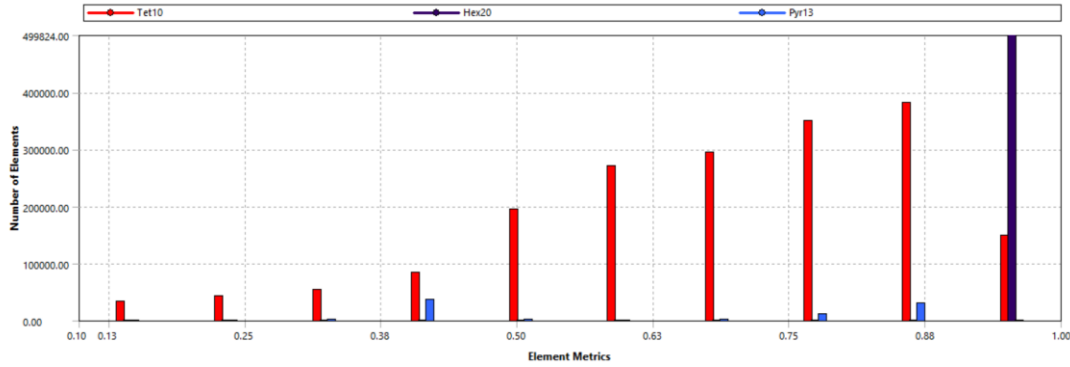
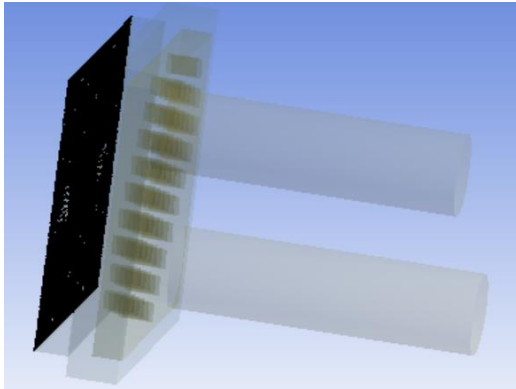


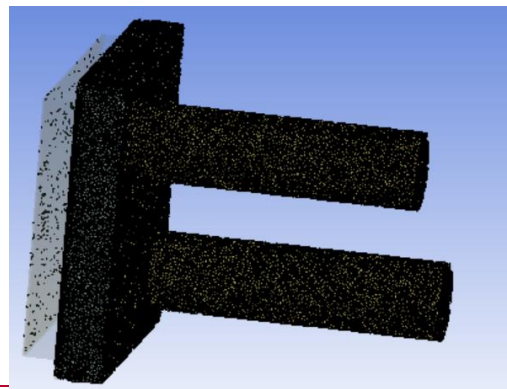
Figura 2.2.2 Métrica de ortogonalidad para la evaluación de la calidad de malla.



a)



b)



c)

Figura 2.2.3 Calidad de elementos mediante el método de ortogonalidad; (a) gráfica de la calidad de malla con respecto al número de elementos; (b) elementos con menor calidad de malla; (c) elementos con menor calidad de malla.

La ortogonalidad de un elemento representa la proximidad de los ángulos entre las caras o los bordes de los elementos adyacentes con respecto a un ángulo óptimo, dependiendo de la forma geométrica.

### Ecuaciones gobernantes de los fenómenos físicos

Las ecuaciones gobernantes del fenómeno de transferencia de calor en el dominio del fluido (para los dos métodos de enfriamiento del proyector) son las ecuaciones de continuidad, energía y conservación de

momento (Navier-Stokes). En el caso de los dominios de los sólidos, sólo son gobernados por la ecuación de la energía. Estas ecuaciones son discretizadas y resueltas en un software especializado en volumen nito mediante el uso de la dinámica de fluidos computacional CFD (Computational Fluid Dynamics). La Ecuación (2.1) representa la ecuación de continuidad simplificada en coordenadas cartesianas para el dominio del fluido.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

Las Ecuaciones (2.1.2) - (2.1.3) representan las ecuaciones de momento simplificadas en coordenadas cartesianas para cada una de las direcciones del dominio del fluido.

$$\rho_f \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu_f \left( u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + w \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.1.1)$$

$$\rho_f \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu_f \left( u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + w \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.1.2)$$

$$\rho_f \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu_f \left( u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + w \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.1.3)$$

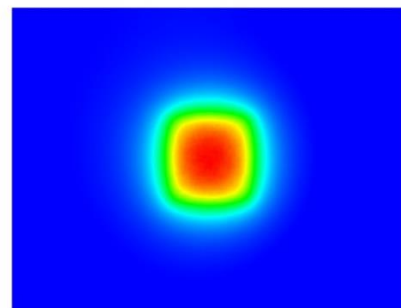
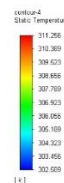
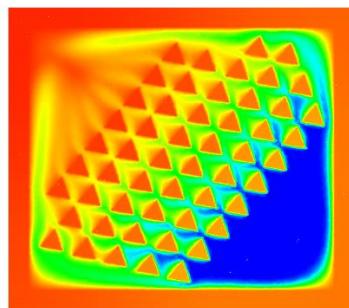
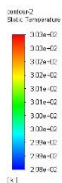
Las Ecuaciones (3.1.1) y (3.1.2) muestran las ecuaciones de energía simplificadas en coordenadas cartesianas, para el fluido y sólido, respectivamente.

$$u \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + w \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\rho_f C_{p,f}}{k_f} \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3.1.1)$$

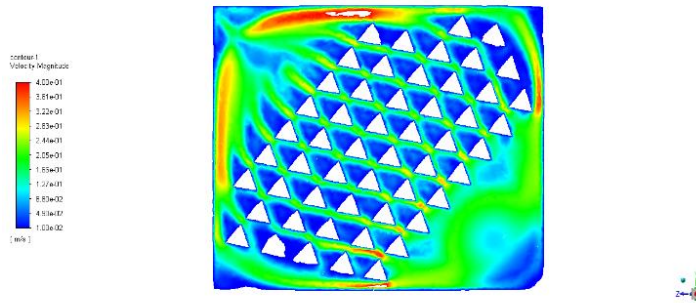
$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + w \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (3.1.2)$$

## Resultados

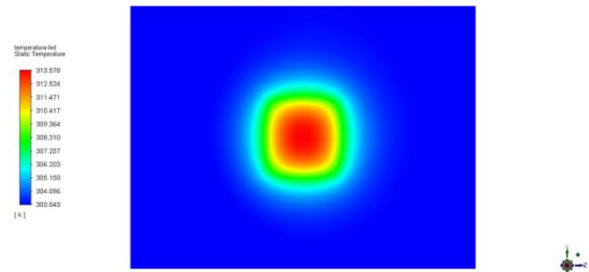
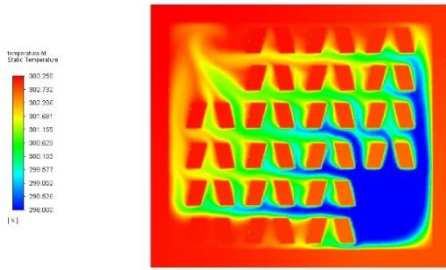
Contornos de temperatura de (DC-LA-AT).



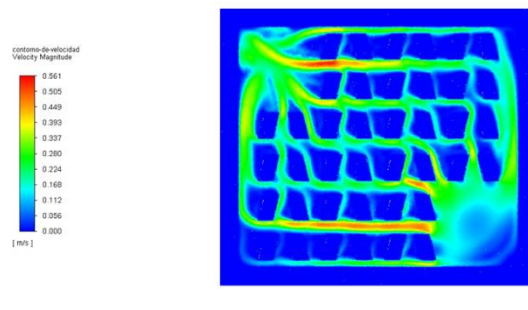
Contorno de velocidad.



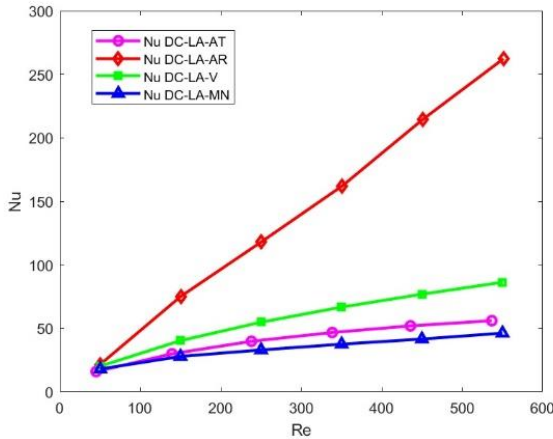
Contornos de temperatura de (DC-LA-AR).



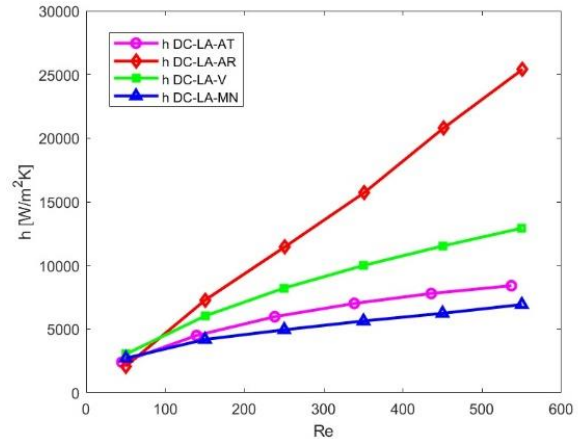
Contorno de velocidad.



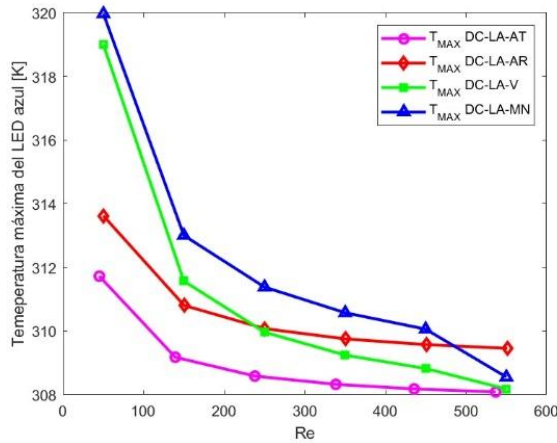
Graficas comparando DC-LA-AT, DC-LA-AR, DC-LA-V y DC-LA-MN



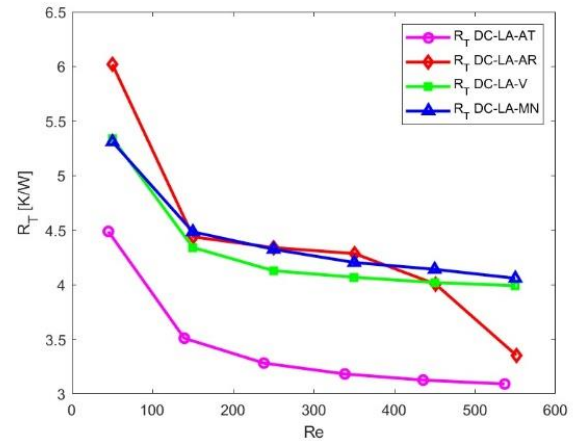
Gráfica 1.  $Re$  vs  $Nu$  de DC-LA-AT, DC-LA-AR, DC-LA-V, DC-LA-MN.



Gráfica 2.  $Re$  vs  $h$  de DC-LA-AT, DC-LA-AR, DC-LA-V, DC-LA-MN.



Gráfica 3.  $Re$  vs Temperatura máxima del LED azul de DC-LA-AT, DC-LA-AR, DC-LA-V, DC-LA-MN.



Gráfica 4.  $Re$  vs Resistencia Térmica de DC-LA-AT, DC-LA-AR, DC-LA-V, DC-LA-MN.

De acuerdo con las gráficas presentadas arriba, que comparan algunos de los parámetros más importantes para el estudio de los disipadores de calor, comparándolos con el aumento de en número de Reynolds podemos demostrar como parte de nuestros resultados una respuesta efectiva a comparación del disipador de calor base (DC-LA-MN).

En la Gráfica 1. se aprecia la variación del número de  $Nu$ , en cada disipador de calor propuesto, respecto el incremento de la velocidad (evaluada mediante el número de  $Re$ ) del fluido en la entrada. El comportamiento del  $Nu$  en los modelos propuestos fue análogo al comportamiento del coeficiente convectivo. Por lo tanto, el  $Nu$  con mayor y menor valor indica el mejor y el peor modelo para remover el calor emitido por los LED, respectivamente. En base a esto, el modelo DC-LA-AR mostró la mejor capacidad de remoción de calor en el LED azul. Sin embargo, el modelo DC-LA-AT mostró una menor capacidad de remoción de calor para el mismo LED.

Por otro lado, en la Gráfica 2. se muestra el efecto del incremento del número de Reynolds sobre el comportamiento del coeficiente convectivo en los disipadores de calor propuestos.

Los resultados mostraron que el coeficiente convectivo incrementó con el aumento del número de Reynolds en todos los modelos propuestos, debido a que la capa límite hidrodinámica con un aumento de velocidad ésta reduce significativamente su espesor, lo que da lugar a una reducción de la resistencia térmica convectiva y por ende aumenta la transferencia de calor de las superficies internas (aletas o canales) del

disipador al fluido refrigerante. Por otra parte, el modelo DC-LA-V presentó el mejor comportamiento del coeficiente convectivo, ya que la geometría de este modelo fue la segunda con la mayor área característica de transferencia de calor.

Para la Gráfica 3. se muestra el comportamiento de la temperatura máxima del LED azul sobre la PCB (donde se aplica el flujo de calor) de cada disipador de calor propuesto con respecto al incremento del Re. En esta imagen se observa que las temperaturas máximas de los disipadores de calor tuvieron un valor inferior de 314 K con tan sólo a un  $Re=50$ . Además, la temperatura de cada disipador de calor se redujo con el incremento de la velocidad del fluido de trabajo y a un  $Re=150$  la temperatura tuvo una disminución súbita en todos los modelos analizados. A partir de este Re la temperatura siguió reduciéndose gradualmente hasta aproximadamente los 308 K. En virtud de este comportamiento de temperatura, se determinó que el disipador de calor DC-LA-AT tuvo un mejor desempeño al mantener la temperatura máxima del led azul más baja en comparación con el disipador de calor DC-LA-AR.

En la Gráfica 4. se aprecia el comportamiento de la resistencia térmica en los disipadores de calor propuestos con el incremento del número de Re del fluido. Los resultados indicaron que el comportamiento de la resistencia térmica fue muy diferente los dos modelos para un rango del Re de 50 a 150. Además, se encontró un decremento súbito de la resistencia térmica en ambos disipadores de calor analizados a un  $Re=150$ , debido a que ésta se redujo aproximadamente de 6 a 4.5 K/W para DC-LA-AR y de 4.5 a 3.5 K/W para DC-LA-AT. Asimismo, se registró otra disminución de resistencia térmica pero no tan notoria, en el rango del Re de 150 a 350, donde los modelos DC-LA-AT y DC-LA-AR.

## Conclusiones

Al reconocer la transferencia de calor y explorar soluciones más eficientes, se puede seguir impulsando la mejora en el diseño y rendimiento de los dispositivos electrónicos. Continuar investigando y aplicando enfoques innovadores en la geometría de las aletas nos permitirá seguir avanzando hacia tecnologías más poderosas, eficientes y confiables, abriendo nuevas oportunidades para el desarrollo de dispositivos electrónicos de vanguardia.

En nuestro estudio, las geometrías propuestas para las aletas de disipación de calor (DC-LA-AT y DC-LA-AR) demostraron un desempeño superior en comparación con la referencia tradicional (DC-LA-MN). Estos resultados alentadores sugieren que es posible seguir mejorando la eficiencia de los sistemas de enfriamiento en dispositivos electrónicos mediante diseños más innovadores.

Aunque nuestros hallazgos han sido prometedores, reconocemos que siempre hay margen para seguir investigando y desarrollando soluciones aún más efectivas. En trabajos futuros, planeamos explorar nuevas geometrías y enfoques que puedan llevar a mejoras adicionales en la disipación de calor y, en última instancia, a dispositivos electrónicos aún más eficientes y confiables.

Además, este trabajo nos ha brindado una valiosa oportunidad para desarrollar y mejorar nuestras habilidades en el uso de software de simulación como ANSYS. Estas herramientas de simulación juegan un papel fundamental en la comprensión y optimización de sistemas complejos de enfriamiento, y su dominio nos permitirá abordar desafíos futuros con mayor precisión y eficacia.



## Bibliografía/Referencias

- [1] Y. Peng, X. Yang, Z. Li, S. Li, and B. Cao, "Numerical simulation of cooling performance of heat sink designed based on symmetric and asymmetric leaf veins," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 166, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120721.
- [2] A. A. Lad, K. A. James, P. King, and N. Miljkovic, "Reduced order design optimization of liquid cooled heat sinks," *Journal of Electronic Packaging*, Vol. 143, no. 4, Dec. 2021, doi: 10.1115/1.4052400.
- [3] D. A. Redwan, E. H. Chowdhury, M. H. Rahman, and H. A. Prince, "Numerical investigation on the electronic components' cooling for different coolants by finite element method," *Heat Transfer*, Vol. 50, no. 5, pp. 4643–4655, Jul. 2021, doi: 10.1002/hjt.22093.
- [4] F. Xu and H. Wu, "Experimental study of water flow and heat transfer in silicon micro-pin-fin heat sinks," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 140, no. 12, Dec. 2018, doi: 10.1115/1.4040956.
- [5] J. C. Shyu, T. Chang, and S. C. Lee, "A numerical study on natural convection heat transfer of handheld projectors with a fin array," *Energies*, Vol. 10, no. 3, 2017, doi: 10.3390/en10030266.
- [6] Hernández-Montecillo, V. M., Luviano-Ortiz, J. L., Camaraza-Medinab, Y., & Hernández-Guerrero, A. Análisis numérico de transferencia de calor sobre la implementación de un sistema de refrigeración líquida en un proyector portátil.
- [7] Dixit, T., & Ghosh, I. (2015). Review of micro- and mini-channel heat sinks and heat exchangers for single phase fluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1298–1311. doi:10.1016/j.rser.2014.09.024.
- [8] Ali Awais, A., & Kim, M.-H. (2020). Estudio experimental y numérico sobre el rendimiento de un disipador de calor minicanal con diferentes geometrías de cabecera utilizando nanofluidos. *Ingeniería Térmica Aplicada*, 115125. doi:10.1016/j.applthermaleng.2020.115125.
- [9] Xu, F., & Wu, H. (2018). Experimental study of water flow and heat transfer in silicon micro-pin-fin heat sinks. *Journal of Heat Transfer*. doi:10.1115/1.4040956.
- [10] Imran, A. A., Mahmoud, N. S., & Jaffal, H. M. (2018). Numerical and experimental investigation of heat transfer in liquid cooling serpentine mini-channel heat sink with different new configuration models. *Thermal Science and Engineering Progress*, 6, 128–139. doi:10.1016/j.tsep.2018.03.011.
- [11] Bahiraei, M., Heshmatian, S., Goodarzi, M., & Moayedi, H. (2019). CFD analysis of employing a novel ecofriendly nanofluid in a miniature pin fin heat sink for cooling of electronic components: Effect of different configurations. *Advanced Powder Technology*. doi:10.1016/j.appt.2019.07.029.
- [12] 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 .
- [13] Huang, S., Zhao, J., Gong, L., & Duan, X. (2017). Thermal performance and structure optimization for slotted microchannel heat sink. *Applied Thermal Engineering*, 115, 1266-1276. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.09.131>