

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

“Diseño de un Sistema de Enfriamiento Líquido para Unidades de
Procesamiento Gráfico basado en Dinámica de Fluidos Computacional”

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:
Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Paulina María Arnés-Urgellés
Keller Eduardo Herrera Astudillo

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2020

DEDICATORIA

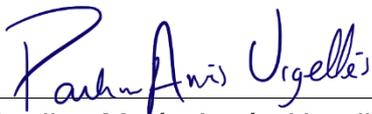
Dedicamos el presente trabajo a todas las personas que directa o indirectamente lo hicieron posible.

AGRADECIMIENTO

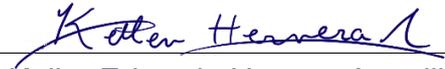
Agradecemos a todas las personas que directa o indirectamente hicieron posible este trabajo.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Paulina María Arnés-Urgellés y Keller Eduardo Herrera Astudillo damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Paulina María Arnés-Urgellés

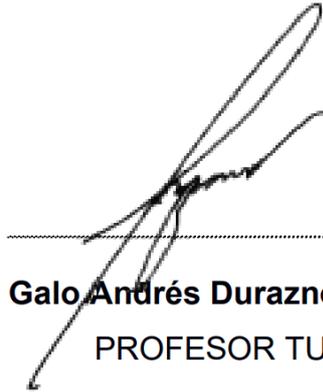


Keller Eduardo Herrera Astudillo

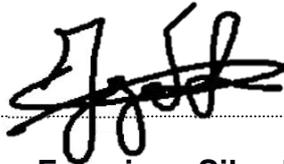
EVALUADORES



José Alberto Macías Zambrano
PROFESOR DE LA MATERIA



Galo Andrés Durazno Palacios
PROFESOR TUTOR



Jorge Francisco Silva León
PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Con el incremento en la demanda de recursos computacionales, la necesidad de desarrollar sistemas de mayor capacidad y operación más eficiente ha aumentado. Entre los factores que afectan el desempeño de un componente electrónico se encuentra la temperatura, especialmente relevante para Unidades de Procesamiento Computacional (CPU) y Unidades de Procesamiento Gráfico (GPU), ya que estos emiten calor al operar. El objetivo del presente proyecto es mejorar las herramientas mecánicas aplicadas a este campo, diseñando un sistema de enfriamiento líquido para la tarjeta gráfica GeForce GTX1650, al no encontrarse esta solución disponible comercialmente. Se emplearon los *software* Inventor y ANSYS para simular el comportamiento del intercambiador de calor bajo las condiciones de operación y acorde a los requisitos del cliente. Con el propósito de obtener las temperaturas más bajas en los componentes, se simularon distintos espesores y números de aletas. Se encontró que un arreglo de 2 columnas, con 17 aletas de 0.5 mm de espesor por columna, separadas 0.5 mm entre sí, exhibía la mejor transferencia de calor para un rango de velocidad de entrada de 0.1 m/s a 1 m/s, lo cual coincide con el rango de operación del banco de pruebas del cliente. Por lo tanto, se seleccionó esta configuración como propuesta teórica para que el cliente lo mecanice en cobre y se conduzcan pruebas experimentales como trabajo futuro. Se concluye que el sistema diseñado tiene potencial comercial, al haberse obtenido resultados satisfactorios de las simulaciones, un costo de fabricación estimado de \$143.70 y no encontrarse otras alternativas disponibles en el mercado para la tarjeta gráfica mencionada.

Palabras Clave: CAD, CFD, GeForce GTX1650, ANSYS, Aletas.

ABSTRACT

With the increasing demand for computational resources, the need to develop systems with higher capacity and more efficient operation has increased. Among the factors that affect the performance of an electronic component is temperature, especially relevant for Computer Processing Units (CPU) and Graphics Processing Units (GPU), as they emit heat when operating. The objective of this project is to improve the mechanical tools applied to this field, designing a liquid cooling system for the GeForce GTX1650 graphics card, since this solution is not commercially available. Inventor and ANSYS software were used to simulate the behavior of the heat exchanger under operating conditions and according to customer requirements. To obtain the lowest component temperatures, different fin thicknesses and numbers of fins were simulated. It was found that a 2-column arrangement, with 17 fins of 0.5 mm thickness each, per column, spaced 0.5 mm apart, exhibited the best heat transfer for an inlet velocity range of 0.1 m/s to 1 m/s, which coincides with the operating range of the customer's test rig. Therefore, this configuration was selected as a theoretical proposal for the customer to machine in copper and conduct experimental tests as future work. It is concluded that the designed system has commercial potential, having obtained satisfactory results from the simulations, an estimated manufacturing cost of \$143.70 and no other alternatives available in the market for the mentioned graphics card.

Keywords: CAD, CFD, GeForce GTX1650, ANSYS, Fins.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
ÍNDICE DE PLANOS.....	XI
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción	1
1.1 Definición del Problema.....	1
1.2 Justificación del proyecto.....	1
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 Objetivo General	2
1.3.2 Objetivos Específicos.....	2
1.4 Marco teórico.....	2
1.4.1 Disipación de calor en componentes electrónicos	2
1.4.2 Modos de refrigeración en unidades de procesamiento gráfico.....	3
1.4.3 Sistemas de refrigeración líquida para GPU	5
1.4.4 Materiales para dispositivos de refrigeración líquida	5
1.4.5 Líquido refrigerante y nanofluidos.....	6
CAPÍTULO 2.....	8
2. Metodología	8
2.1 Parámetros de diseño	9
2.1.1 Requerimientos de diseño del cliente	9
2.1.2 Especificaciones de diseño.....	9

2.2	Diseño de forma	11
2.2.1	Alternativas	11
2.2.2	Selección de material.....	15
2.2.3	Características de la solución generada	15
2.2.4	Diseño de forma.....	16
2.3	Diseño detallado.....	16
2.3.1	Dimensionamiento	17
2.3.2	Cálculos teóricos.....	17
2.3.3	Simulaciones.....	23
2.3.4	Consideraciones mecánicas	24
2.4	Registro de datos	25
CAPÍTULO 3.....		26
3.	Resultados y Análisis.....	26
3.1	Simulaciones	26
3.1.1	Estrategia de evaluación.....	26
3.1.2	Aletas	30
3.2	Resultados teóricos	34
3.3	Solución propuesta.....	36
3.4	Análisis de costos.....	37
CAPÍTULO 4.....		39
4.	Conclusiones y Recomendaciones.....	39
4.1	Conclusiones	39
4.2	Recomendaciones.....	39
BIBLIOGRAFÍA		
APÉNDICES		

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
GPU	Graphics Processing Unit
CAD	Computer Assisted Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
CPU	Central Processing Unit
VRAM	Video Random Access Memory
PCB	Printed Circuit Board
TDP	Thermal Design Power
CNC	Computer Numerical Control
3D	Tres Dimensiones
IHS	Integrated Heat Spreader

SIMBOLOGÍA

W	Vatios
m	Metro
K	Kelvin
g	Gramo
cm	Centímetro
ton	Tonelada
MPa	Megapascales
HB	Dureza Brinell
mm	Milímetro
°C	Celsius
s	Segundo
l	Litro
h	Hora
\dot{q}_T	Flujo de calor
T_F	Temperatura de aleta
T_{IHS}	Temperatura del IHS
R_{IHS}	Resistencia del IHS
R_{TP}	Resistencia de la pasta térmica
R_B	Resistencia de la base
R_{eq}	Resistencia equivalente
L_{IHS}	Altura del IHS
K_{IHS}	Coficiente de conducción del IHS
A_{IHS}	Área transversal del IHS
R_{PT}''	Resistencia dada por el fabricante.
L_B	Altura de la base
K_B	Coficiente de conducción de la base
A_B	Área de la base
R_{Fconv}	Resistencia de aleta correspondiente a convección
A_{BF}	Área base de aleta
R_{tF}	Resistencia de las aletas
θ_b	Delta de temperatura entre la base y el ambiente

\dot{q}_F	Flujo de calor por las aletas
h	Coeficiente de convección del fluido
k	Coeficiente de conducción aleta
P	Perímetro de la aleta
A_c	Área de contacto
\dot{m}	Flujo másico
C_p	Calor específico
n_o	Eficiencia total de las aletas
A_T	Área total
T_{ml}	Temperatura media logarítmica
T_{in}	Temperatura de entrada del fluido
T_{out}	Temperatura de salida del fluido
T_c	Temperatura media de contacto con las aletas
n_F	Eficiencia de una aleta
U	Coeficiente global de transferencia de calor
kg	Kilogramo

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Metodología aplicada.	8
Figura 2.2 Caja negra.	9
Figura 2.3 Caja transparente.	9
Figura 2.4 Representación en 3D de la tarjeta GeForce GTX 1650 con los componentes a considerarse en el diseño.	10
Figura 2.5 Diseño de forma de la solución propuesta.	16
Figura 2.6 Distribución de resistencias, vista lateral.	18
Figura 2.7 Dimensiones, vista frontal.	18
Figura 3.1 Modelo para análisis, entradas en azul, salida en rojo.	26
Figura 3.2 Temperatura de estabilización GPU vs velocidad de entrada. (a) Modelo V1. (b) Modelo V2.	29
Figura 3.3 Temperatura de estabilización GPU vs velocidad de entrada, para distintos espesores de aleta, y el modelo sin aletas.	32
Figura 3.4 Distribución de temperatura en el modelo diseñado. (a) Vista superior (b) vista inferior.	33
Figura 3.5 Eficiencia global de aletas vs velocidad de entrada del fluido.	35
Figura 3.6 Solución propuesta. (a) Vista explotada (b) Base fijada a PCB (c) Solución ensamblada y fijada sobre la PCB.	36
Figura 3.7 Detalle aletas de solución propuesta. (a) Vista explotada (b) Solución ensamblada y fijada sobre la PCB.	37
Figura B.1 Esquema de trabajo ANSYS Fluent.	45
Figura B.2 Primer mallado asociado entre pasta térmica y gpu, tamaño seleccionado 0.001.	45
Figura B.3 Segundo mallado asociado entre flujo de agua y disipador, tamaño seleccionado 0.0005.	45
Figura B.4 Mallado general.	46
Figura B.5 Mallado para el disipador.	46
Figura B.6 Mallado para GPU.	47
Figura B.7 Información del mallado general. Número de elementos: 2939686 y nodos: 563671.	47
Figura B.8 Gráfica de calidad de mallado fino.	48
Figura B.9 Información de la calidad del mallado.	49

Figura B.10 Espectro de calidad del mallado	49
Figura B.11 Reporte de la calidad del mallado. Etapa Setup.	50
Figura B.12 Distribución de presión.....	50
Figura B.13 Distribución de presión. Vista superior	51
Figura B.15 Líneas de flujo. Vista superior.	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Propiedades del cobre y aluminio.....	6
Tabla 2.1 Características de la tarjeta gráfica GeForce GTX 1650.	10
Tabla 2.2 Especificaciones de diseño.....	11
Tabla 2.3 Escala de importancia.....	12
Tabla 2.4 Comparación por pares entre criterios.....	12
Tabla 2.5 Tipo de cobertor.....	14
Tabla 2.6 Tipo de entrada.....	14
Tabla 2.7 Tipo de circuito	15
Tabla 2.8 Características de la solución generada	16
Tabla 2.9 Dimensiones solución propuesta	17
Tabla 2.10 Configuraciones de aletas	19
Tabla 2.11 Características de los elementos para la simulación	24
Tabla 2.12 Datos de entrada	24
Tabla 3.1 Modelos empleados en el análisis preliminar	27
Tabla 3.2 Resultados modelo V1.....	28
Tabla 3.3 Resultados modelo V2.....	28
Tabla 3.4 Comparación entre V1 y V2.....	30
Tabla 3.5 Resultados espesor de aleta 0.7mm	31
Tabla 3.6 Resultados espesor de aleta 1mm	31
Tabla 3.7 Resultados del análisis de tensión simulado en Inventor.	34
Tabla 3.8 Coeficiente global de transferencia de calor	36
Tabla 3.9 Costos estimados	38
Tabla A.1 Cálculos de Eficiencia de Aletas	44

ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1 Lista de Partes

PLANO 2 Ensamble

PLANO 3 PBC

PLANO 4 Base

PLANO 5 Tapa

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Definición del Problema

El aumento en la demanda de procesadores de mayor potencia en ordenadores tiene como consecuencia el requerimiento de aligerar la carga en las Unidades Centrales de Procesamiento (CPU). La función principal de las Unidades de Procesamiento Gráfico (GPU) es responder a este requerimiento, realizando procesos en lugar de la CPU.

A medida que incrementa la carga de trabajo, aumenta la temperatura de componentes como la GPU, haciendo que la capacidad de procesamiento se vea reducida. El correcto manejo y control de temperatura de este tipo de componentes electrónicos, extiende su tiempo de vida útil además de preservar su rendimiento y eficiencia. Por lo tanto, existe la necesidad de diseñar un sistema de disipación de calor más eficiente que la solución comercial común, la cual emplea aire como fluido refrigerante. A esta problemática busca el presente proyecto presentar una solución, con un sistema de enfriamiento líquido para GPU.

1.2 Justificación del proyecto

Actualmente en Ecuador no existe la fabricación de sistemas de enfriamiento líquido para tarjetas gráficas, donde los conocimientos de ingeniería mecánica son altamente aplicados. Por lo tanto, se incentiva al desarrollo de estos elementos con la intención de incursionar en el campo de la tecnología computacional, apoyando la transformación de la matriz productiva del país. Es por esto que el aporte que se pretende ofrecer con el presente proyecto es de carácter práctico.

Este producto podría ser comercializado en el sector de la tecnología computacional, dirigido a usuarios con alta demanda de capacidad de procesamiento, tales como: editores multimedia, *gamers*, ingenieros,

diseñadores gráficos y arquitectos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar un sistema de enfriamiento líquido para Unidades de Procesamiento Gráfico (GPU) empleando herramientas de Diseño Asistido por Computadora (CAD) y Dinámica de Fluido Computacional (CFD) con la finalidad del mejoramiento de las herramientas mecánicas aplicadas a electrónica.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Determinar las dimensiones del sistema termo hidráulico para el mejoramiento de la transferencia de calor, mediante métodos de elementos finitos.
2. Generar un modelo en 3D empleando herramientas CAD, para realización de simulaciones del sistema de enfriamiento líquido.
3. Identificar la alternativa óptima en base a los requerimientos del cliente y demás restricciones físicas.

1.4 Marco teórico

El término GPU se refiere estrictamente al componente electrónico a cargo de los procesos gráficos, ubicado en la tarjeta de video, la cual a más de la GPU cuenta con memorias VRAM, reguladores de voltaje, y demás componentes pasivos. Al ser la GPU el componente principal, comúnmente se emplea el término para hacer referencia a la tarjeta gráfica en su totalidad.

1.4.1 Disipación de calor en componentes electrónicos

El sobrecalentamiento tiene como efecto directo el daño de un componente electrónico, los cuales mantienen un intervalo de

temperatura de funcionamiento óptimo y por fuera de este cae su capacidad de operar de forma estable. Se convierte en una tarea totalmente indispensable disipar este calor excesivo sobre cualquier componente electrónico a fin de preservar su operación y estabilidad. (Platt y Jansson, 2014)

La disipación de calor en componentes electrónicos se logra mediante modos mecánicos de transferencia de calor, en donde, particularmente se menciona la conducción y convección (Pisacane, 2005). En los sistemas de refrigeración se utilizan materiales con alta capacidad de remoción de calor, estos materiales son la materia prima de los dispositivos que atrapan por conducción el calor de los componentes electrónicos.

Para mejorar el proceso mencionado anteriormente se usan sistemas que aumenten el flujo del medio circundante sobre los materiales, generando convección forzada mediante mecanismos de bombeo ventilación. (Cengel y Ghajar, 2020)

En distintas aplicaciones, los dispositivos se diseñan con aletas o microconductores dependiendo de su implementación y la dirección que se desea para el líquido refrigerante. (Ashton, 2013)

1.4.2 Modos de refrigeración en unidades de procesamiento gráfico.

Los modos de refrigeración en componentes electrónicos como las unidades de procesamiento grafico según Murshed (2016) son:

1.4.2.1 Convección natural

El modo de refrigeración por convección natural se observa en los sistemas pasivos de aire, los cuales solo utilizan por lo general un metal de gran tamaño sobre los componentes electrónicos para que se genere la transferencia de calor. Estos dispositivos suelen tener aletas para aumentar su

capacidad de disipación. Su desventaja consiste en que no son bueno para absorber grandes cantidades de calor, lo cual lo vuelve inservible. (*Bureau of Ships Navy Department, 1957*)

1.4.2.2 Enfriamiento por aire mediante convección forzada

El modo de convección forzada utilizando aire como fluido refrigerante se encuentra en los sistemas activos de aire, los cuales utilizan el mismo método mencionado por convección natural, pero se agrega un mecanismo de ventilación que aumente la velocidad del aire sobre las aletas del disipador. En este sistema se mejora la tasa de remoción de calor respecto al sistema pasivo, incrementando el rendimiento funcional de la GPU y/o componentes electrónicos en general. (*Bureau of Ships Navy Department, 1957*)

1.4.2.3 Enfriamiento líquido mediante convección forzada

Con el objetivo de aumentar la disipación de calor se utilizan sistemas cerrados cíclicos, en donde, un líquido refrigerante es bombeado a través de tuberías y pasando por los distintos dispositivos de disipación de calor. En general, estos sistemas utilizan agua destilada como liquido refrigerante, aunque se puede optar por otros refrigerantes dependiendo de los requerimientos del usuario o de la demanda del ordenador. (Murshed, 2016)

1.4.2.4 Evaporación líquida

Este modo de refrigeración es sencillamente el mismo proceso de evaporación del refrigerante que se encuentran en toda máquina de refrigeración como los aires acondicionados o refrigeradores caseras. Consisten principalmente cuatro partes siendo el compresor, evaporador, válvula de expansión y condensador. Estos

sistemas no suelen ser muy utilizados. (Murshed, 2016)

1.4.3 Sistemas de refrigeración líquida para GPU

Los sistemas de convección forzada líquida poseen una alta capacidad de remoción comparado con sistemas más convencionales, estos sistemas generalmente consisten en un dispositivo que se ubica por encima de la PCB de la tarjeta gráfica. (Jimiao, 2020) Estos dispositivos son diseñados en dos formas, las cuales consisten en cubrir la mayor superficie de la tarjeta posible y los dispositivos que solo se enfocan en la GPU denominados *full cover block* y *gpu block*, respectivamente. (Bandyopadhyay, 2019)

Los dispositivos *full cover* presentan una alta capacidad de remoción de calor al cubrir mayor área sobre la tarjeta gráfica, su desventaja radica debido a que como hoy en día existen una gran variedad de tarjetas grafica entonces un dispositivo *full cover* únicamente es compatible para una familia específica de PCB. Por lo tanto, existen diferentes diseños de dispositivos *full cover* por cada tipo de PCB. (Cook, 2013)

Los dispositivos *gpu block* únicamente se enfocan en la remoción de calor sobre el chip principal de la tarjeta gráfica, ignorando a los otros componentes lo cual lo convierte en su desventaja principal. Al ser dispositivos mas reducidos su costo es menor comparado con los dispositivos *full cover*, además estos dispositivos suelen ser compatibles entre distintas familias de tarjetas gráficas. (Cook, 2013)

1.4.4 Materiales para dispositivos de refrigeración líquida

Generalmente, los materiales implementados en la fabricación de dispositivos de refrigeración líquida son metales, donde destacan particularmente el aluminio y cobre. Estos materiales tienen la capacidad de absorber y transferir eficazmente el calor sobre toda su

superficie, es decir, poseen muy buena conductividad térmica.

Existen claras diferencias entre utilizar cobre y aluminio para fabricar los dispositivos de refrigeración líquida, entre las más importantes respecto al tema en desarrollo se encuentra la densidad de los materiales y conductividad térmica. El cobre posee mejor conductividad térmica que el aluminio, pero su principal desventaja se refleja en la densidad. Dependiendo del caso y su aplicación se pueden optar por estos dos materiales considerando sus ventajas y desventajas al momento de diseñar un disipador de calor (Woldman y Frick, 2000). En la Tabla 1.1 se presentan las características más relevantes para la aplicación, de estos dos materiales.

Tabla 1.1 Propiedades del cobre y aluminio

	Cobre	Aluminio
Conductividad térmica [W/m K]	385	205,0
Densidad [g/cm ³]	8.96	2.7
Precio [\$/ton] ¹	7979.50	2000.50
Módulo de elasticidad [MPa]	42,500	26,300
Dureza Brinell [HB]	35	15

1.4.5 Líquido refrigerante y nanofluidos

Actualmente, los refrigerantes para sistemas de enfriamiento varían según los requerimientos de cada usuario, implementación y la relación costo-beneficio más adecuada. Cabe recalcar que dependiendo de su implementación en el sistema de refrigeración la elección de un líquido refrigerante se vuelve crucial para un buen desempeño tanto del sistema como del provecho que podría obtener los componentes electrónicos.

Para ordenadores de alto de rendimiento los cuales nunca o muy poco son apagados los líquidos refrigerantes suelen ser los denominados

¹ ("London Metal Exchange: Non-ferrous", 2021)

líquidos con partículas, los cuales poseen un alto poder de remoción de calor, pero en un tiempo no muy prolongado generan problemas de sedimentación en las tuberías y dispositivos del sistema de refrigeración lo que implica reemplazar el refrigerante en un tiempo determinado de forma constante. (Bairagi, 2012)

Por otro lado, existen opciones que son mas accesibles y no requieren de un cambio repetido. El agua destilada se presenta como una excelente opción puesto que tiene buena conductividad térmica y a un costo accesible, utilizando agua destilada como liquido refrigerante evitará la corrosión de los dispositivos o disipadores que se encuentran sobre los componentes electrónicos. (Bairagi, 2012)

Con la finalidad de mejorar la conductividad térmica de los líquidos refrigerantes, estudios recientes presentan a los nanofluidos como una solución a los problemas de sobrecalentamiento en componentes electrónicos ya que estos elevan la capacidad de remoción de calor (Kwon, Sik Hwang y Pil Jang, 2010).

Según Jeng (2013) el uso del nanofluido Al_2O_3 /agua en lugar del agua destilada mejora el rendimiento de disipación de calor, con un mayor consumo por parte de la bomba del sistema de refrigeración, pero con una menor temperatura superficial sobre los componentes. También aclara que la implementación de este nanofluido prolonga la vida útil del equipo.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

La metodología empleada para el desarrollo del sistema de enfriamiento para Unidades de Procesamiento Gráfico se encuentra representada en la Figura 2.1.

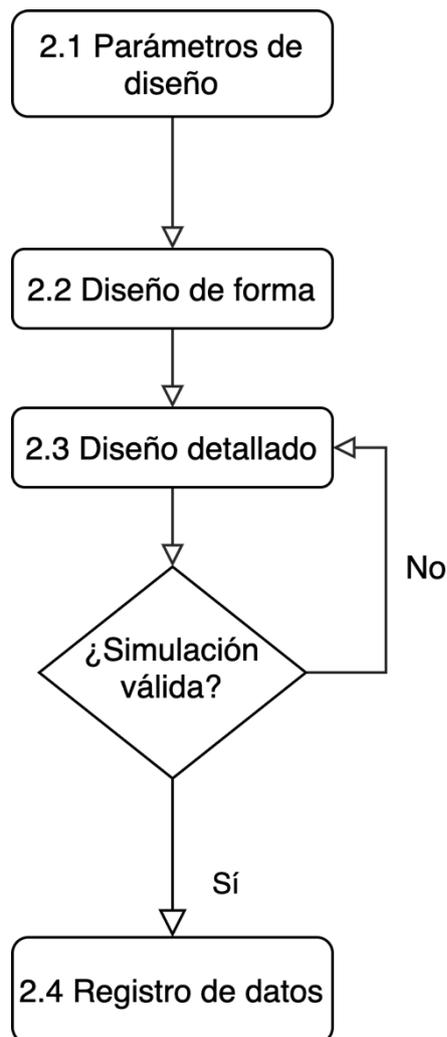


Figura 2.1 Metodología aplicada

Se empleó las herramientas “caja negra” y “caja transparente” para la conceptualización del proyecto a realizar, mostradas en las Figuras 2.2 y 2.3, respectivamente. La temperatura T_1 mencionada en las figuras es mayor a la T_2 .



Figura 2.2 Caja negra

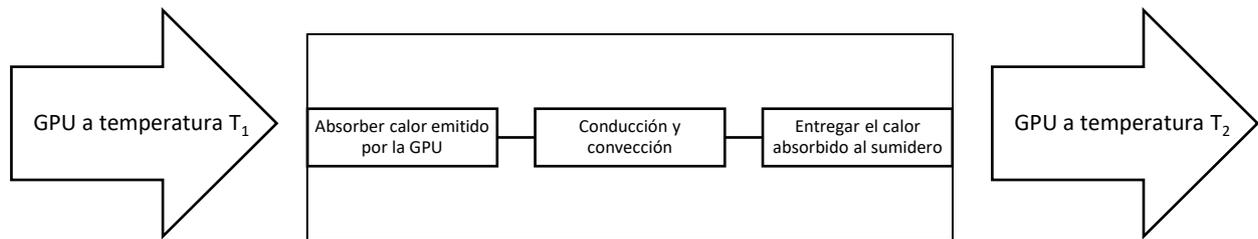


Figura 2.3 Caja transparente

2.1 Parámetros de diseño

Previo a la definición de los parámetros de diseño se consultó con el cliente los requerimientos del mismo, con el fin de traducirlos en especificaciones técnicas.

2.1.1 Requerimientos de diseño del cliente

- A. Enfoque en el GPU
- B. Mayor cantidad de calor posible removida
- C. Acabado estético
- D. Compatibilidad con banco de pruebas existente

En base a los requerimientos del usuario se obtuvieron las siguientes especificaciones de diseño.

2.1.2 Especificaciones de diseño

De los distintos componentes que emiten calor, presentes en las tarjetas gráficas, el cliente especificó que la remoción de calor debía tener como prioridad la ubicación del GPU. El modelo para el cual el

cliente solicitó la solución es la tarjeta gráfica GeForce GTX 1650, por lo tanto las características de la misma se detallan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Características de la tarjeta gráfica GeForce GTX 1650

	GeForce GTX 1650
Ancho de ranura (conector)	Doble conector (dual slot)
Largo [mm]	229
Ancho [mm]	111
Alto [mm]	35
Temperatura máxima GPU [°C]	92
TDP [W]	75
Número de tarjeta	PG174 SKU 0

Se realizó un esquema en tres dimensiones de la tarjeta a ser utilizada, para poder bosquejar la solución de manera que las alturas de los distintos componentes y sus ubicaciones estuvieran contempladas. En la sección de Apéndices C se encuentra el plano con las medidas relevantes para el sistema de enfriamiento, y en la Figura 2.4 la representación en vista isométrica.

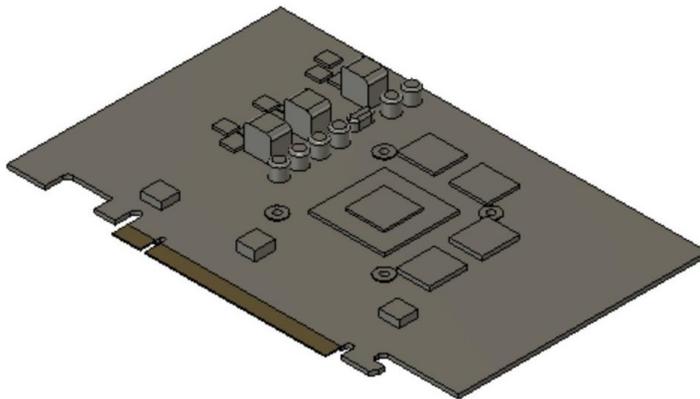


Figura 2.4 Representación en 3D de la tarjeta GeForce GTX 1650 con los componentes a considerarse en el diseño

Tomando como referente a los dispositivos disponibles en el mercado, se determinó un rango para la cantidad de calor a removerse, de modo que la solución generada pueda ser evaluada y sea competitiva en el mercado actual. En base a la naturaleza comercial que tiene el

proyecto, el cliente solicitó que sea además de funcional, visualmente atractivo para el usuario, por lo tanto se decidió hacer una cubierta transparente de modo que el flujo sea visible.

El banco de pruebas del cliente cuenta con una bomba y un radiador, lo cual determina el rango de caudal con el que puede operar nuestra solución. Además utiliza agua destilada como fluido refrigerante, por lo tanto esto debe contemplarse en el diseño. En la Tabla 2.2 se muestran las especificaciones de diseño resumidas.

Tabla 2.2 Especificaciones de diseño

Temperatura máxima en la tarjeta [°C]	92
Cantidad de calor emitido por la tarjeta [W]	75
Característica de la cubierta	Transparente
Rango de velocidad de flujo [m/s]	0.1 – 1
Bomba del sistema [l/h]	800
Rosca de mangueras del banco de prueba	G1/4
Fluido refrigerante	Agua destilada

2.2 Diseño de forma

Una vez establecidos los requisitos de diseño, los parámetros que se variaron se especifican a continuación. Adicionalmente, se muestran las herramientas utilizadas para generar el diseño de forma en base a las alternativas planteadas.

2.2.1 Alternativas

Para generar el diseño de forma se consideraron tres aspectos principales del sistema: el tipo de cobertor, el número de entradas y el tipo de circuito para el disipador.

Cada aspecto fue determinado empleando una matriz de decisión, donde los criterios empleados fueron asignados un peso mediante comparación por pares. La escala utilizada para llevar a cabo la

comparación por pares mostrada en la Tabla 2.4 se encuentra detallada en la Tabla 2.3 Los criterios a evaluarse son los siguientes:

Rendimiento: en este contexto se refiere a su desempeño en la tarea de remover calor; alto rendimiento implica un mayor enfriamiento.

Maquinabilidad: este término indica qué tan sencillo es remover material para obtener la geometría deseada. Entiéndase como la facilidad o dificultad de fabricación.

Peso: fuerza que ejercerá el sistema en la tarjeta gráfica.

Costo: inversión monetaria necesaria para la fabricación del sistema.

Estética: se refiere a si es o no visualmente atractivo.

Tabla 2.3 Escala de importancia

Valor	0	2.5	5	7.5	10
Detalles	Nada importante en comparación	No importante en comparación	Misma importancia	Importante en comparación	Muy importante en comparación

Tabla 2.4 Comparación por pares entre criterios

	Rendimiento	Maquinabilidad	Peso	Costo	Estética	Total de fila	Peso relativo
Rendimiento	5	7.5	7.5	7.5	10	37.5	28.8
Maquinabilidad	2.5	5	7.5	5	7.5	27.5	21.2
Peso	2.5	2.5	5	5	7.5	22.5	17.3
Costo	2.5	5	5	5	2.5	20	15.4
Estética	0	7.5	2.5	7.5	5	22.5	17.3
Total						130	100.00

Maximizar el rendimiento es la prioridad de este proyecto, lo cual se ve reflejado en la comparación por pares; el rendimiento es superior e importante a los demás criterios en mayor o menor medida. El siguiente criterio relevante es la maquinabilidad, ya que el producto debe poder fabricarse localmente, de preferencia con las máquinas y herramientas con las que el cliente ya cuenta. El peso y la estética son dos criterios de igual importancia ya que previamente se especificó que de la parte estética dependía su potencial de comercialización.

El peso, si bien debe tenerse en cuenta, no es un factor muy restringido. El criterio de menor peso relativo fue el costo. Primeramente porque el cliente no solicitó buscar la solución más económica, sino la que removiera la mayor cantidad de calor posible.

Además, al no haber otras soluciones disponibles comercialmente para la tarjeta gráfica especificada, no se puede hablar de competitividad en costos. A continuación, se realizó la evaluación de alternativas, empleando una escala de 1 a 5, donde 5 representa la opción más deseable acorde a cada criterio.

En la Tabla 2.5 se evaluó el tipo de cobertor a diseñarse, eligiendo entre un *full cover* y un *GPU block*, donde el primero remueve calor de todos los componentes emisores sobre la tarjeta mientras que el segundo sólo interactúa con la GPU.

En la Tabla 2.6, el tipo de entrada entre tres alternativas: entrada ubicada en la periferia, una entrada directa sobre la GPU y dos entradas ubicadas directamente sobre la GPU. Finalmente, se utilizó la Tabla 2.7 para seleccionar el tipo de circuito a usarse, las dos opciones consideradas fueron: un recorrido liso vs. la inclusión de aletas.

Tabla 2.5 Tipo de cobertor

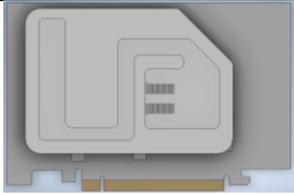
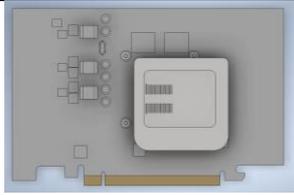
	Full cover	GPU block
		
Rendimiento (28.8%)	5	3
Maquinabilidad (21.2%)	4	5
Peso (17.3%)	4	5
Costo (15.4%)	4	5
Estética (17.3%)	5	4
Puntuación ponderada	4.46	4.25

Tabla 2.6 Tipo de entrada

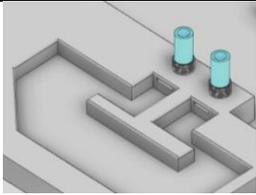
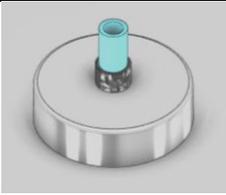
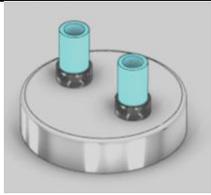
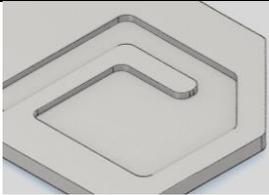
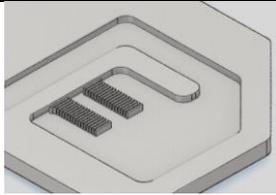
	Entrada en la periferia	Entrada directa sobre la GPU	Doble entrada directa sobre la GPU
			
Rendimiento (28.8%)	3	4	5
Maquinabilidad (21.2%)	5	4	3
Peso (17.3%)	5	4	3
Costo (15.4%)	5	4	3
Estética (17.3%)	2	3	5
Puntuación ponderada	3.91	3.83	3.92

Tabla 2.7 Tipo de circuito

	Disipador de circuito liso	Disipador de circuito con aletas
		
Rendimiento (28.8%)	2	5
Maquinabilidad (21.2%)	5	3
Peso (17.3%)	4	5
Costo (15.4%)	5	4
Estética (17.3%)	3	5
Puntuación ponderada	3.62	4.42

2.2.2 Selección de material

En base a lo detallado en la sección 1.4.4, los dos materiales considerados fueron el cobre y el aluminio. La conductividad del cobre es mayor a la del aluminio en un 60% aproximadamente, pero es cerca de 3 veces más denso y 4 veces más costoso. Sin embargo, por lo mostrado en la Tabla 2.4 de comparación entre criterios, el rendimiento es más importante para este proyecto que el peso y el costo, por lo tanto, selecciona el cobre como material para la base, que es la parte que estará en contacto con los componentes, por lo tanto, la sección responsable de la conducción térmica.

Mientras que la parte superior del sistema, la tapa, se fabricará de acrílico de modo que sea posible visualizar la geometría interna de la solución, así como el fluido en movimiento. Respondiendo de esta manera al pedido del cliente que se considere el aspecto estético.

2.2.3 Características de la solución generada

En la Tabla 2.8 se encuentran detalladas las características de la

solución generada, en base a lo expuesto anteriormente. Estas características buscan responder a las necesidades del cliente y las especificaciones de diseño.

Tabla 2.8 Características de la solución generada

Mecanismos y componentes	Tipo
Tipo de cobertor	Full cover
Material de la base	Cobre
Material de cubierta	Acrílico
Número de entradas	2
Número de salidas	1
Tipo de entrada	Directa sobre la GPU

2.2.4 Diseño de forma

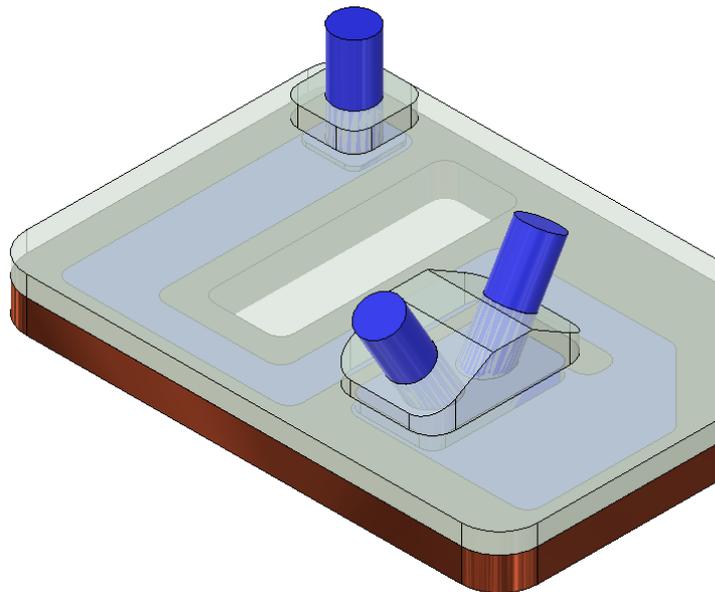


Figura 2.5 Diseño de forma de la solución propuesta

2.3 Diseño detallado

Para definir el diseño se empezó por un dimensionamiento en base a la información disponible, tanto referente a la tarjeta como a los materiales a usarse. Se emplearon herramientas computacionales para modelar y simular el sistema de enfriamiento para GPU, tales como Inventor del desarrollador Autodesk y ANSYS, software de la compañía del mismo nombre.

2.3.1 Dimensionamiento

En base a la tarjeta de video especificada, las dimensiones de la solución propuesta se presentan en la Tabla 2.9 y detallan en la sección de Apéndices, en el Plano 2. Consideraciones adicionales que se tuvieron para el dimensionamiento fueron: las dimensiones comerciales de la materia prima, el espacio disponible para la implementación de la solución y las dimensiones de soluciones disponibles en el mercado.

Tabla 2.9 Dimensiones solución propuesta

Largo total [mm]	124.1
Ancho total [mm]	86.82
Alto total [mm]	25
Alto base [mm]	8
Alto tapa [mm]	17

2.3.2 Cálculos teóricos

Con el fin de brindar información que haga las veces de referencia para trabajos posteriores, se realizaron cálculos térmicos, en base a los datos obtenidos mediante la simulación realizada en ANSYS. Las variables de principal interés fueron la temperatura sobre la GPU, el flujo de calor y el coeficiente global de transferencia de calor. Para analizar el flujo de calor desde el GPU hasta el agua destilada a usarse como fluido refrigerante, se consideraron cuatro elementos resistivos. Por las propiedades y características de cada material, la resistencia térmica que oponen a la transferencia de calor debe ser considerada de manera independiente. Esto se realizó empleando la Ecuación 2.1, la cual corresponde a lo representado en las Figuras 2.6 y 2.7, donde la primera muestra la distribución de resistencias en una vista lateral y la última, las dimensiones en una vista frontal.

$$q_T = \frac{T_F - T_{IHS}}{R_{IHS} + R_{TP} + R_B + R_{eq}} \quad (2.1)$$

Donde

\dot{q}_T : flujo de calor

T_F : temperatura de aleta

T_{IHS} : temperatura del IHS

R_{IHS} : resistencia del IHS

R_{TP} : resistencia de la pasta térmica

R_B : resistencia de la base

R_{eq} : resistencia equivalente

Los valores de temperatura se obtuvieron del análisis de CFD realizado en ANSYS.

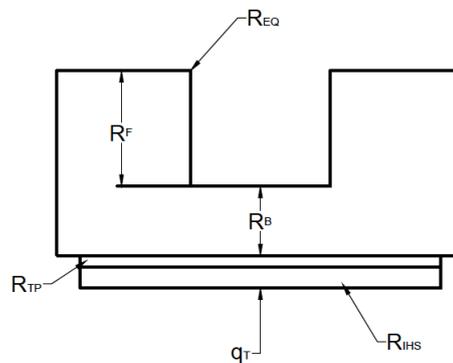


Figura 2.6 Distribución de resistencias, vista lateral

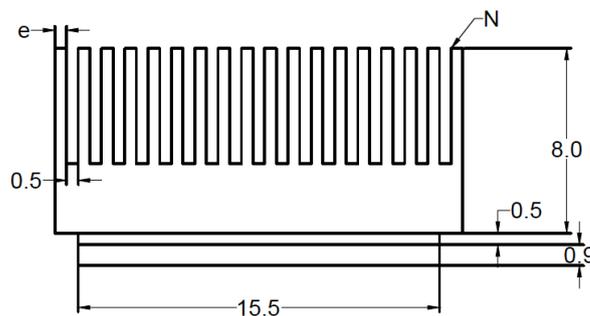


Figura 2.7 Dimensiones, vista frontal

Las variables e y N corresponden al espesor de aleta y al número de aletas, respectivamente. Al mantener fija el área a cubrirse, la cual concierne a la GPU, estas dos variables se encuentran relacionadas, y

toman los valores mostrados en la Tabla 2.10. El ancho de cada aleta se mantuvo fijo en 5.75 mm y la separación de las columnas en 6 mm. De modo que el ancho total de la vista lateral se fijó en 17.5, mientras que el de la vista frontal varió en base al espesor y número de aletas.

Tabla 2.10 Configuraciones de aletas

Modelo	Espesor de aleta [mm]	N por columna	N total
Prueba 1	0.5	17	34
Prueba 2	0.7	14	28
Prueba 3	1.0	11	22

2.3.2.1 Resistencia térmica del IHS

El IHS es un difusor térmico integrado, con el que la tarjeta ya cuenta. Su resistencia térmica se calcula mediante la Ecuación 2.2, de resistencia por conducción, expresada de la siguiente forma:

$$R_{IHS} = \frac{L_{IHS}}{K_{IHS}A_{IHS}} \quad (2.2)$$

Donde

L_{IHS} : altura del IHS

K_{IHS} : coeficiente de conducción del IHS

A_{IHS} : área transversal del IHS

2.3.2.2 Resistencia térmica de la pasta térmica

La resistencia térmica de la pasta a emplearse ya se encuentra tabulada, donde se especifica la resistencia por unidad de área. Se asume que la pasta es colocada exclusivamente sobre la base, cubriendo por entero el área con una capa homogénea. Por lo tanto, la resistencia térmica total de la pasta térmica se define mediante la Ecuación 2.3.

$$R_{PT} = \frac{R_{PT}''}{A_{IHS}} \quad (2.3)$$

Donde

R_{PT}'' : resistencia dada por el fabricante.

2.3.2.3 Resistencia térmica de la base

En la base se da transferencia de calor por conducción, la resistencia depende del área transversal, la cual se considera únicamente en el contacto con el IHS y el espacio que contiene el refrigerante. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$R_B = \frac{L_B}{K_B A_B} \quad (2.4)$$

Donde

L_B : altura de la base

K_B : coeficiente de conducción de la base

A_B : área de la base.

2.3.2.4 Resistencia térmica de las aletas

Se consideran dos resistencias actuando en paralelo; la primera corresponde a convección en el espacio entre aletas que se encuentra ocupado por fluido y la otra corresponde a una combinación de convección y conducción a lo largo de las aletas. La primera se puede definir mediante la Ecuación 2.5:

$$R_{Fconv} = \frac{1}{h(A_B - NA_{BF})} \quad (2.5)$$

Donde

R_{Fconv} : resistencia de aleta correspondiente a convección

A_{BF} : área base de aleta

Por definición de resistencia térmica, se calcula la resistencia de una aleta de la siguiente manera:

$$R_F = \frac{\theta_b}{\dot{q}_F} \quad (2.6)$$

Donde

R_{tF} : resistencia de las aletas

θ_b : delta de temperatura entre la base y el ambiente

\dot{q}_F : flujo de calor por las aletas

El calor transferido se calcula con la ecuación 2.7, considerando la convección que se genera en las aletas con el fluido.

$$\dot{q}_F = M \frac{\sinh(mL_F) + \left(\frac{h}{mK_F}\right) \cosh(mL_F)}{\cosh(mL_F) + \left(\frac{h}{mK_F}\right) \sinh(mL_F)} \quad (2.7)$$

Siendo M y m variables que se calculan mediante las Ecuaciones 2.8 y 2.9:

$$M = \theta_b \sqrt{hkPA_c} \quad (2.8)$$

Donde

h : coeficiente de convección del fluido

k : coeficiente de conducción aleta

P : perímetro de la aleta

A_c : área de contacto

$$m = \sqrt{\frac{hP}{kA_C}} \quad (2.9)$$

La resistencia total de todas las aletas se ve definida por:

$$R_{F(N)} = \frac{R_F}{N} \quad (2.10)$$

La resistencia total equivalente sería:

$$R_{eq} = \left(\frac{1}{R_{Fconv}} + \frac{1}{R_{F(N)}} \right)^{-1} \quad (2.11)$$

Asumiendo estado estable, todo el calor absorbido por el líquido es igual al emitido, se puede calcular el factor de convección del fluido mediante la siguiente ecuación:

$$h = \frac{\dot{m}C_p(T_{in} - T_{out})}{n_o A_T \Delta T_{ml}} \quad (2.12)$$

Donde

\dot{m} : flujo másico

C_p : calor específico

n_o : eficiencia total de las aletas

A_T : área total

T_{ml} : temperatura media logarítmica

T_{in} : temperatura de entrada del fluido

T_{out} : temperatura de salida del fluido

Se requiere introducir el concepto de temperatura media logarítmica, la cual se define como la temperatura promedio en una distribución de temperatura. Esta se calcula mediante:

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_c - T_{out}) - (T_c - T_{in})}{\ln\left(\frac{T_c - T_{out}}{T_c - T_{in}}\right)} \quad (2.13)$$

Donde

T_c : temperatura media de contacto con las aletas

Es posible calcular la eficiencia total de las aletas empleando la Ecuación 2.14 y la eficiencia por aleta mediante la Ecuación 2.15:

$$n_o = 1 - \frac{NA_F}{A_T} (1 - n_f) \quad (2.14)$$

Donde:

n_f : eficiencia de una aleta

$$n_f = \frac{\tanh(mL_c)}{mL_c} \quad (2.15)$$

Donde L_c corresponde a la longitud característica y se define de la siguiente manera:

$$L_c = L_F + \frac{t}{2} \quad (2.16)$$

Mediante la Ecuación 2.17 se define y calcula el coeficiente global de transferencia de calor:

$$U = \frac{\dot{q}_T}{A_T \Delta T_{ml}} \quad (2.17)$$

2.3.3 Simulaciones

Con el fin de observar la tendencia en la transferencia de calor al variar el espesor y número de aletas, se realizaron simulaciones. Para las

cuales fue necesario modelar el dispositivo y el fluido en 3D, en base a la placa especificada previamente. El siguiente paso fue cargar el modelo al software ANSYS y generar el mallado en el cual éste pudiera basar el análisis de elementos finitos. Los elementos considerados se presentan en la Tabla 2.11.

Tabla 2.11 Características de los elementos para la simulación

Elemento	Material	Temperatura Inicial [K]	Tamaño de elemento [m]
Disipador de calor	Cobre	300	0,00080
Integrado (GPU)	Cobre	300	0,00100
Fluido	Agua	300	0,00080

A continuación, se definieron condiciones iniciales de borde, se especificaron las entradas del fluido, la salida, y el método matemático con el que se quería trabajar. Lo cual se detalla en la Tabla 2.12. Para este escenario se eligieron ecuaciones cuadráticas, es decir, diferenciales de segundo orden.

Tabla 2.12 Datos de entrada

Datos de entrada	Velocidad [m/s]	Potencia máxima [W/m ³]
Entrada 1	0.1	N/A
Entrada 2	0.1	N/A
Integrado (GPU)	N/A	347E06

Cabe mencionar que, por disponibilidad, las simulaciones fueron realizadas con licencia de estudiantes, la cual tiene ciertas limitaciones frente a la licencia completa o profesional. Esta última, perteneciente al cliente, sólo fue empleada para simular el modelo final, de modo que para identificación de tendencias se usó la de estudiantes y para datos específicos la que no presentaba restricciones.

2.3.4 Consideraciones mecánicas

Como el intercambiador de calor que se diseñó opera junto a componentes electrónicos se debió asegurar que no hubiera fugas en el diseño. Por este consistir en dos partes, base de cobre y tapa

acrílica, se tuvo como objetivo asegurar la estanqueidad al momento de diseñar la junta. Al ser la base el componente sujeto a presiones y fuerzas no despreciables, éste se sometió a un análisis de tensión. Los valores de presión se obtuvieron mediante las simulaciones realizadas en ANSYS y se ingresaron en el software Inventor; entorno en el cual se realizó el análisis mencionado.

2.4 Registro de datos

Si al generar el mallado e ingresar la información necesaria en ANSYS, el programa no presentó problemas, errores o el indicador de que el mallado no convergió, se podía pasar a la fase de registro de datos. Una vez que el software realizó los cálculos, se seleccionaron los parámetros que era de nuestro interés parametrizar: la temperatura a la cual se estabilizaba la GPU en base a la velocidad de entrada del fluido, la cual se varió de 0.1 m/s a 2 m/s. Con los datos obtenidos se generaron gráficas que permitieron visualizar la tendencia mencionada.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Simulaciones

Se presentan los resultados obtenidos mediante el software ANSYS, el cual se basa en análisis por elementos finitos. El modelo con el cual se trabajó, junto a las entradas y salida, se encuentra representado en la Figura 3.1. En el Apéndice B se encuentra el proceso seguido a mayor detalle.

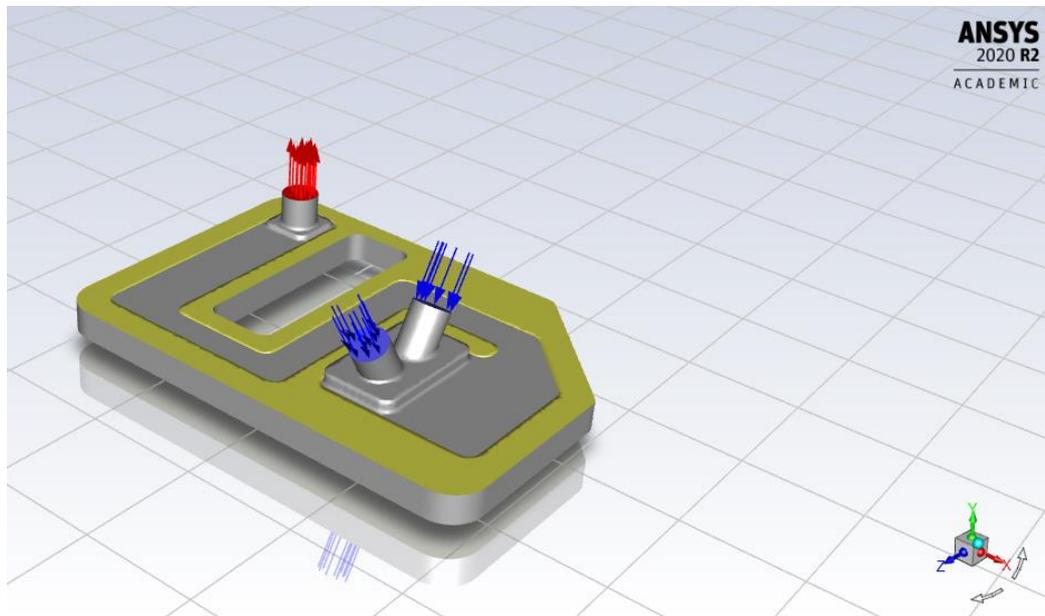


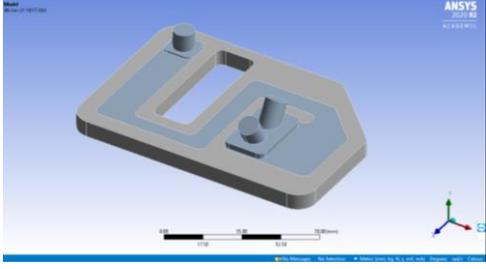
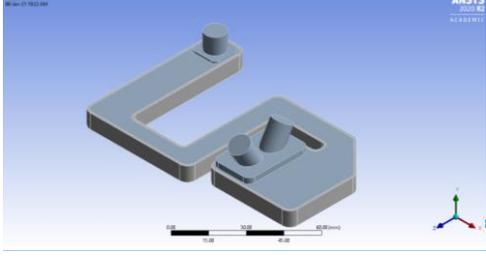
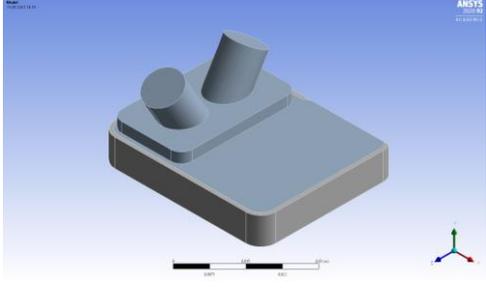
Figura 3.1 Modelo para análisis, entradas en azul, salida en rojo.

3.1.1 Estrategia de evaluación

Al estar haciendo uso de una licencia estudiantil del software mencionado, se tuvo como limitante a los recursos computacionales; el máximo número de elementos a evaluarse fue de 512 mil. De modo que para establecer la estrategia de evaluación, inicialmente se plantearon tres modelos, descritos en la Tabla 3.1, y se analizaron para determinar cuál entregaría resultados confiables, optimizando el uso de dichos recursos.

Para los tres modelos se fijó el espesor de aletas a 0.5 mm, lo cual corresponde a dos columnas de 17 aletas cada una, sobre la GPU.

Tabla 3.1 Modelos empleados en el análisis preliminar

Modelo	Imagen	Descripción
V1		<p>Modelo completo, incluye la trayectoria completa del fluido además de todo el material de la base.</p>
V2		<p>Se remueve el material de la base que no está en contacto con el fluido, dejando sólo una pared alrededor de este. Se considera la trayectoria completa del fluido.</p>
V3		<p>Sólo se considera un área sobre la GPU. Se remueve el material de la base que no está en contacto con el fluido correspondiente, dejando una pared fina. En este modelo sólo se considera la entrada del diseño original y se define como salida una sección del fluido.</p>

Los resultados correspondientes al modelo V1 se muestran en la Tabla 3.2. y los correspondientes al modelo V2, en la Tabla 3.3. En ambos casos, la velocidad de entrada, bajo el nombre de variable de VelocidadEntrada, fue evaluada de 0.1 m/s a 2 m/s, con el fin de observar el comportamiento de la temperatura de estabilización de la GPU en Kelvin, representada con la variable TemperaturaGPU.

Tabla 3.2 Resultados modelo V1

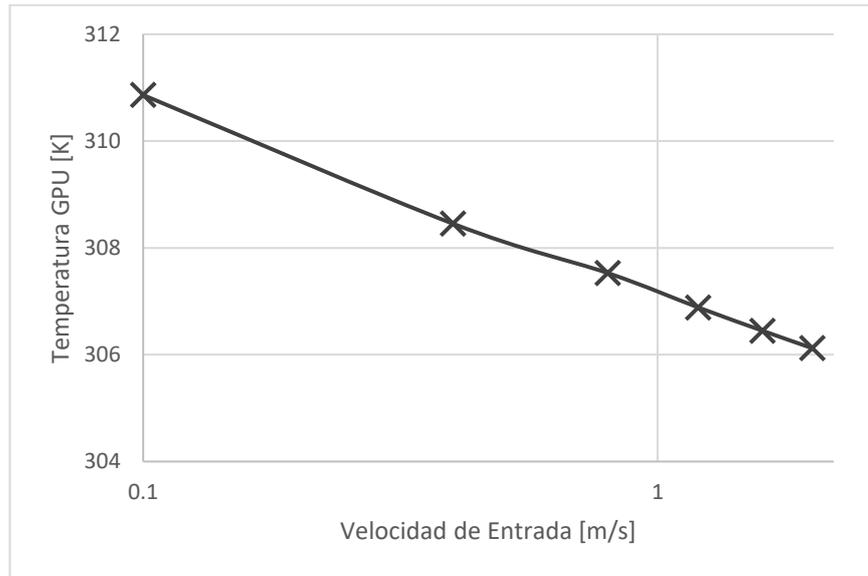
P1 – VelocidadEntrada [m/s]	P3 – TemperaturaGPU [K]
0.1	310.862
0.4	308.454
0.8	307.530
1.2	306.885
1.6	306.449
2.0	306.122

Tabla 3.3 Resultados modelo V2

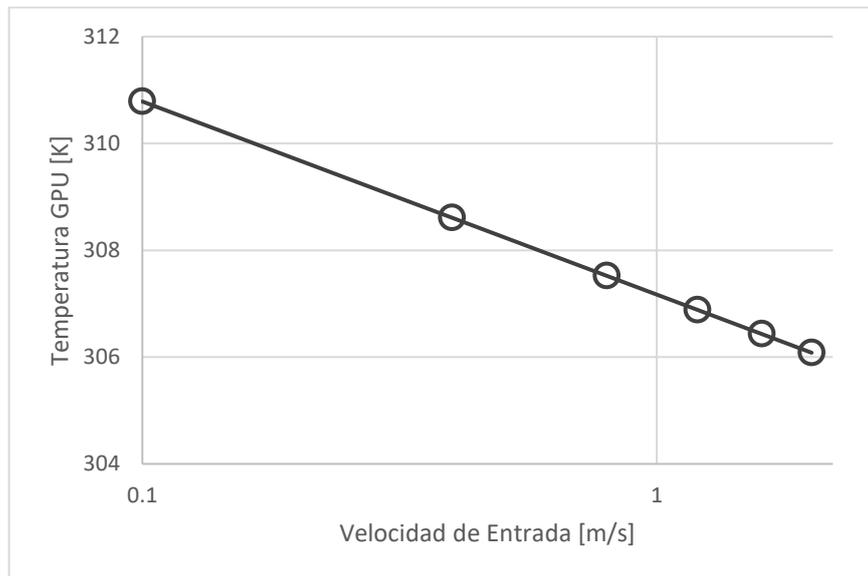
P2 – VelocidadEntrada [m/s]	P3 – TemperaturaGPU [K]
0.1	313.511
0.4	310.294
0.8	308.960
1.2	307.988
1.6	307.345
2.0	306.878

A partir de los datos obtenidos con esta parametrización, se generó la Figura 3.2. Se utilizó una escala logarítmica en los para mejorar la visualización, se puede observar que la relación entre velocidad de entrada y temperatura de estabilización responde a una logarítmica negativa.

Conforme aumenta la velocidad de entrada, la temperatura de estabilización decrece. Es decir, aumenta la cantidad de calor removido, tanto para el modelo V1 en la Figura 3.2.a como para el modelo V2, representado en la Figura 3.2.b.



(a)



(b)

Figura 3.2 Temperatura de estabilización GPU vs velocidad de entrada. (a) Modelo V1. (b) Modelo V2.

Tanto el modelo V1 como el modelo V2 se evaluaron generando el mallado bajo el mismo tamaño de elemento. Como el modelo V2 tiene menores dimensiones, el número de elementos del mallado se vio reducido; lo cual favorece al uso de recursos computacionales. Al intentar generar el mallado sobre el modelo V3 se presentó un error del tipo *floating point exception*, lo cual puede presentarse al no haber suficientes nodos para ejecutar el análisis para las condiciones mencionadas.

Por lo tanto, se optó por reducir el tamaño de elemento, de modo que el número de elementos aumentó, resultando así en suficientes nodos, convergiendo el mallado, y haciendo posible correr la simulación para V3.

Con el fin de comparar este modelo con uno de los anteriores se intentó generar el mallado sobre el V2, pero la cantidad de elementos sobre estas dimensiones superaba el límite de la licencia estudiantil. Por lo tanto, se descartó el modelo, considerando que el grado de precisión estaba por fuera del alcance de este proyecto. En la Tabla 3.4 se presenta la comparación entre los modelos V1 y V2, mediante el cálculo de error porcentual, lo cual representa la variación de los valores obtenidos con el modelo V2, respecto a los obtenidos mediante el modelo V1.

Tabla 3.4 Comparación entre V1 y V2

P3 - TemperaturaGPU V1 [K]	P3 - TemperaturaGPU V2 [K]	Error [%]
310.862	313.511	0.8521
308.454	310.294	0.5965
307.53	308.96	0.4650
306.885	307.988	0.3594
306.449	307.345	0.2924
306.122	306.878	0.2470

En base a la Tabla 3.4, se utilizó el modelo V2 ya que la variación de resultados se consideró despreciable al estar por debajo del 1% en todos los puntos evaluados, pero, la diferencia en uso de recursos computacionales sí fue significativa.

3.1.2 Aletas

Con la configuración mencionada se evaluó un espesor de aleta de 0.7 mm y 1 mm, correspondientes a un número de aletas de 28 y 22,

respectivamente. Los resultados correspondientes al espesor de 0.7 mm y 1 mm se muestran en las Tablas 3.5 y 3.6.

Tabla 3.5 Resultados espesor de aleta 0.7mm

P2 – VelocidadEntrada [m/s]	P3 – TemperaturaGPU [K]
0.1	313.614
0.4	310.375
0.8	308.978
1.2	307.931
1.6	307.26
2	306.78

Tabla 3.6 Resultados espesor de aleta 1mm

P2 – VelocidadEntrada [m/s]	P3 – TemperaturaGPU [K]
0.1	314.158
0.4	310.857
0.8	309.15
1.2	307.959
1.6	307.223
2	306.718

Para ambos resultados se observó una disminución de la temperatura de estabilización de la GPU a medida que la velocidad se incrementaba. En la Figura 3.3 se pueden observar los comportamientos obtenidos para los distintos espesores evaluados, junto al comportamiento sin aletas para referencia. Con un círculo sin relleno y línea entrecortada se muestran los puntos correspondientes a 0.5 mm de espesor, con un triángulo y línea continua los obtenidos para 0.7 mm y, con un cuadrado y línea punteada, los de 1 mm.

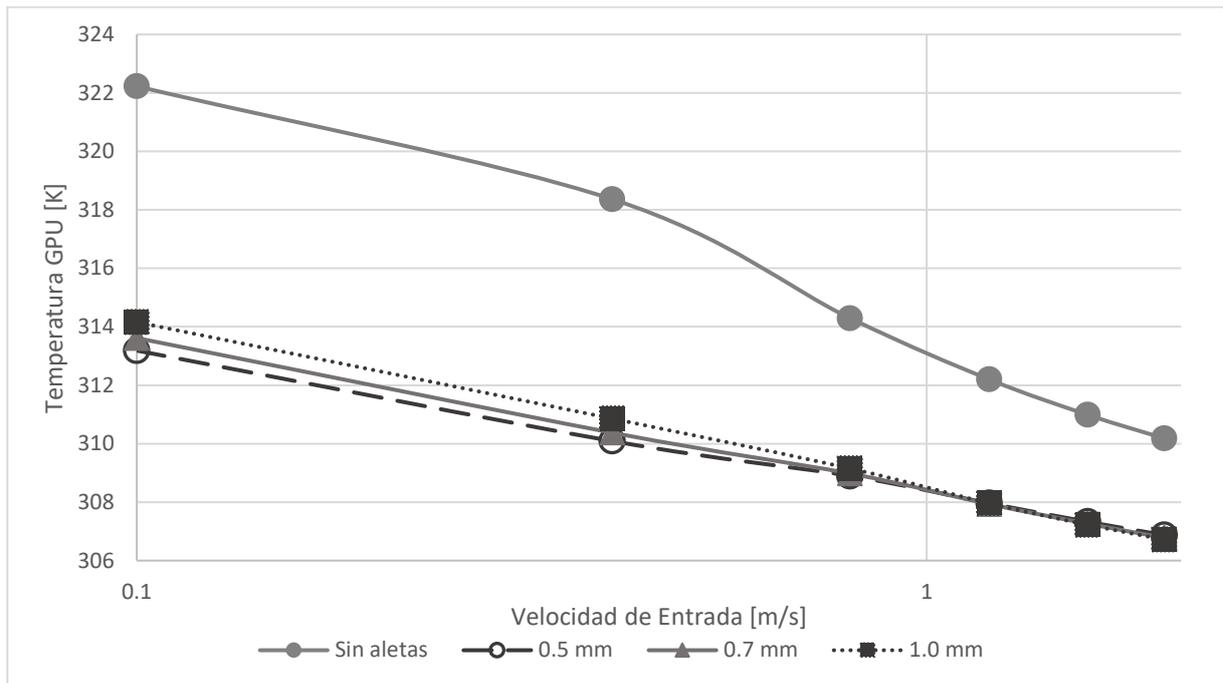
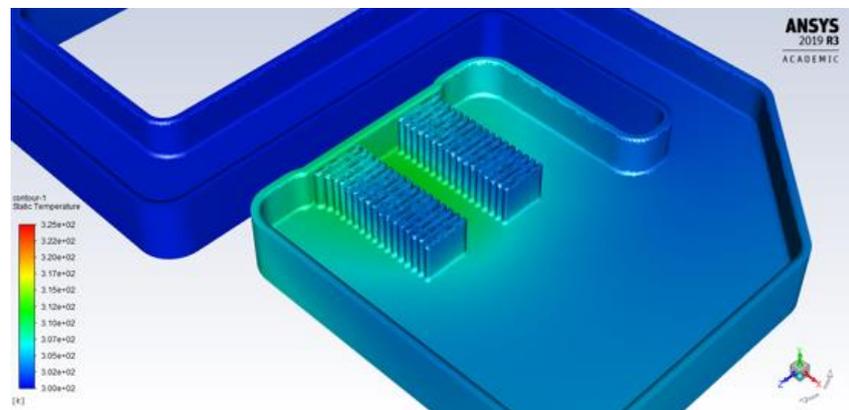


Figura 3.3 Temperatura de estabilización GPU vs velocidad de entrada, para distintos espesores de aleta, y el modelo sin aletas.

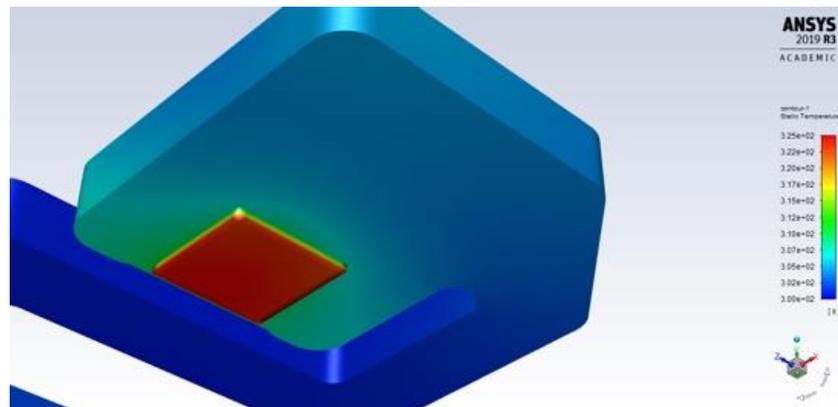
Para las velocidades menores, se puede observar una distinción entre las tres curvas, siendo las aletas de 0.5 mm de espesor las que resultan en una temperatura de estabilización menor. A medida que se incrementa la velocidad, la diferencia entre las tres curvas se ve reducida, hasta darse un cruce, de modo que para la velocidad de 2 m/s el modelo que presentó la menor temperatura de estabilización para la GPU fue el de 1 mm. Una explicación para este comportamiento es que al tener mayor área de superficie las fuerzas de arrastre aumentan, resultando en un incremento de la turbulencia lo cual a su vez facilita la transferencia de calor.

Como el banco de pruebas del cliente opera a velocidades entre 0.1 m/s y 1 m/s, el espesor de aletas seleccionado para el modelo final fue el de 0.5 mm, al ser este el que exhibió temperaturas menores en la GPU. Una vez determinada la tendencia por medio de la licencia estudiantil se utilizó la licencia profesional del cliente para calcular valores con mayor precisión. Los resultados obtenidos se encuentran detallados en la sección de Apéndices B.

Operando a capacidad máxima, se logró estabilizar a la GPU en un rango de 45.4°C a 50.6°C con la solución propuesta. Lo cual se sitúa por debajo de las temperaturas que se pueden alcanzar con las soluciones comercialmente disponibles, basadas en aire como fluido refrigerante, cuyo rango está de 55°C a 65°C. En la Figura 3.4 se presenta el gradiente de temperaturas en el modelo, al haber considerado la GPU como la fuente de calor, responsable de la emisión total, en esta región se muestran las temperaturas más altas.



(a)



(b)

**Figura 3.4 Distribución de temperatura en el modelo diseñado.
(a) Vista superior (b) vista inferior.**

En la Tabla 3.7 se registran los resultados generados en Inventor mediante el análisis de tensión. Es posible notar que el factor de seguridad de la base va desde 6 a 15, por lo tanto, el material no fallará por esfuerzos que se generen durante la operación.

Tabla 3.7 Resultados del análisis de tensión simulado en Inventor.

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen [mm ³]	74571.4	
Masa [kg]	0.666669	
Tensión Von Mises [MPa]	0.0000257838	24.857
Primera tensión principal [MPa]	-7.82241	4.43388
Tercera tensión principal [MPa]	-34.8591	1.42925
Desplazamiento [mm]	0	0.00178918
Coefficiente de seguridad	6/02424	15
Presión de contacto [MPa]	0	222.898

3.2 Resultados teóricos

El coeficiente de convección se obtuvo mediante iteraciones hasta obtener un error porcentual máximo de 0.00003. A partir de los cálculos de eficiencia con las Ecuaciones 2.14, 2.15 y 2.16, presentadas en el Capítulo 2, se obtuvo una eficiencia global máxima de 0.993 y una mínima de 0.947. Todos los cálculos se encuentran detallados en la sección de Apéndices, en la Tabla A.1.

Los resultados se ven graficados en la Figura 3.5, donde fue posible observar una variación alrededor de 0.4 m/s, por lo que se incluyeron puntos adicionales con el fin de estimar el comportamiento con mayor precisión.

Se puede observar una eficiencia máxima a velocidades cercanas a 0.4 m/s, siendo este un punto de inflexión para la gráfica; para velocidades de entrada inferiores la eficiencia se reduce considerablemente, mientras que a partir de este valor se mantiene relativamente estable.

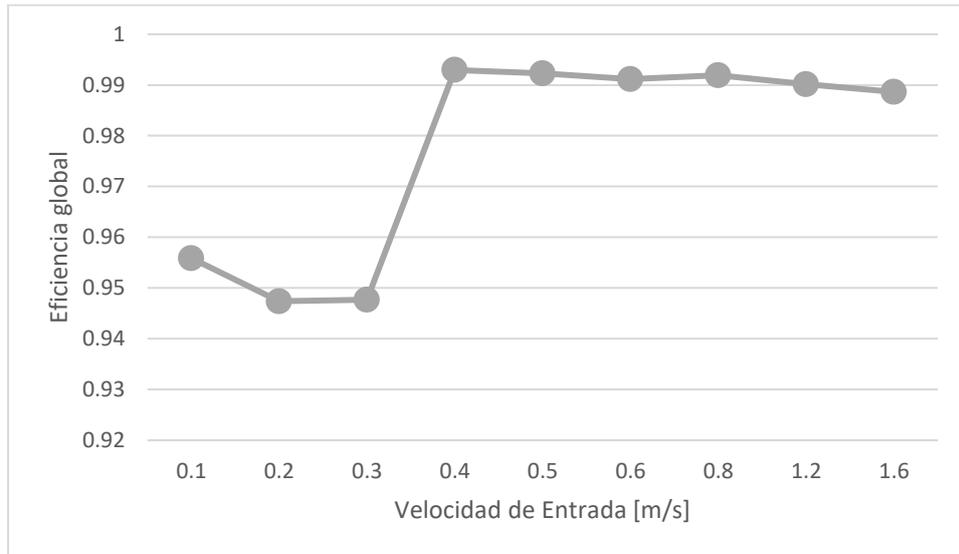


Figura 3.5 Eficiencia global de aletas vs velocidad de entrada del fluido

La eficiencia global representa la relación entre el calor máximo que podría transferir la aleta si esta tuviera la misma temperatura de la base a todo su largo, y, el calor que está siendo transferido, Por lo tanto, al acercarse a la unidad se aproxima el comportamiento a un caso ideal donde la aleta está siendo aprovechada en su totalidad.

De acuerdo con lo presentado en la Tabla 3.8, el coeficiente global de transferencia de calor aumenta a medida que la velocidad de entrada lo hace, es decir, tienen una relación directa. Una mayor cantidad de calor removido resulta en una temperatura de estabilización más baja, lo cual es concordante con lo obtenido a partir de las simulaciones.

Una explicación para que se dé este comportamiento es que, al aumentar la velocidad, incrementa la turbulencia y por consecuencia, la transferencia de calor por convección se eleva. Asimismo, a menor velocidades se reduce la turbulencia, de modo que más cerca se está de un comportamiento estático, lo cual se asemejaría a una transferencia de calor por conducción.

Tabla 3.8 Coeficiente global de transferencia de calor

Velocidad [m/s]	Tc [K]	Tout [K]	Tml [K]	U [W/m ² K]
0.1	305.413	302.606	3.96840401	86396.7333
0.4	302.363	300.055	2.33539206	146809.244
0.8	301.938	300.026	1.92497074	178110.314
1.2	301.637	300.018	1.62798342	210602.356
1.6	301.357	300.013	1.35048957	253876.187

3.3 Solución propuesta

En la Figura 3.6 se presenta la solución completa en tres escenarios distintos para facilitar su visualización: (a) Vista explotada, (b) base colocada en PCB, (c) ensamble. En la Figura 3.7 se muestra un acercamiento donde se encuentran ubicadas las aletas, (a) sin tapa y (b) con la tapa sobre la base.

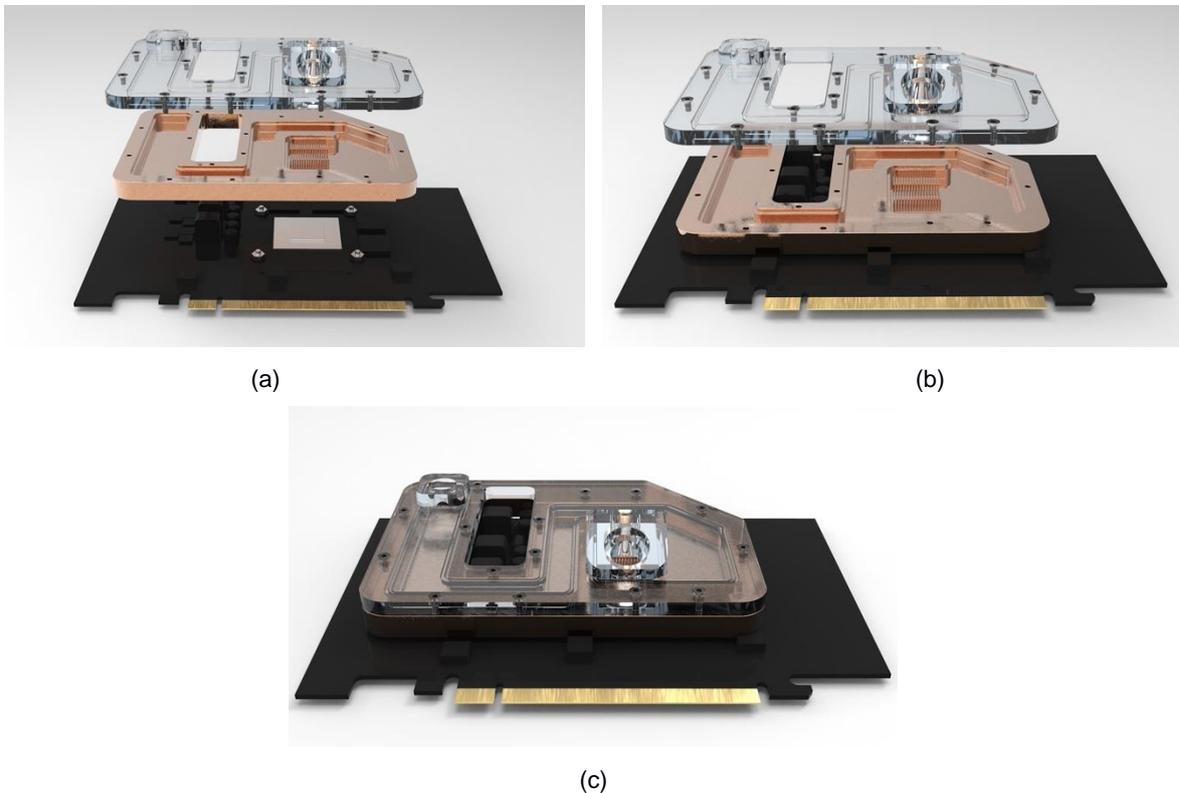


Figura 3.6 Solución propuesta. (a) Vista explotada (b) Base fijada a PCB (c) Solución ensamblada y fijada sobre la PCB.



Figura 3.7 Detalle aletas de solución propuesta. (a) Vista explotada (b) Solución ensamblada y fijada sobre la PCB.

Como solución a la estanqueidad, se diseñó la tapa de tal modo que una extrusión encajara en el conducto realizado en la base para la trayectoria del fluido. Adicionalmente, se incluyó un canal alrededor de la trayectoria a ser llenado con sellador líquido de curado térmico, eliminando la posibilidad de fugas del fluido refrigerante. En la sección Apéndices D se encuentran los planos detallados.

3.4 Análisis de costos

Se estimó el costo del trabajo ingenieril, lo cual incluye las horas de diseño y las simulaciones realizadas en los software ANSYS e Inventor. También se estimó el costo de fabricación, considerando los materiales, elementos estándar y las horas de manufactura.

Estas últimas fueron incluidas como precio referencial, ya que estos valores están sujetos a un acuerdo entre el cliente y el profesional a cargo. Los demás valores fueron obtenidos de proveedores locales con el fin de garantizar disponibilidad comercial.

Tabla 3.9 Costos estimados

Ítem	Cantidad	Costo unitario
Diseño	20	\$20.00
Simulaciones	1	\$300.00
Subtotal: costo de ingeniería		\$700.00
Bloque de cobre	1	\$17.90
Acrílico	1	\$1.60
Sellador líquido de curado térmico	1	\$2.00
Manufactura	3	\$40.00
Pernos allen M2x6	15	\$0.12
Pernos AS1427 M2.5x6	4	\$0.04
Tuercas AS1427 M2.5	4	\$0.06
Subtotal: costo de fabricación		\$143.70
Total		\$843.70

Si bien esto da como resultado total un costo de \$843.70, se desglosa en un \$700 como una inversión de una sola vez y \$143.70 como costo unitario estimado de fabricación, el cual está sujeto al volumen de producción, siendo inversamente proporcional a este. De modo que incrementando la cantidad de equipo fabricados el costo unitario de los mismos se vería reducido, aumentando el margen de ganancia.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Se diseñó un sistema de enfriamiento líquido para la tarjeta gráfica GeForce GTX 1650, haciendo usos de herramientas CAD y CFD, los softwares Inventor y ANSYS, respectivamente.
- Al emplear agua destilada en lugar de aire para el sistema de enfriamiento se obtiene una transferencia de calor más eficiente, además de reducir el nivel de ruido de operación, mejorando de esta manera las herramientas mecánicas aplicadas a electrónica.
- Tras evaluar distintos espesores de aleta para el intercambiador de calor se determinó que un arreglo de 2 columnas, con 17 aletas por columna, con 0.5mm de espesor cada aleta, resultaba en una mejor transferencia de calor, dando como consecuencia menores temperaturas para la GPU.
- Se encontró una eficiencia máxima de aletas para velocidades cercanas a 0.4 m/s por lo que se sugiere operar alrededor de estas condiciones con el fin de obtener la mayor transferencia de calor posible.
- Se determinó un costo unitario estimado de \$143.70. Al no haber sistemas de enfriamiento líquido para la tarjeta gráfica GeForce GTX 1650 en el mercado, se realizó una comparación con sistemas que responden a tarjetas gráficas de características similares y se encontró que estaban valorados desde \$185 a \$280, aproximadamente. A partir de lo cual se concluye que la solución general tiene potencial comercial.

4.2 Recomendaciones

- Con el fin de optimizar el uso de recursos computacionales se sugiere utilizar un tamaño de elemento mayor en ANSYS para las simulaciones

iniciales, donde el interés principal es identificar una tendencia.

- En base a las limitaciones que presenta la licencia estudiantil, se sugiere emplear ANSYS con esta licencia para estimar comportamientos, pero la licencia profesional para determinar valores específicos tales como la temperatura, ya que esta ofrece simulaciones más precisas.
- Al momento de generar el mallado para las simulaciones se sugiere revisar parámetros tales como la calidad y la oblicuidad para, comparando con la escala sugerida por ANSYS, se esté trabajando con la precisión deseada.
- Se recomienda reemplazar el fluido refrigerante por un nanofluido, al tener estos una mayor capacidad de remoción de calor que el agua destilada, aumentando el coeficiente global de transferencia de calor y la eficiencia general del proceso.
- En la base del sistema diseñado se señalaron unas regiones en las cuales se sugiere colocar cinta térmica doble faz para además de ayudar en la sujeción reduciendo posibilidad a vibraciones, otros componentes que emiten calor en la tarjeta puedan disiparlo de manera correcta.
- Como trabajo futuro se propone la fabricación de un prototipo para poder conducir pruebas experimentales y realizar una comparación teórico-práctica a fin de evaluar el diseño presentado como solución.
- En un estudio posterior se podría determinar la demanda de este tipo de soluciones computacionales para planificar producción con un eficiente manejo de los recursos y maximizar el margen de utilidad.

BIBLIOGRAFÍA

- Acton, A. (2013). *Light Metals—Advances in Research and Application*. Atlanta: ScholarlyEditions.
- Bairagi, V. (2012). *Liquid Cooled Cpu*. Lap Lambert Academic Publishing GmbH KG.
- Bandyopadhyay, A. (2019). *Hands-on GPU computing with Python: explore the capabilities of GPUs for solving high performance computational problems*. Mumbai: Packt Publishing.
- Bureau of Ships Navy Department. (1957). *Guide manual of cooling methods for electronic equipment*. Washington: U.S. Government Printing Office.
- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2020). *Heat and mass transfer fundamentals and applications*. New York, NY: McGraw-Hill Education.
- Cook, S. (2013). *CUDA programming: a developer's guide to parallel computing with GPUs*. Waltham: Elsevier.
- Jeng, L.-Y., & Teng, T.-P. (2013). Performance evaluation of a hybrid cooling system for electronic chips. *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 45, 155-162.
- Kole, M., & Dey, T. (2010). Thermal Conductivity and Viscosity of Distilled Water/Commercial Coolant Based Al₂O₃ Nanofluid. *Journal of Physics D: Applied Physics Volume 43*, 1-10.
- London Metal Exchange: Non-ferrous. (2021). Retrieved 17 January 2021, from <https://www.lme.com/Metals/Non-ferrous#tabIndex=0>
- Mesh Quality & Advanced Topics. (2015). Retrieved 23 January 2021, from http://200.19.248.10:8002/professores/mauro/Curso%20Ansys/Meshing_CD_16/lectures_trainee/Mesh-Intro_16.0_L07_Mesh_Quality_and_Advanced_Topics.pdf
- Murshed, S. M. S. (2016). Introductory Chapter: Electronics Cooling — An Overview. In *Electronics Cooling*. *InTech*. <https://doi.org/10.5772/63321>
- Pisacane, V. L. (2005). *Fundamentals of space systems*. New York: Oxford University Press.
- Platt, C., & Jansson, F. (2014). *Encyclopedia of Electronic Components Volume 2 Diodes, Transistors, Chips, Light, Heat, and Sound Emitters*. Sebastopol: O'Reilly & Associates.
- Woldamn, N. E., & Frick, J. P. (2000). *Woldman's engineering alloys*. Materials Park: ASM International.

Jimiao, C., Zhenshan, L., (2019) Water cooling system for GPU server with liquid leakage detection. *International Publication Number No. 2014135978A2*. Zhengzhou,China. World Intellectual Property Organization.

APÉNDICES

APÉNDICE A – MEMORIA DE CÁLCULOS

Tabla A.1 Cálculos de Eficiencia de Aletas

Velocidad	Tout	Tml	AF	Ab	AT	Aentrada	volumen específico	coef cond (k)	Cp	Flujo másico	h asumido	h calculado	error porcentual	Perímetro	m	Lc	nf	no
m/s	K	K	m ²	m ²	m ²		m ³ /kg	W/mK	J/kgK					m				
0.1	302.606	3.96840401	0.000002875	0.000191	0.00028875	0.00015708	0.001003	401	4179	0.01566098	155713.413	155713.413	2.78394E-07	0.0125	129.653676	0.00525	0.86966106	0.9558766
0.2	301.293165	3.21523711	0.000002875	0.000191	0.00028875	0.00015708	0.001003	401	4179	0.03132196	192445.25	192445.249	4.15104E-07	0.0125	144.136981	0.00525	0.84462037	0.94739962
0.3	300.68626	2.57532418	0.000002875	0.000191	0.00028875	0.00015708	0.001003	401	4179	0.04698294	191199.572	191199.571	6.20264E-07	0.0125	143.669732	0.00525	0.84544056	0.94767728
0.4	300.055	2.33539206	0.000002875	0.000191	0.00028875	0.00015708	0.001003	401	4179	0.06264392	21503.067	21503.0662	3.91528E-06	0.0125	48.1805804	0.00525	0.97920449	0.99296013
0.5	300.042	2.04184676	0.000002875	0.000191	0.00028875	0.00015708	0.001003	401	4179	0.0783049	23491.5	23491.4993	3.1592E-06	0.0125	50.3590117	0.00525	0.97733376	0.99232684
0.6	300.038	1.92615305	0.000002875	0.000191	0.00028875	0.00015708	0.001003	401	4179	0.09396588	27067.88	27067.8793	2.62988E-06	0.0125	54.0566272	0.00525	0.97399064	0.9911951
0.8	300.026	1.92497074	0.000002875	0.000191	0.00028875	0.00015708	0.001003	401	4179	0.12528784	24689.96	24689.9526	3.00086E-05	0.0125	51.6276096	0.00525	0.97621039	0.99194655
1.2	300.018	1.62798342	0.000002875	0.000191	0.00028875	0.00015708	0.001003	401	4179	0.18793176	30371.67	30371.6685	4.79055E-06	0.0125	57.260635	0.00525	0.97092671	0.99015787
1.6	300.013	1.35048957	0.000002875	0.000191	0.00028875	0.00015708	0.001003	401	4179	0.25057569	35311.11	35311.1023	2.17444E-05	0.0125	61.7415472	0.00525	0.96638896	0.98862172

APÉNDICE B – MEMORIA DE SIMULACIONES

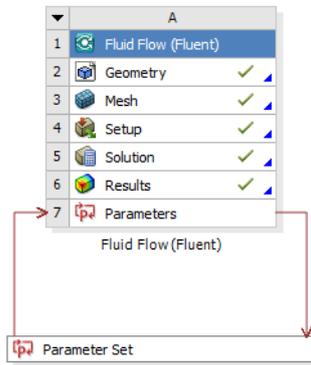


Figura B.1 Esquema de trabajo ANSYS Fluent.

Details of "Body Sizing" - Sizing	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	2 Bodies
Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input type="checkbox"/> Element Size	1.e-003 m
Advanced	
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default (3.3831e-005 m)
Behavior	Soft
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1.2)
Capture Curvature	No
Capture Proximity	No

Figura B.2 Primer mallado asociado entre pasta térmica y gpu, tamaño seleccionado 0.001

Details of "Body Sizing 2" - Sizing	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	2 Bodies
Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input type="checkbox"/> Element Size	5.e-004 m
Advanced	
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default (3.3831e-005 m)
Behavior	Soft
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1.2)
Capture Curvature	No
Capture Proximity	No

Figura B.3 Segundo mallado asociado entre flujo de agua y disipador, tamaño seleccionado 0.0005

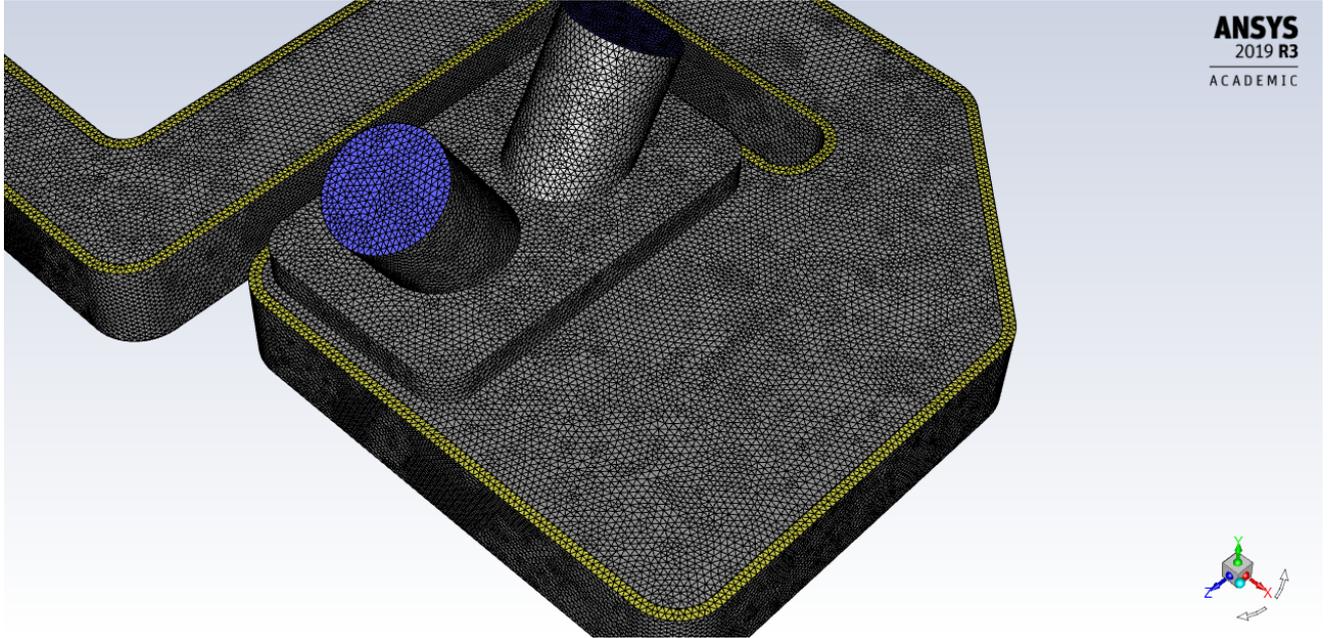


Figura B.4 Mallado general

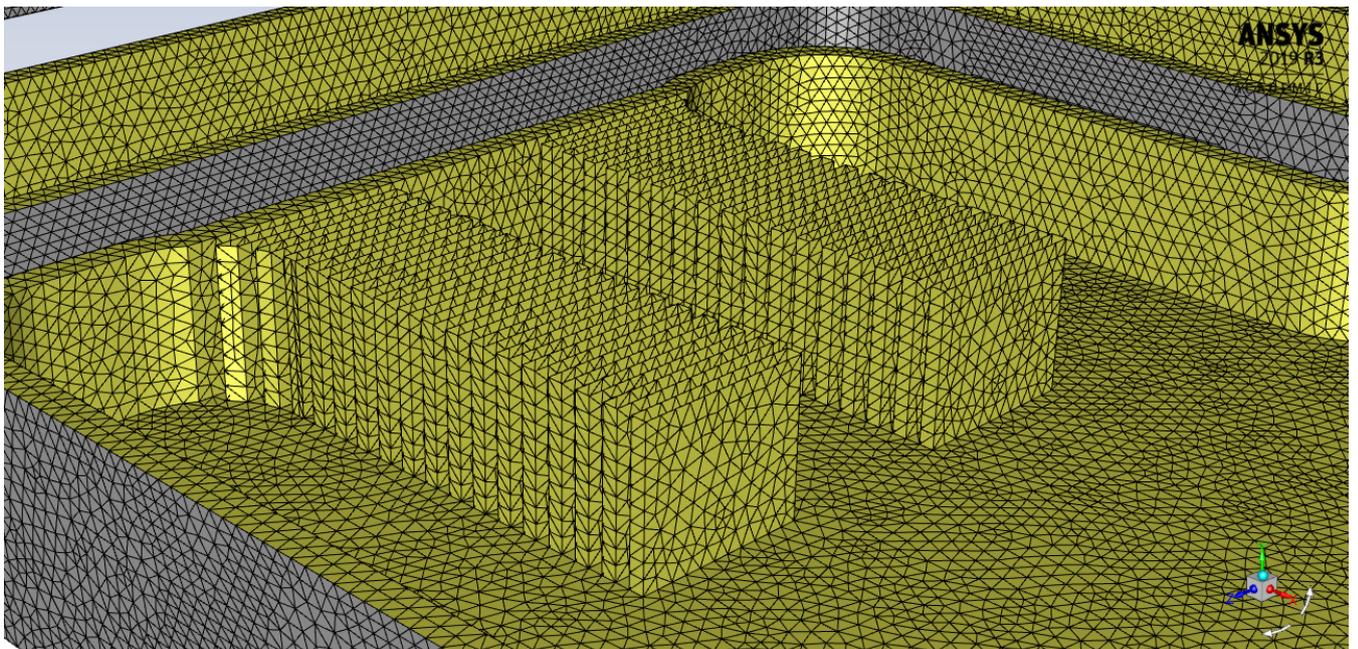


Figura B.5 Mallado para el disipador

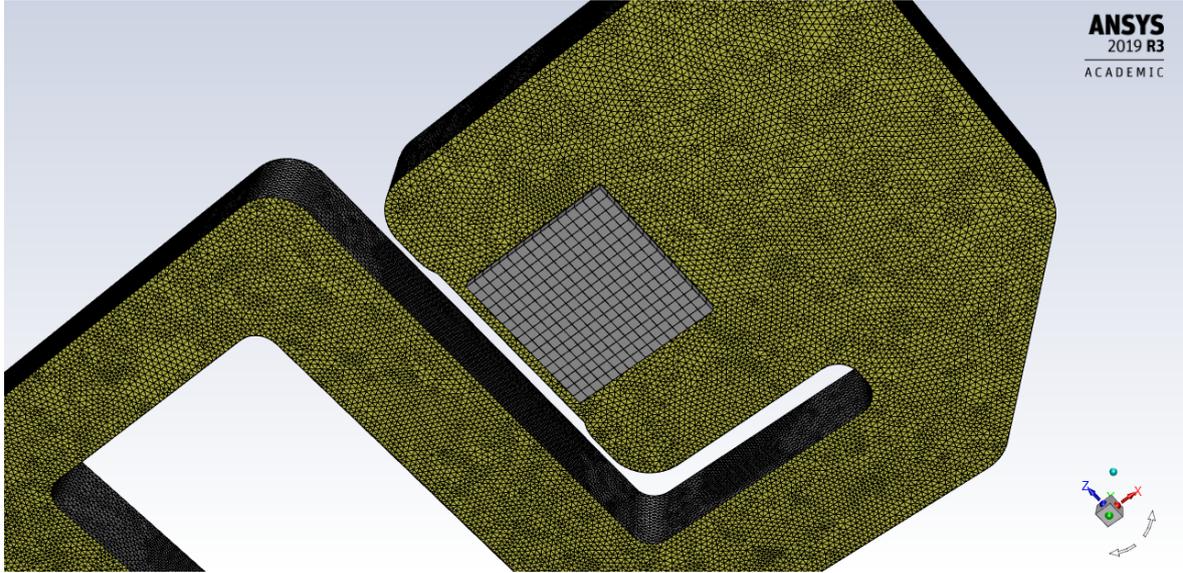


Figura B.6 Mallado para GPU

Details of "Mesh"	
[-] Display	
Display Style	Use Geometry Setting
[-] Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Element Order	Linear
<input type="checkbox"/> Element Size	Default (6.7662e-003 m)
Export Format	Standard
Export Preview Surface Mesh	No
[+] Sizing	
[+] Quality	
[+] Inflation	
[+] Assembly Meshing	
[+] Advanced	
[-] Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	563671
<input type="checkbox"/> Elements	2939686

Figura B.7 Información del mallado general. Número de elementos: 2939686 y nodos: 563671

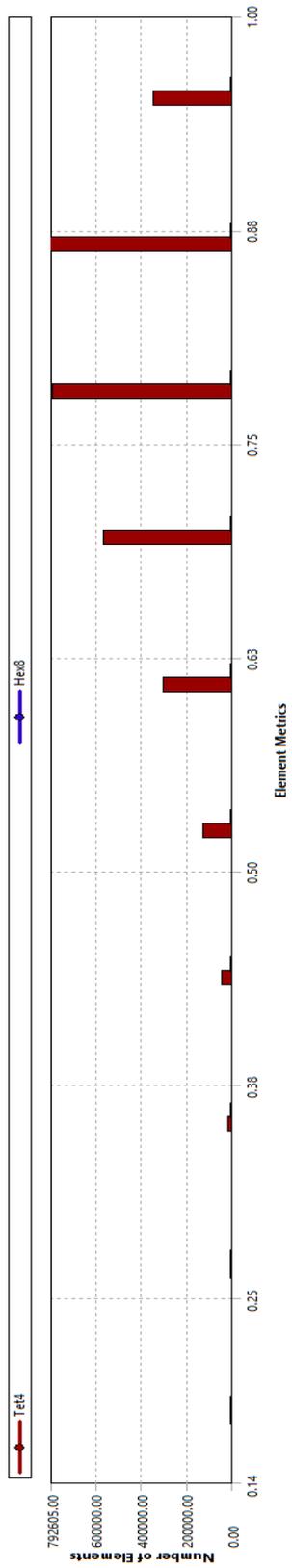


Figura B.8 Gráfica de calidad de mallado fino

Details of "Mesh" ▼ ↑ □	
Solver Preference	Fluent
Element Order	Linear
<input type="checkbox"/> Element Size	Default (6.7662e-003 m)
Export Format	Standard
Export Preview Surface Mesh	No
+ Sizing	
- Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0.900000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Orthogonal Quality
<input type="checkbox"/> Min	0.14184
<input type="checkbox"/> Max	1.
<input type="checkbox"/> Average	0.77762
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0.11858

Figura B.9 Información de la calidad del mallado

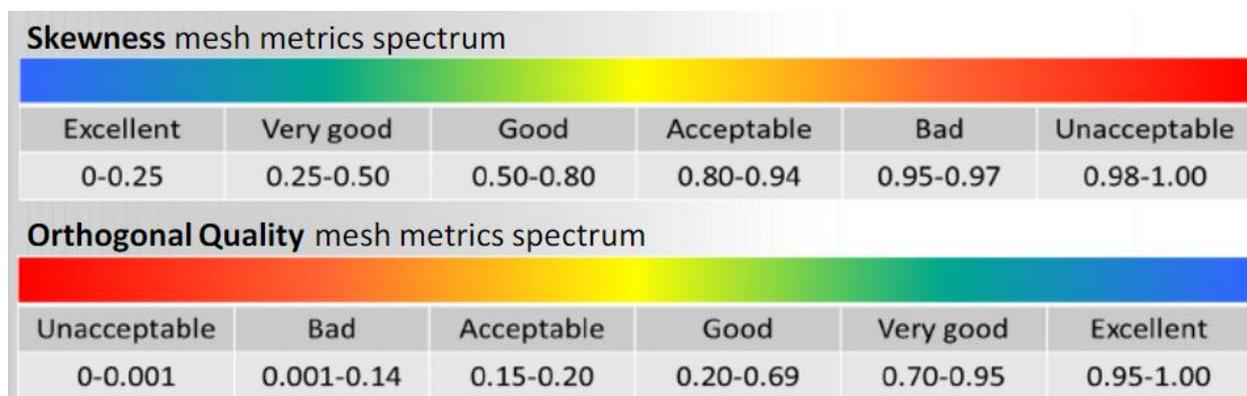


Figura B.10 Espectro de calidad del mallado
("Mesh Quality & Advanced Topics", 2015)

En base a la referencia mostrada en la Figura B.10, el mallado que se generó, presentado en la Figura B.9, entra en la categoría de "Muy Bueno". Adicionalmente, se obtuvo una medida de oblicuidad de 0.22 lo cual entra en el rango de excelente. Por ende, los resultados obtenidos son fiables al representar un fenómeno real.

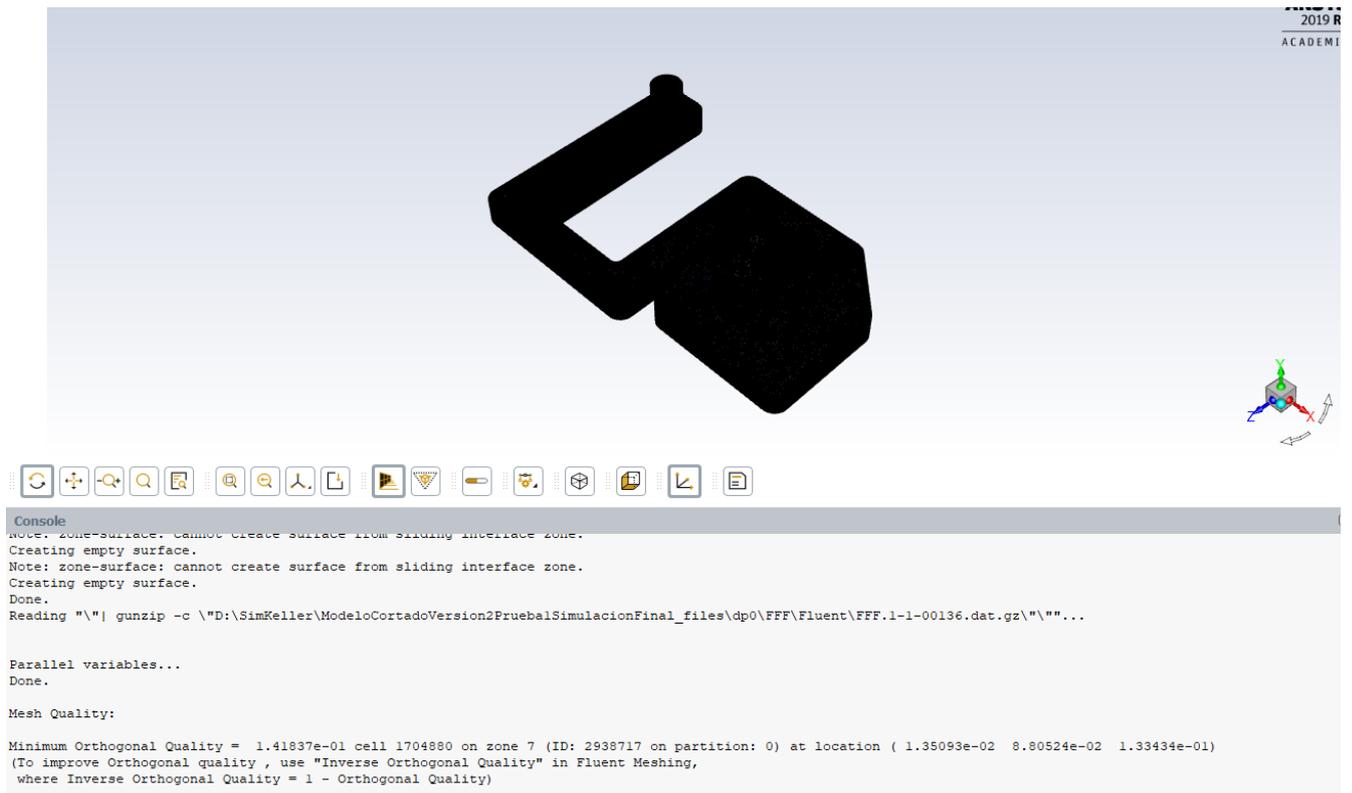


Figura B.11 Reporte de la calidad del mallado. Etapa Setup.

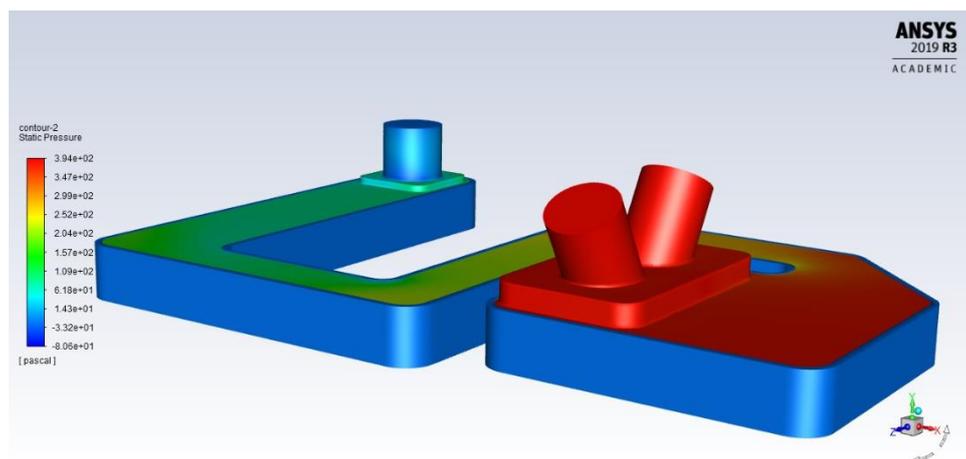


Figura B.12 Distribución de presión.

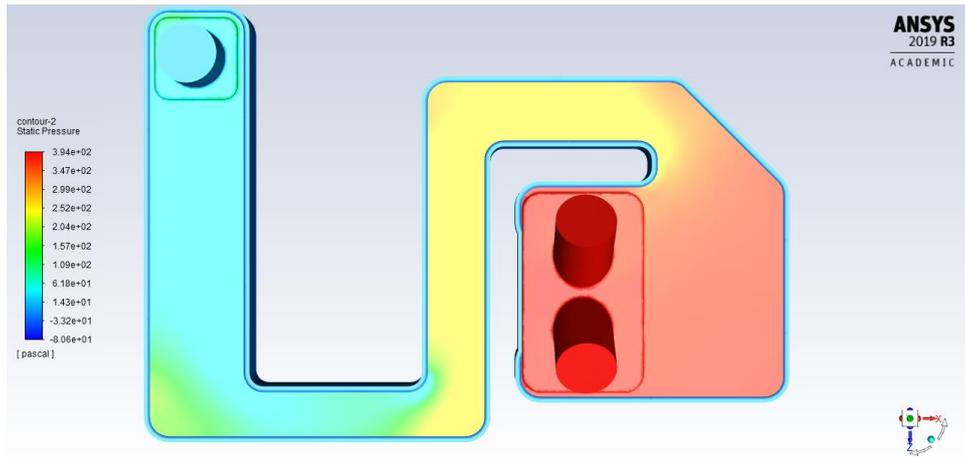


Figura B.13 Distribución de presión. Vista superior

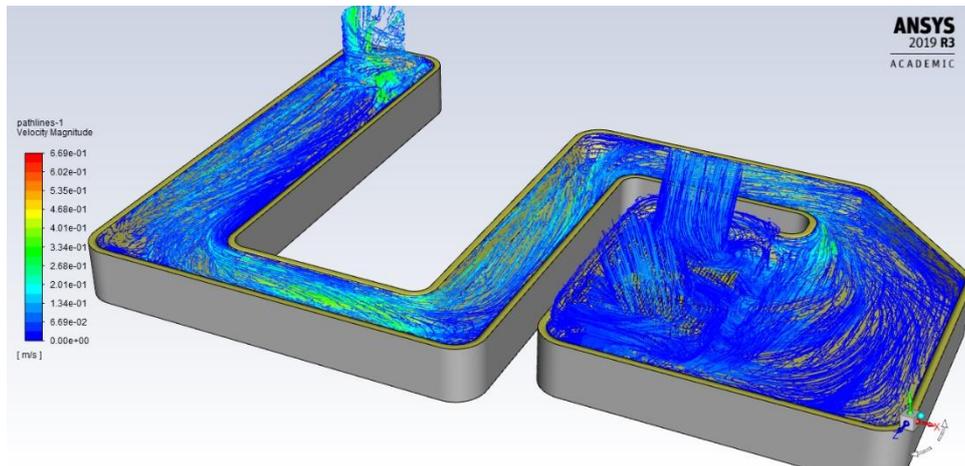


Figura B.14 Líneas de flujo.

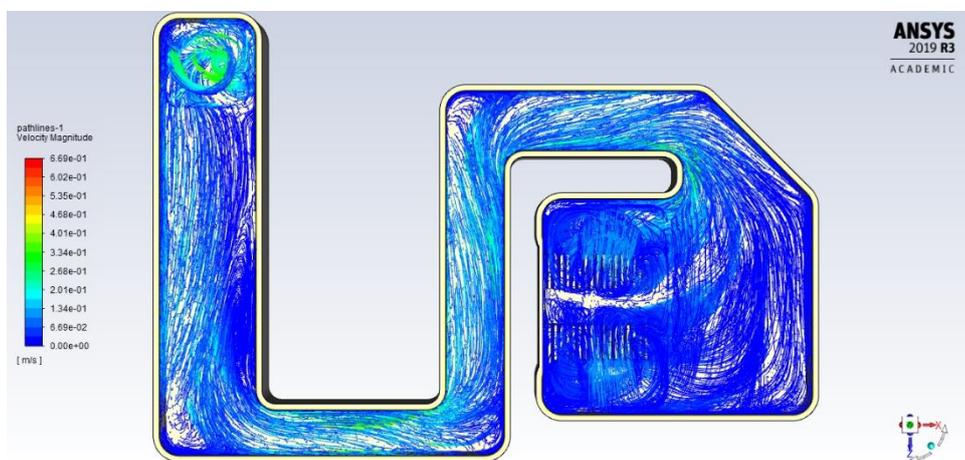
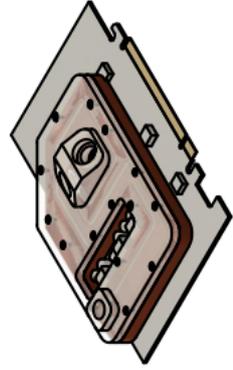
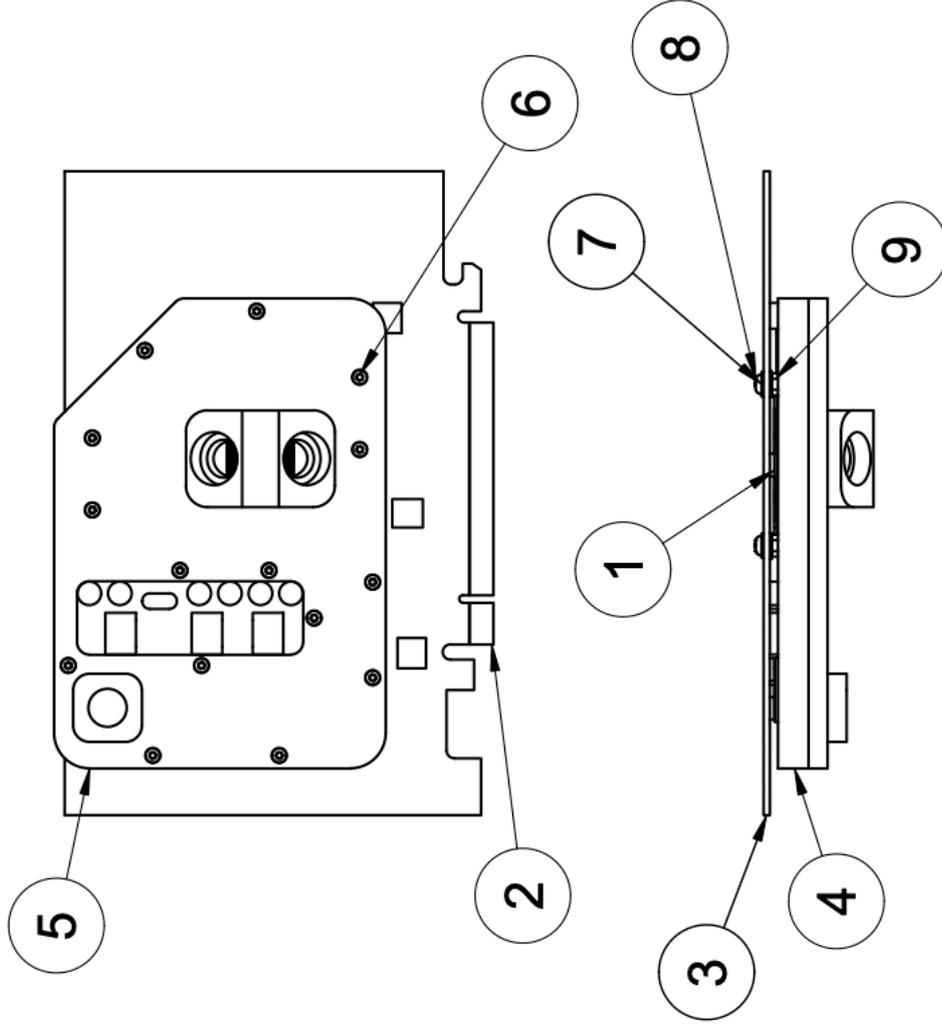


Figura B.15 Líneas de flujo. Vista superior.

APÉNDICE C– PLANOS

Parts List

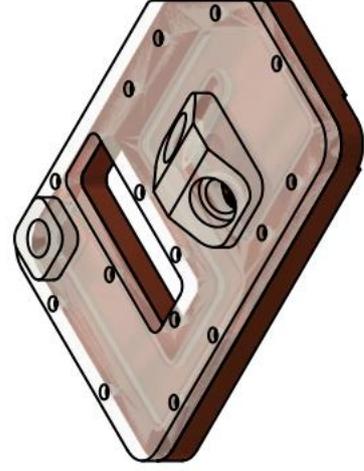
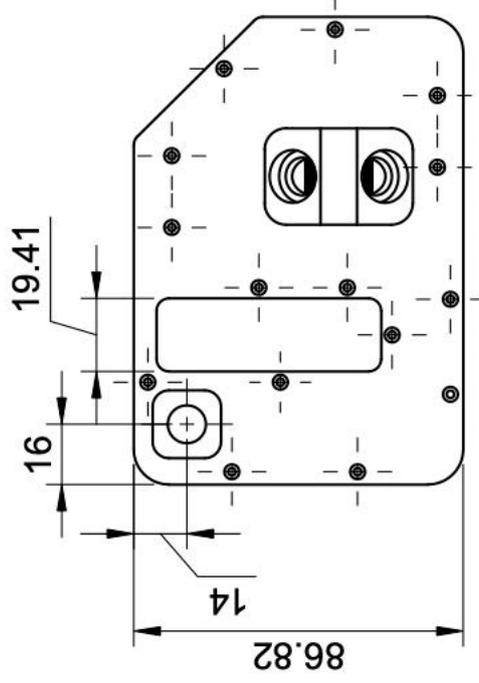
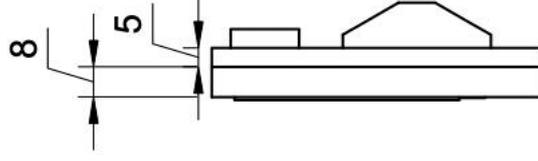
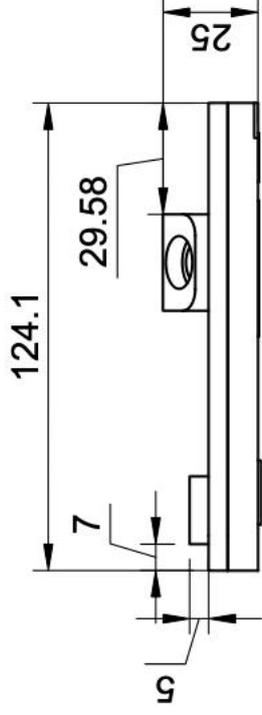
Item	Qty	Part Number	Material
1	1	GPU	Steel
2	1	Slot	Steel
3	1	PCB	Steel
4	1	Base	Copper
5	1	Tapa	Polycarbonate, Clear
6	15	M2x6	Steel, Mild
7	4	AS 1237 - 2,5 mm Aluminium-6061	Aluminum 6061
8	4	AS 1427 - M2,5 x 6	Steel, Mild
9	4	BS 4183 - M2,5	Steel, Mild



(1:4)

Technical reference 1:2 A4	Created by Paulina Arnés Urgellés Keller Eduardo Herrera Astudillo	Approved by Galo Durazno Palacios Jorge Silva León
Title Sistema de Enfriamiento GPU Lista de Partes		Faculty FIMCP
Date of issue 18.01.2021		Sheet 1/5

Rosca mangueras: $G\frac{1}{4}$
 Rosca pernos superiores: M2x6
 Rosca pernos inferiores: M2.5x6



Technical reference

1:2 A4

Created by

Paulina Arnés Urgellés
 Keller Eduardo Herrera Astudillo

Approved by

Galo Durazno Palacios
 Jorge Silva León

Title

Sistema de Enfriamiento GPU
 Ensamble

Faculty

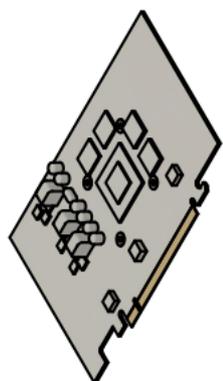
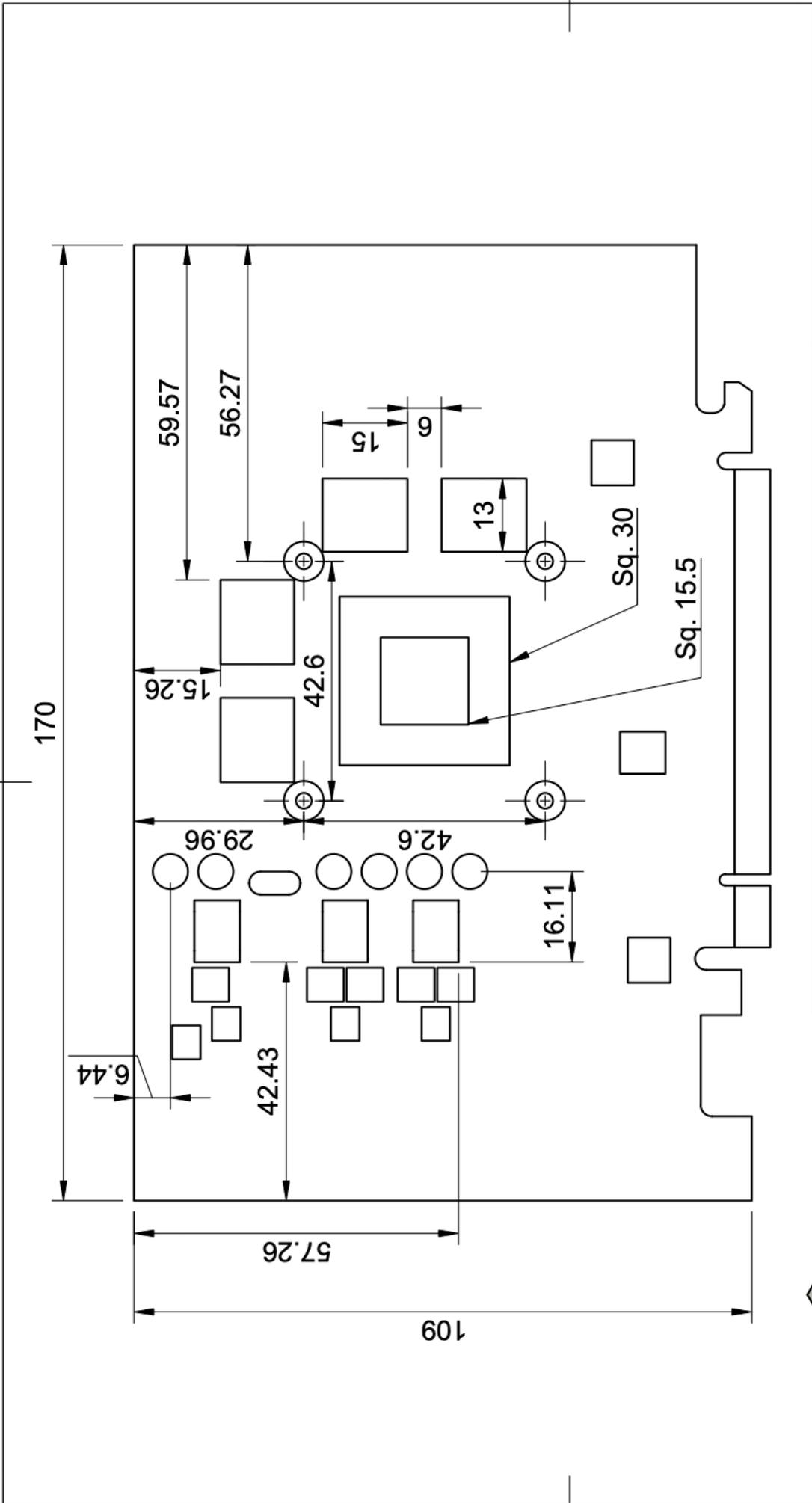
FIMCP

Date of issue

18.01.2021

Sheet

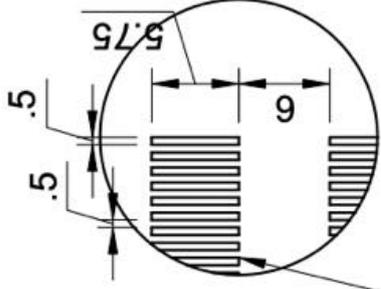
2/5



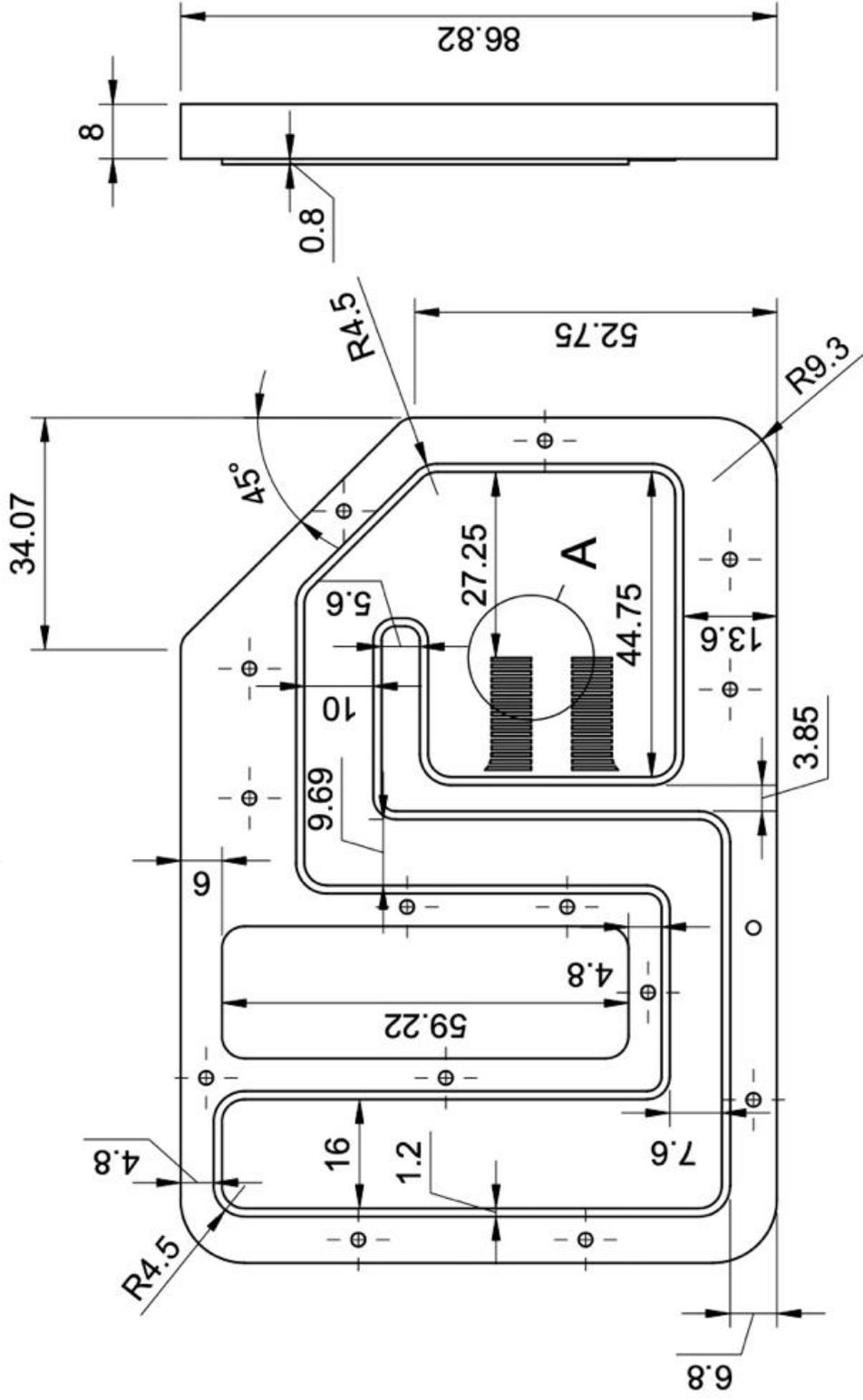
Technical reference 1:1	A4	Created by Paulina Arnés Urgellés Keller Eduardo Herrera Astudillo	Approved by Galo Durazno Palacios Jorge Silva León
		Title Sistema de Enfriamiento GPU PCB	Faculty FIMCP
			Date of issue 18.01.2021
			Sheet 3/5

Redondeos R3.3

A (2:1)



17 aletas por fila
Altura: 5mm



(1:4)

Technical reference

1:1 A4

Created by

Paulina Arnés Urgellés
Keller Eduardo Herrera Astudillo

Title

espol
Sistema de Enfriamiento GPU
Base

Approved by

Galo Durazno Palacios
Jorge Silva León

Faculty

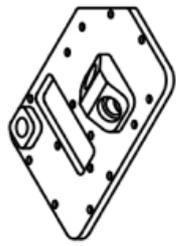
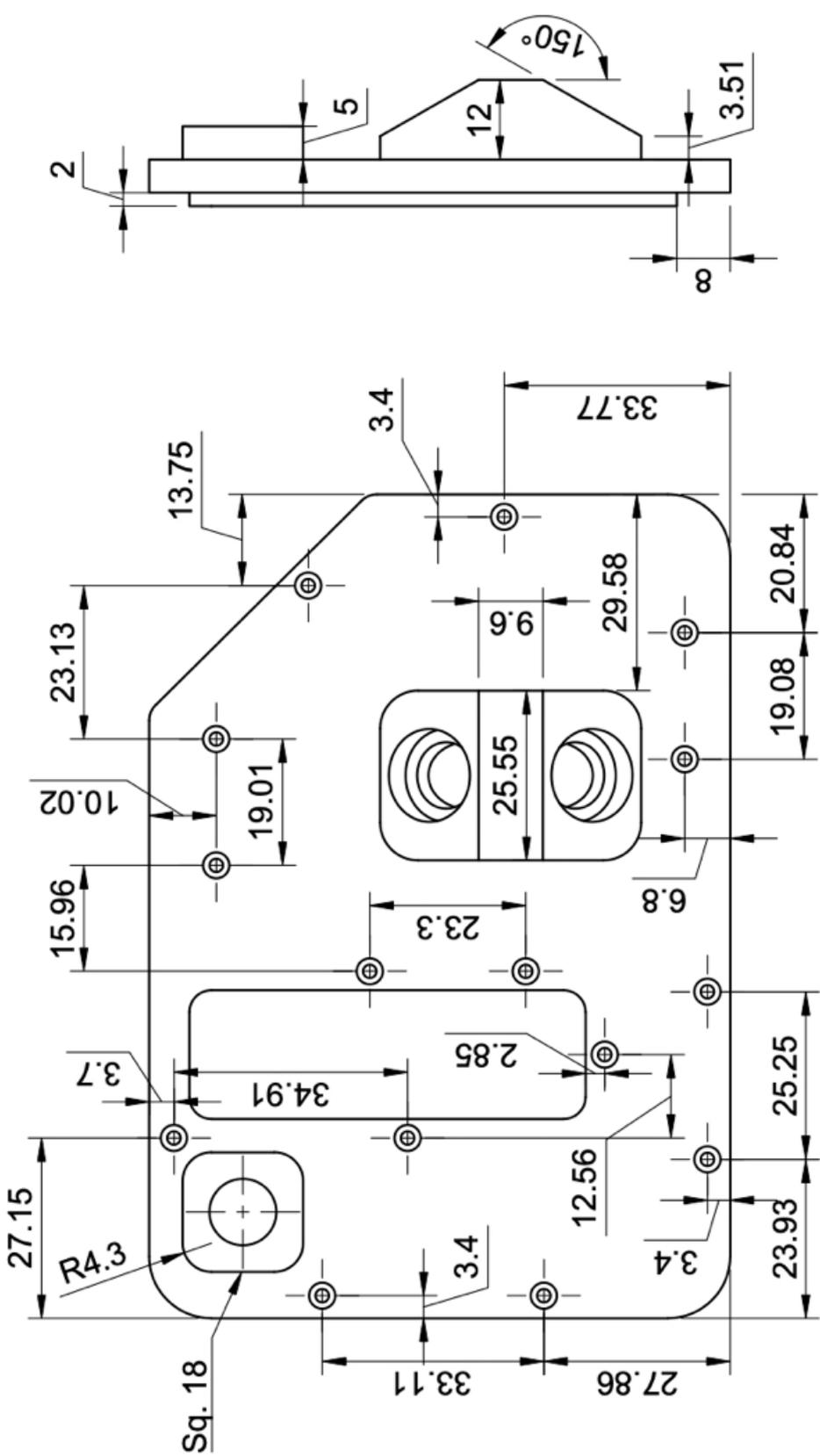
FIMCP

Date of issue

18.01.2021

Sheet

4/5



(1:4)

Technical reference 1:1 A4	Created by Paulina Arnés Urgellés Keller Eduardo Herrera Astudillo	Approved by Galo Durazno Palacios Jorge Silva León
Title Sistema de Enfriamiento GPU Tapa		Faculty FIMCP
		Date of issue 18.01.2021
		Sheet 5/5