

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Modelado y simulación de una unidad de control térmico para sistemas electrónicos empleando materiales de cambio de fase y potenciadores de conductividad térmica

Proyecto de graduación sometido a consideración de la Escuela de Ingeniería Química como requisito final para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Química

Erick Manuel Bolaños Jiménez

*Ciudad Universitaria Rodrigo facio
San José, Costa Rica
2020*


Proyecto de Graduación presentado ante la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica como requisito final para optar al grado de Licenciado en Ingeniería Química.

Sustentante:

Erick Manuel Bolaños Jiménez


COMITÉ ASESOR

Aprobado por:




M.Sc. Adolfo Ulate Brenes
Escuela de Ingeniería Química

Presidente del tribunal examinador



PhD. Natalia Hernández Montero
Escuela de Ingeniería Química

Directora del proyecto



Dr. rer. nat. Oscar Andrey Herrera Sancho
Escuela de Física

Lector del proyecto



PhD. Alfredo López Calvo
Escuela de Ingeniería Química

Lector del proyecto



Lic. Esteban Richmond Salazar
Escuela de Ingeniería Química

Lector de objetivos

Derechos de propiedad intelectual

El presente trabajo se basa, emplea y presenta información confidencial de Componentes Intel de Costa Rica proporcionada, sugerida y recomendada por el departamento de Diseño de Sistemas Termo-Mecánicos con todos los permisos pertinentes. Toda información sensible es presentada de forma normalizada, o en intervalos significativos, con el fin de evitar su divulgación a terceros.

Se utiliza el programa de diseño AutoDesk AutoCAD[®] 2018 bajo las debidas licencias estudiantiles facilitadas a la Universidad de Costa Rica.

Para el modelado y simulación se emplea COMSOL Multiphysics[®] 5.1 a través de las licencias adquiridas por la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica.

A mis padres, por enseñarme el amor por el conocimiento, a cuestionar todo y a
siempre reírme de la adversidad.

La gota perfora la roca, no por su fuerza, sino por su constancia

- Ovidio

Reconocimientos

Debo agradecimientos al departamento de Diseño de Sistemas termo-mecánicos de Intel Costa Rica por plantear el problema a resolver, proporcionar información sin la cual el trabajo no habría sido posible y guiarme al encontrar problemas complicados.

Las simulaciones presentes no habrían sido posibles sin la capacidad computacional del clúster de computadoras del Centro de Investigación en Ciencia e Ingeniería de Materiales (CICIMA) de la Universidad de Costa Rica. Me encuentro cordialmente agradecido con el Dr. Esteban Avendaño Soto por permitirme el empleo de este esencial recurso y el Dr. Federico Muñoz por ayudarme con la instalación del programa y el uso del sistema.

Especial agradecimiento a mi profesora tutora Natalia por creer en mí, dedicarme tanta paciencia, escucharme balbucear conceptos e ideas y ayudarme a ver los problemas de formas distintas. Al profesor Alfredo por tan imprescindible guía y especial disposición para ayudarme. Al profesor Andrey por incluirme en su viaje por el mundo de la ciencia y la investigación.

Agradezco con todo el corazón a Dani, por brindarme su apoyo y ánimos en este, no tan corto, proyecto. A mis amigos por estar siempre atentos sobre mis avances, aunque les cancelara tantos planes los fines de semana.

Por último, el más importante de los agradecimientos. A mi madre, padre, hermanas y hermano por existir, por brindar felicidad y amor a mis días y por siempre estar cuando los necesito.

Índice general

	Página
Aprobación	III
Derechos de propiedad intelectual	V
Dedicatoria	VII
Prefacio	IX
Reconocimientos	XI
Índice general	XVII
Índice de figuras	XXIII
Índice de cuadros	XXIX
Nomenclatura	XXXIV
Resumen	XXXV
1 Introducción	1
1.1 Justificación y antecedentes	1
1.2 Objetivo general	4
1.3 Objetivos específicos	4

2 Marco Teórico	7
2.1 Unidades de control térmico en sistemas electrónicos	7
2.1.1 Consideraciones de un sistema de control térmico	8
2.1.2 Métodos pasivos para control térmico	9
2.1.3 Métodos activos para control térmico	13
2.2 Materiales de cambio de fase	15
2.2.1 Clasificación de los materiales de cambio de fase	17
2.2.2 Potenciadores de conductividad térmica	21
2.3 Simulación computacional de sistemas físicos	22
2.3.1 Modelos, modelado y simulación	22
2.3.2 Método de elementos finitos	23
3 Metodología	25
3.1 Construcción tridimensional del sistema de trabajo	26
3.1.1 Mapas bidimensionales	27
3.1.2 Sólidos en tres dimensiones	29
3.1.3 Bloque de material de cambio de fase	31
3.2 Simulación del sistema en estado estacionario	31
3.2.1 Modelos de prueba	33
3.3 Verificación del modelo	34
3.3.1 Análisis de sensibilidad de diferentes parámetros del sistema . .	34
3.3.2 Análisis de sensibilidad del mallado	35
3.4 Validación del modelo	37
3.4.1 Determinación del estado más cercano a la realidad	37
3.5 Simulación del sistema en estado dinámico	38
3.5.1 Configuración	39
3.5.2 Selección de materiales	40
3.5.3 Simulación del sistema con varios picos de potencia	41

3.5.4	Cambio de paradigma	42
4	Diseño tridimensional del sistema de trabajo	45
4.1	Sistema sin PCM	48
4.2	Sistemas con material de cambio de fase en sus diferentes configuraciones	57
4.2.1	Sistema con PCM a los alrededores del CPU	58
4.2.2	Sistema con PCM bajo la unidad de control térmico	60
4.2.3	Sistema con PCM sobre la unidad de control térmico	62
4.3	Recapitulación	64
5	Simulación en estado estacionario	67
5.1	Configuración de la estructura de simulación para el sistema en estado estacionario	68
5.1.1	Definiciones globales	68
5.1.2	Componente	69
5.1.3	Estudio	90
5.1.4	Presentación de resultados	92
5.2	Modelado del enfriamiento convectivo	93
5.2.1	Configuración del sistema de disipación de calor por flujo de aire	94
5.2.2	Selección del modelo de turbulencia	99
5.2.3	Reemplazo del modelo de enfriamiento convectivo	103
5.3	Verificación del modelo final	104
5.3.1	Efecto de parámetros en el modelo	105
5.3.2	Análisis de sensibilidad del mallado	112
5.4	Validación del modelo en estado estacionario	114
5.5	Recapitulación	117
6	Simulación del sistema en estado dinámico	119
6.1	Modelado	120

6.1.1	Definiciones Globales	120
6.1.2	Componentes	120
6.1.3	Estudio	125
6.1.4	Presentación de resultados	126
6.2	Selección de materiales de cambio de fase	127
6.2.1	Características de las zonas adecuadas para colocación del PCM	128
6.2.2	Materiales de cambio de fase seleccionados	131
6.3	Simulación del sistema con varios picos de potencia	135
6.3.1	Algoritmo de resolución	135
6.3.2	Simulación en estado dinámico con tres PCMs	136
6.3.3	Soluciones y cambios de configuración derivados de los modelos con varios ciclos de potencia	139
6.4	Recapitulación	140
7	Cambio de paradigma	143
7.1	Cambios en la configuración	145
7.2	Temperatura de fusión y ubicación óptima para el PCM en el sistema de estudio	145
7.2.1	Determinación de la temperatura de fusión óptima	146
7.3	Efecto de la variación en las propiedades del PCM	161
7.3.1	Efecto de la conductividad térmica	161
7.3.2	Efecto de la capacidad calorífica, la densidad y la entalpía de fusión	164
7.3.3	Efecto del intervalo de temperatura de cambio de fase	165
7.4	Método para la selección de un material de cambio de fase en un sistema de control térmico	169
7.4.1	Pruebas con un PCM seleccionado	171
7.5	Recapitulación	173

8 Conclusiones y recomendaciones	175
8.1 Conclusiones	175
8.2 Recomendaciones	177
9 Apéndices	179
A.1 Cuadro de resultados	179
A.2 Muestra de cálculo	202
A.2.1 Cálculo del flujo de aire en los disipadores de calor	202
A.2.2 Cálculo de la velocidad del aire en los disipadores de calor . . .	202
A.2.3 Aproximación del coeficiente convectivo de transferencia de calor	203

Índice de figuras

	Página
Figura 2.1.1 Efecto de la temperatura en la tasa de falla del componente .	8
Figura 2.1.2 Esquema de un tubo de calor	12
Figura 2.2.3 Clasificación de los materiales de cambio de fase	17
Figura 3.1.1 Dimensiones en los ejes x y y del soporte de los procesadores	27
Figura 3.1.2 Dimensiones en los ejes x y y de los procesadores	28
Figura 4.0.1 Vista superior en transparencia de la geometría del modelo diseñada en AutoCAD [®]	47
Figura 4.1.2 Dimensiones de los procesadores y sus respectivos substratos para el modelo final.	49
Figura 4.1.3 Dimensiones de los propagadores de calor sobre los procesado- res para el modelo final.	50
Figura 4.1.4 Dimensiones del propagador de calor sobre el GPU para el modelo final.	51
Figura 4.1.5 Dimensiones del propagador de calor sobre el CPU para el modelo final.	51
Figura 4.1.6 Dimensiones de los soportes de los propagadores de calor, vista inferior.	52
Figura 4.1.7 Dimensiones del sistema activo de control térmico para el mo- delo final.	53

Figura 4.1.8 Dimensiones del sistema activo de control térmico para el modelo final.	53
Figura 4.1.9 Dimensiones de las aletas del sistema activo de control térmico para el modelo final.	54
Figura 4.1.10 Vista inferior de la tarjeta madre para el modelo final.	55
Figura 4.1.11 Vista superior de la tarjeta madre para el modelo final.	56
Figura 4.1.12 Dimensiones de los chips y resistencias variables cercanas a los procesadores en el modelo final.	57
Figura 4.2.13 Vista superior del sistema con PCM a los alrededores del CPU, menor volumen.	59
Figura 4.2.14 Vista frontal del sistema con PCM a los alrededores del CPU, menor volumen.	59
Figura 4.2.15 Vista superior del sistema con PCM a los alrededores del CPU, mayor volumen.	60
Figura 4.2.16 Vista frontal del sistema con PCM a los alrededores del CPU, mayor volumen.	60
Figura 4.2.17 Vista superior del sistema con PCM bajo la unidad de control térmico, menor volumen.	61
Figura 4.2.18 Vista frontal del sistema con PCM bajo la unidad de control térmico, menor volumen.	61
Figura 4.2.19 Vista frontal del sistema con PCM bajo la unidad de control térmico, mayor volumen.	62
Figura 4.2.20 Vista superior del sistema con PCM sobre la unidad de control térmico, menor volumen.	63
Figura 4.2.21 Vista frontal del sistema con PCM sobre la unidad de control térmico, menor volumen.	63

Figura 4.2.22 Vista frontal del sistema con PCM sobre la unidad de control térmico, mayor volumen.	64
Figura 5.1.1 Secciones del constructor del modelo para la simulación del estado estacionario en COMSOL	69
Figura 5.1.2 Módulo de <i>Selecciones</i> para la simulación del estado estacionario en COMSOL	74
Figura 5.1.3 Módulo de <i>Acoplamientos de componentes</i> para la simulación del estado estacionario en COMSOL	76
Figura 5.1.4 Física de transferencia de calor y submódulos para la simulación del estado estacionario en COMSOL	80
Figura 5.1.5 Modulo de mallado para la simulación del estado estacionario en COMSOL	85
Figura 5.1.6 Modulo de estudio para la simulación del estado estacionario en COMSOL	91
Figura 5.2.7 Variación en la extracción de calor producto de la cantidad de capas de frontera y el mallado para una aleta simple.	100
Figura 5.2.8 Variación en la extracción de calor producto de la presencia de capas de frontera y el modelo de turbulencia para una aleta simple.	101
Figura 5.2.9 Variación en la extracción de calor producto del mallado para una aleta simple sin capas de frontera.	102
Figura 5.3.10 Efecto de la conductividad térmica de los tubos de calor, el vapor y la tarjeta madre sobre la temperatura del CPU.	107
Figura 5.3.11 Efecto de la conductividad térmica del TIM y la resistencia a la evaporación sobre la temperatura del CPU.	108
Figura 5.3.12 Efecto de los coeficientes convectivos de transferencia de calor en las aletas y el sistema sobre la temperatura del CPU.	109

Figura 5.3.13 Efecto de la potencia de los procesadores sobre la temperatura del CPU.	111
Figura 5.3.14 Efecto de la potencia de las resistencias variables sobre la temperatura del CPU.	112
Figura 6.2.1 Curvas de temperatura para varios puntos del sistema en estado dinámico sin PCM.	129
Figura 6.3.2 Curva de prueba de dos distintos algoritmos de resolución con varios diferencias de tiempo para el estado dinámico.	136
Figura 6.3.3 Curva de calentamiento del CPU con PCM alrededor del CPU para los tres PCMs.	137
Figura 7.2.1 Perfiles de temperatura para un ciclo de potencia de 125 % sin PCM para las superficies cercanas al CPU.	148
Figura 7.2.2 Perfiles de temperatura del CPU dependientes de la temperatura media de fusión del PCM idóneo en los alrededores del CPU. . .	149
Figura 7.2.3 Perfiles de temperatura para un ciclo de potencia de 125 % sin PCM para las zonas bajo el TCU.	151
Figura 7.2.4 Perfiles de temperatura del CPU dependientes de la temperatura media de fusión del PCM idóneo bajo la TCU.	152
Figura 7.2.5 Perfiles de temperatura para un ciclo de potencia de 125 % sin PCM para las zonas sobre el TCU.	154
Figura 7.2.6 Perfiles de temperatura del CPU dependientes de la temperatura media de fusión del PCM idóneo sobre el TCU.	156
Figura 7.2.7 Perfiles de temperatura del CPU dependientes de la temperatura media de fusión del PCM idóneo en los alrededores del CPU a una potencia de 1.5 veces TDP.	159

Figura 7.3.8	Perfiles de temperatura del CPU dependientes de la conductividad térmica del PCM idóneo.	162
Figura 7.3.9	Perfiles de temperatura del CPU dependientes de la capacidad calórica del PCM idóneo.	164
Figura 7.3.10	Perfiles de temperatura del CPU dependientes de la densidad del PCM idóneo.	166
Figura 7.3.11	Perfiles de temperatura del CPU dependientes de la entalpía de fusión del PCM idóneo.	167
Figura 7.3.12	Perfiles de temperatura del CPU dependientes de la temperatura inicial de fusión del PCM idóneo.	168
Figura 7.3.13	Perfiles de temperatura del CPU dependientes del rango de fusión del PCM idóneo.	169
Figura 7.4.14	Perfil de temperatura del CPU para un material con temperatura de fusión cercana a la óptima para el PCM en los alrededores del CPU.	172

Índice de cuadros

	Página
Cuadro 2.2.1 Punto de fusión y calor latente de fusión de las parafinas con respecto al número de átomos de carbono	18
Cuadro 2.2.2 Selección de materiales inorgánicos investigados para su uso como PCM.	20
Cuadro 3.1.1 Coordenadas para los puntos especificados en la Figura 3.1.2 .	28
Cuadro 3.1.2 Dimensiones en el eje z de diversos componentes del sistema.	29
Cuadro 3.1.3 Dimensiones de las aletas de los disipadores de calor.	30
Cuadro 3.4.1 Variables asignadas a los puntos de interés en estado estacionario en potencia TDP.	38
Cuadro 5.1.1 Parámetros de sistema del modelo en estado estacionario.	70
Cuadro 5.1.2 Parámetros de propiedades de los materiales del modelo en estado estacionario.	71
Cuadro 5.1.3 Variables del modelo en estado estacionario.	76
Cuadro 5.3.1 Variación de la temperatura de los procesadores con respecto a la finura del mallado.	113
Cuadro 5.4.1 Resultados de los puntos del sistema requeridos para la validación del modelo en estado estacionario.	115
Cuadro 5.4.2 Temperatura obtenida para varias zonas de interés en la simulación en estado estacionario.	117

Cuadro 6.1.1	Parámetros de sistema del modelo en estado dinámico. . . .	121
Cuadro 6.2.1	Temperatura de varias zonas y puntos del sistema en el estado estacionario para tres potencias diferentes.	130
Cuadro 6.2.2	Propiedades de los materiales de cambio de fase elegidos. . .	134
Cuadro 7.2.1	Propiedades del material de cambio de fase de prueba. . . .	146
Cuadro 7.2.2	Ganancia de tiempo con respecto al sistema sin PCM para diferentes temperaturas de fusión del PCM idóneo en los alrededores del CPU, con una temperatura de alarma de 85 °C.	150
Cuadro 7.2.3	Ganancia de tiempo con respecto al sistema sin PCM para tres ubicaciones del PCM y distintas temperaturas de fusión, con una temperatura de alarma de 86 °C.	153
Cuadro 7.2.4	Ganancia de tiempo con respecto al sistema sin PCM para diferentes temperaturas de fusión del PCM idóneo en los alrededores del CPU a una potencia del 150 % y una temperatura de alarma de 90 °C.	160
Cuadro 7.3.1	Ganancia de tiempo con respecto al sistema con el material idóneo en los alrededores del CPU a una potencia del 125 % con cambios en sus propiedades térmicas y una temperatura de alarma de 86 °C.	163
Cuadro 7.4.1	Propiedades térmicas del ácido esteárico.	171
Cuadro 7.4.2	Ganancia de tiempo con respecto al sistema sin PCM para un PCM idóneo y el ácido esteárico en los alrededores del CPU a una potencia del 125 % y una temperatura de alarma de 85 °C.	173
Cuadro A.1.1	Resultados del estudio del efecto del modelo de turbulencia, capas de frontera y mallado en un modelo de prueba simplificado. . .	179

Cuadro A.1.2	Resultados de la optimización final del coeficiente convectivo de transferencia de calor y la potencia del GPU para la simulación en estado estacionario.	180
Cuadro A.1.3	Resultados de la optimización final de la potencia de las resistencias variables para la simulación en estado estacionario. . . .	180
Cuadro A.1.4	Resultados del análisis de sensibilidad del modelo en estado estacionario con respecto a varios parámetros del sistema.	181
Cuadro A.1.5	Resultados del análisis de sensibilidad del modelo en estado estacionario con respecto al mallado del sistema.	181
Cuadro A.1.6	Perfiles de temperatura con respecto al tiempo para varios puntos del sistema sin PCM, bajo una potencia 1.25 veces TDP. . . .	182
Cuadro A.1.7	Datos de la simulación dinámica para diferentes algoritmos de solución y pasos de tiempo.	183
Cuadro A.1.8	Datos de simulación dinámica para las distintas configuraciones de PCM empleando el eutéctico de urea y bromuro de amonio, bajo una potencia 1.25 veces TDP.	184
Cuadro A.1.9	Datos de simulación dinámica para las distintas configuraciones de PCM empleando hidróxido de bario octahidratado, bajo una potencia 1.25 veces TDP.	185
Cuadro A.1.10	Datos de simulación dinámica para las distintas configuraciones de PCM empleando naftaleno, bajo una potencia 1.25 veces TDP.	186
Cuadro A.1.11	Perfiles de temperatura de las superficies en contacto con el PCM en la configuración alrededor del CPU para un pico sostenido de 1.25 veces TDP.	187

Cuadro A.1.12 Perfiles de temperatura de las superficies en contacto con el PCM en la configuración bajo el TCU para un pico sostenido de 1.25 veces TDP.	188
Cuadro A.1.13 Perfiles de temperatura de las superficies en contacto con el PCM en la configuración sobre el TCU para un pico sostenido de 1.25 veces TDP.	189
Cuadro A.1.14 Perfiles de temperatura de las superficies en contacto con el PCM en la configuración alrededor del CPU para un pico sostenido de 1.5 veces TDP.	190
Cuadro A.1.15 Perfiles de temperatura de las superficies en contacto con el PCM en la configuración bajo el TCU para un pico sostenido de 1.5 veces TDP.	191
Cuadro A.1.16 Perfiles de temperatura de las superficies en contacto con el PCM en la configuración sobre el TCU para un pico sostenido de 1.5 veces TDP.	192
Cuadro A.1.17 Variación de la temperatura del CPU para diferentes temperaturas de fusión del PCM idóneo en la configuración de mayor volumen alrededor del CPU, bajo una potencia de 1.25 veces TDP; parte 1.	193
Cuadro A.1.18 Variación de la temperatura del CPU para diferentes temperaturas de fusión del PCM idóneo en la configuración de mayor volumen alrededor del CPU, bajo una potencia de 1.25 veces TDP; parte 2.	194
Cuadro A.1.19 Variación de la temperatura del CPU para diferentes temperaturas de fusión del PCM idóneo en la configuración de menor volumen bajo el TCU, a una potencia de 1.25 veces TDP.	195

Cuadro A.1.20	Variación de la temperatura del CPU para diferentes temperaturas de fusión del PCM idóneo en la configuración de menor volumen sobre el TCU, a una potencia de 1.25 veces TDP.	196
Cuadro A.1.21	Variación de la temperatura del CPU para diferentes temperaturas de fusión del PCM idóneo en la configuración de mayor volumen alrededor del CPU, a una potencia de 1.5 veces TDP.	197
Cuadro A.1.22	Variación de la temperatura del CPU con respecto a la conductividad térmica y el calor específico del PCM.	198
Cuadro A.1.23	Variación de la temperatura del CPU con respecto a la densidad y la entalpía de fusión del PCM.	199
Cuadro A.1.24	Variación de la temperatura del CPU con respecto a la magnitud del intervalo de transición de fase y la temperatura de fusión media del PCM.	200
Cuadro A.1.25	Temperatura del CPU para el PCM idóneo y el ácido esteárico para la configuración de mayor volumen alrededor del CPU, bajo una potencia de 1.25 veces TDP.	201

Nomenclatura

La siguiente lista describe los símbolos empleados para describir variables y parámetros dentro del trabajo.

Símbolos generales

Δ	Cambio macroscópico en el valor de una variable	
∇	Operador diferencial vectorial	
A	Área	m^2
$FLOW$	Flujo volumétrico actual	$ACFM$
h	Coefficiente convectivo de transferencia de calor	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$
k	Conductividad térmica	$\text{W}/(\text{m K})$
Q	Flujo volumétrico	m^3/min
q	Tasa de transferencia de calor	W
RPM	Velocidad del ventilador	min^{-1}
T	Temperatura	$^{\circ}\text{C}$
V	Velocidad del aire	m/s

Variables del modelo

T_{HP_CPU}	Temperatura de un punto sobre el tubo de calor del CPU	°C
T_{HP_GPU}	Temperatura de un punto sobre el propagador del GPU	°C
$T_{HP_Left-fan}$	Temperatura de un punto sobre el tubo de calor del disipador izquierdo	°C
$T_{HP_Right-fan}$	Temperatura de un punto sobre el tubo de calor del disipador derecho	°C
$T_{MB_Hotspot}$	Temperatura del VR en el punto caliente del sistema	°C
T_{Memory}	Temperatura de un punto sobre la memoria RAM	°C
T_{PCH}	Temperatura de un punto sobre el PCH	°C
T_{SSD}	Temperatura de un punto sobre el SSD	°C
T_{VR_CPU}	Temperatura de un punto sobre la resistencia variable cerca del CPU	°C

Parámetros del modelo

Cp_{evap}	Capacidad calorífica de la resistencia a la evaporación J/(kg K)	(5000-100000)
Cp_{gappad}	Capacidad calorífica de los gap pads	1000 J/(kg K)
Cp_{HP}	Capacidad calorífica de los tubos de calor	(200-1000) J/(kg K)
Cp_{TIM}	Capacidad calorífica de la pasta térmica	(100-4000) J/(kg K)
Cp_{vap}	Capacidad calorífica del vapor	(1000-4000) J/(kg K)
h_{conv}	Potencia de diseño térmico del CPU	(5-30) W/(m ² K)

h_{fan_left}	Potencia de diseño térmico del CPU	(80-200) W/(m ² K)
h_{fan_right}	Potencia de diseño térmico del CPU	(68-170) W/(m ² K)
k_{evap}	Conductividad térmica de la resistencia a la evaporación	(0.1-2.0) W/(m K)
k_{gappad}	Conductividad térmica de los gap pads	1.5 W/(m K)
k_{HP}	Conductividad térmica de los tubos de calor	(100-500) W/(m K)
k_{TIM}	Conductividad térmica de la pasta térmica	6 W/(m K)
k_{vap}	Conductividad térmica del vapor	(10-200) kW/(m K)
P_{CPU}	Potencia de diseño térmico del CPU	45 W
P_{max_GPU}	Potencia máxima del GPU	(30-40) °C
P_{VR_Chips}	Potencia de los VR cerca del GPU	2 W
P_{VR_CPU}	Potencia del VR cerca del CPU	0.355 W
P_{VR_HS}	Potencia del VR en el punto caliente	1.13 W
ρ_{evap}	Densidad de la resistencia a la evaporación	(500-3000) kg/m ³
ρ_{gappad}	Densidad de los gap pads	2100 kg/m ³
ρ_{HP}	Densidad virtual de los tubos de calor	(500-10000) kg/m ³
ρ_{TIM}	Densidad de la pasta térmica	2595 kg/m ³
ρ_{vap}	Densidad del vapor	(0.1-1.0) kg/m ³
$T_{air_in_left}$	Temperatura de entrada del aire en el ventilador izquierdo	(30-40) °C
$T_{air_in_right}$	Temperatura de entrada del aire en el ventilador derecho	(30-40) °C

T_{amb_in}	Temperatura del aire de entrada al sistema	35-45 °C
t_{evap}	Ancho de la zona de resistencia térmica	(0.01-0.5) mm
T_{max_CPU}	temperatura máxima del CPU	°C
t_{TIM}	Ancho de la interfaz de pasta térmica	(0.01-0.5) mm
T_{v_CPU}	Promedio de la temperatura del CPU	°C
T_{v_GPU}	Promedio de la temperatura del GPU	°C
x_{P_GPU}	Razón de potencia del GPU	0.2

Subíndices

<i>air</i>	Referente al aire
<i>cond</i>	Referente al fenómeno conductivo
<i>conv</i>	Referente al fenómeno convectivo
<i>fins</i>	Referente a las aletas
<i>left</i>	Ubicación izquierda
<i>n</i>	Referente a la dirección normal
<i>out</i>	Referente a la salida
<i>right</i>	Ubicación derecha
<i>T</i>	Referente a la posición transversal

Resumen

Los avances en computación se caracterizan por procesadores más eficientes y de menor tamaño. Estos beneficios acarrearán la necesidad de nuevos y más eficientes métodos de extracción de calor. El empleo de materiales de cambio de fase como sistemas de almacenamiento de calor latente representa un área de interés creciente dentro del ámbito de las soluciones para sistemas de cómputo.

El objetivo de este estudio es modelar y simular una unidad de control térmico para sistemas electrónicos empleando materiales de cambio de fase y potenciadores de conductividad térmica. Con el fin de desarrollar un método para el correcto análisis del sistema y la determinación de un material de cambio de fase óptimo para la aplicación de interés.

El desarrollo del trabajo conlleva diseñar el sistema de interés con base en datos reales, modelar la unidad en un sistema de simulación multifísica y validar el modelo obtenido. Con el modelo listo se procede a la selección de materiales, el análisis de las zonas adecuadas para la colocación y la determinación de las propiedades óptimas del material de cambio de fase.

Los resultados obtenidos inclinan la selección del material a un énfasis especial en la relación entre la temperatura óptima de fusión y la ubicación en el sistema. Se plantea un método para la adecuada selección de materiales de cambio de fase para aplicaciones similares, así como las variables no tomadas en cuenta en este estudio.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Justificación y antecedentes

Los avances en la velocidad de procesamiento, la complejidad y la miniaturización de los sistemas electrónicos conllevan un aumento en el flujo de calor por unidad de área y, por ende, una necesidad de manejo térmico adecuada para prevenir fallas inmediatas y mejorar la fiabilidad a largo plazo (Yeh, 1995). Desafortunadamente, la reducción del espacio para el control térmico disminuye el área superficial lo que dificulta el enfriamiento adecuado en dispositivos portátiles.

Por esta razón, el estudio de unidades de control térmico (TCU; *Thermal Control Unit*), alternativas y mejoras en las ya existentes es de importancia para el desarrollo tecnológico de computadoras y dispositivos portátiles. Existen dos técnicas de enfriamiento utilizadas en sistemas electrónicos: el enfriamiento activo se refiere a un sistema que remueve el calor generado de forma continua como, por ejemplo, el enfriamiento con aire, de inmersión, termoeléctrico, disipadores con tubos de calor, entre otros; y los sistemas pasivos los cuales acumulan la energía térmica generada por el sistema para su posterior liberación (Tummala, 2001).

El uso de materiales de cambio de fase (PCM; *Phase Change Material*) para enfria-

miento pasivo es una técnica prometedora considerando las ventajas de estas sustancias, entre ellas, alto calor específico, alto calor latente de fusión, un cambio pequeño de volumen durante el cambio de fase y la alta disponibilidad de materiales de cambio de fase con diferentes temperaturas de fusión, naturaleza química y propiedades fisicoquímicas (Sharma *et al.*, 2009). Sin embargo, usualmente los materiales de cambio de fase presentan una baja conductividad térmica, lo que dificulta la eficiente transmisión y distribución homogénea del calor por la estructura de control térmico, y su capacidad para liberar rápidamente la energía absorbida con el fin de someterse a un ciclo de calentamiento nuevamente. Para mejorar la transferencia de calor en los sistemas de almacenamiento térmico de calor latente se emplean potenciadores de conductividad térmica (TCE; *Thermal Conductivity Enhancer*), materiales con alta conductividad térmica que se distribuyen de distintas formas entre el PCM y la estructura de contacto (Sahoo *et al.*, 2016).

Tan y Tso (2004); Weng *et al.* (2011); Yang y Wang (2012); Yoo y Joshi (2004) estudian el uso de los materiales de cambio de fase en disipadores de calor y concluyen sobre el efecto de diferentes variables como posición del TCU, volumen del material, tipo de PCM y potencia suministrada. Baby y Balaji (2012); Fok *et al.* (2010); Gharbi *et al.* (2015); Kandasamy *et al.* (2008); Wang y Yang (2011) estudian el uso del TCE en una estructura de aletas, así como el efecto del grosor, cantidad y posición de las aletas en el disipador de calor de manera experimental y computacional. Mesalhy *et al.* (2005) emplean una matriz porosa de TCE y concluyen que tanto la conductividad térmica de la matriz como la porosidad de la misma aumentan la eficiencia del TCU. Luo *et al.* (2015) proponen el uso de grafito expandido como TCE y soporte del PCM, y determinan correlaciones numéricas de las propiedades del mismo.

El estudio experimental de los TCU empleando PCM presenta muchas complicaciones por las distintas configuraciones de forma, material, cantidad, potencia de trabajo y arquitectura del sistema electrónico, esto lo vuelve ineficiente en temas de tiempo

y recursos. El modelado y la simulación computacional de la arquitectura y los TCU presenta una alternativa eficiente para determinar la eficacia de las diferentes configuraciones de factores de diseño. Con un obstáculo presente, la adecuada simulación matemática de las propiedades fisicoquímicas de los materiales, lo que requiere una extensiva caracterización de las sustancias a utilizar. Yang y Wang (2012) estudian el uso de la simulación matemática tridimensional en estado transiente de una aplicación de enfriamiento utilizando PCM bajo diferentes orientaciones e intervalos de tiempo, tanto para la carga como la descarga energética del PCM.

El estudio se plantea con un enfoque en la implementación de la capacidad de absorción energética del cambio de fase de los PCM, con el fin de regular la temperatura del procesador cuando se emplean picos de velocidad de procesamiento para operaciones particulares dentro del funcionamiento del sistema computacional (*dynamic overclocking*). El uso de estas altas velocidades de procesamiento se da, convencionalmente, por periodos muy cortos para impedir el sobrecalentamiento y apagado automático de los sistemas (Lo y Kozyrakakis, 2014). La finalidad, y lo que diferencia el trabajo de lo encontrado en la literatura, es diseñar un sistema que permita prolongar los intervalos de tiempo de empleo de estas altas potencias de cálculo empleando los materiales de cambio de fase con potenciadores de conductividad térmica como repositorios térmicos.

El trabajo consiste en la elección y diseño de la unidad de control térmico, así como la distribución del PCM en esta. Además del modelado de las propiedades físicas y químicas de los PCM con TCE, la comprobación de los modelos con datos teóricos y la simulación computacional en estado dinámico de un ciclo de calentamiento del sistema, bajo las condiciones de *dynamic overclocking*, para diferentes variaciones de TCU y potencia planteada. Con el fin de determinar un método para la selección de materiales en sistemas de similar aplicación.

1.2. Objetivo general

Modelar y caracterizar mediante simulación una unidad de control térmico para sistemas electrónicos empleando materiales de cambio de fase y potenciadores de conductividad térmica.

1.3. Objetivos específicos

- Modelar la estructura tridimensional de la unidad de control térmico por medio de una herramienta de diseño asistido por computadora.
- Validar el método de simulación mediante la simulación del sistema en estado estable.
- Seleccionar los materiales de cambio de fase adecuados para la unidad de control térmico.
- Realizar la simulación computacional de la estructura de la unidad de control térmico según las elecciones del material de cambio de fase, localización y su masa.
- Determinar, con base en los resultados de las simulaciones, la mejor configuración de unidad de control térmico con material de cambio de fase.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Unidades de control térmico en sistemas electrónicos

El rendimiento y confiabilidad de un sistema electrónico depende directamente de la temperatura de trabajo de sus partes. En la práctica, los circuitos integrados operan a temperaturas mucho mayores a las ambientales y, desafortunadamente, la mayoría son propensos a fallas por la prolongada exposición a elevadas temperaturas. Esta tasa de falla acelerada resulta del arrastre mecánico en los materiales de unión, reacciones químicas indeseadas, difusión de dopantes, entre otras. Estos y otros modos relacionados de falla establecen una relación directa entre la confiabilidad del componente y la temperatura de operación. Esta relación se muestra en la Figura **2.1.1**. La figura muestra un comportamiento casi exponencial, donde, en algunos sectores se puede esperar un incremento de casi el doble en tasa de falla del componente al aumentar la temperatura de operación en 10 °C. Como consecuencia, para muchos sistemas integrados, la temperatura es el mayor contribuyente a la falta de confiabilidad. En estos sistemas, el control térmico es crítico para el éxito del sistema electrónico (Tummala, 2001).

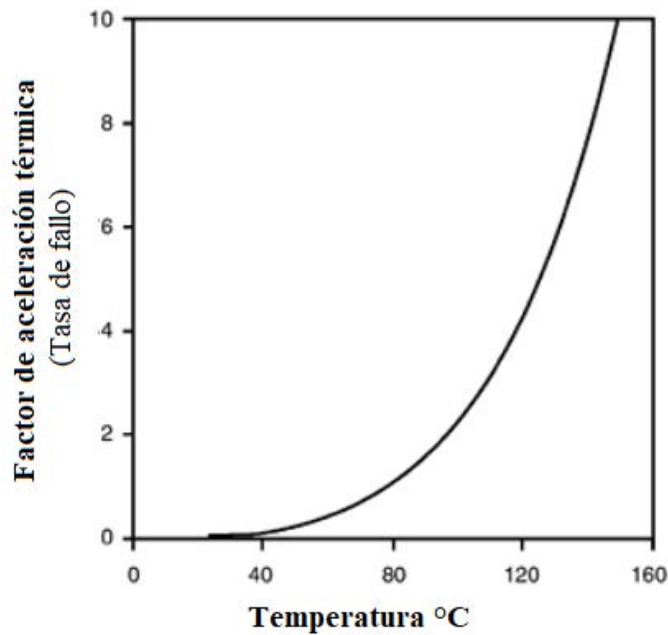


Figura 2.1.1. Efecto de la temperatura en la tasa de falla del componente (Tummala, 2001).

2.1.1. Consideraciones de un sistema de control térmico

El éxito de un sistema electrónico integrado y miniaturizado se fundamenta en un óptimo control térmico. Esto requiere una comprensión amplia de los patrones de generación de calor y los flujos térmicos resultantes. Se inicia con la identificación de las fuentes de disipación de calor del sistema, la generación total de potencia, su distribución espacial y la variabilidad con respecto al tiempo. Así también, se debe comprender el tipo de disipador de calor para la potencia generada: la mano del usuario, el aire ambiente, un fluido térmico, el espacio exterior, entre otros. Estas dos consideraciones representan las primeras limitantes para el sistema en términos de operabilidad, seguridad y preferencias de los usuarios (Tummala, 2008). Conocer todas las limitantes o restricciones de todos los componentes del sistema es crítico. Esto incluye la temperatura máxima permitida para los componentes individuales, tanto en estado transitorio como estacionario. En muchos casos, algunos sistemas requerirán una mayor atención al ser

más importantes para el desempeño de esta parte del sistema. Otra limitante se presenta en la forma de los gradientes de temperatura a través de los componentes o interfaces, los cuales son determinados por los flujos de calor y la resistencia térmica. Se debe comprender la trayectoria de la transferencia de calor. El diseño debe poseer suficiente capacidad para remoción y esparcimiento de calor para asegurar el cumplimiento de todas las restricciones sin exceder las temperaturas y flujos calóricos máximos. Además, debe considerar múltiples trayectorias para la propagación de calor para controlar el flujo de calor fuera del sistema electrónico de manera adecuada (Tummala, 2008).

Los sistemas de control térmico también pueden clasificarse según la necesidad de energía externa al sistema para remover calor de este. Un sistema que no requiere de una fuente externa de potencia para llevar a cabo la remoción de calor de los componentes importantes se conoce como pasivo. Por el contrario, aquellos que si requieren de una fuente externa de poder son referidos como activos.

2.1.2. Métodos pasivos para control térmico

Materiales de empaque de alta conductividad

Como los sistemas electrónicos empacados se componen de varios componentes de capas delgadas al nivel de substrato. La conductividad térmica del substrato, la capa dieléctrica interfacial, los conductores, los rellenos inferiores, los materiales térmicos de interfase, y el núcleo se vuelven parámetros de suma importancia. Substratos con alta conductividad térmica ayudan a propagar el calor. Entre los parámetros que gobiernan la elección de un material de substrato se encuentran la conductividad térmica del núcleo, la conductividad eléctrica, la compatibilidad electromagnética, y el costo. Además, la demanda por sistemas empacados de bajo peso hace de la conductividad térmica específica (conductividad entre la gravedad específica) otro parámetro importante. Los estudios recientes se enfocan en compuestos cerámicos, y otros tipos de materiales avanzados, como posibilidades prometedoras para sistemas empacados y otras aplicaciones

de microsisistemas tradicionales (Tummala, 2008).

Vías térmicas

Las vías térmicas son pasajes de alta conductividad térmica que van desde el circuito integrado hasta el disipador de calor. Estos emplean conductividad térmica y posibles mecanismos de propagación de calor para transmitir el calor. Entre los factores que afectan su rendimiento se encuentran la conductividad térmica, el área transversal y la longitud. Un acoplamiento adecuado a la fuente y al disipador de calor es importante para reducir la resistencia de la interface. La densidad de la vía debe ser optimizada, y las vías deben ser colocadas cerca de las zonas calientes para aumentar su eficiencia. Las vías térmicas mejoran eficientemente la tasa de disipación de calor y decrecen la temperatura de las regiones activas en estado estacionario (Tummala, 2008).

Propagadores de calor

La propagación de calor es un proceso en el cual el problema de la conducción no se encuentra limitado geoméricamente y se permite que el calor se expanda en dos o tres dimensiones. Esto resulta, por lo general, en menores trayectorias térmicas y menor temperatura en la fuente. La propagación de calor es de gran utilidad cuando nos enfrentamos con un problema de generación térmica altamente no-uniforme. La solución principal del diseño térmico puede encargarse de la disipación de la potencia generada, pero las no-uniformidades en los componentes pueden conducir a puntos calientes no deseables. La propagación térmica posee dos desventajas funcionales; si el mecanismo de solución térmico depende en el gradiente de temperaturas, la presencia de un propagador térmico puede comprometer drásticamente la eficiencia total. Además, la mala aplicación de un propagador térmico puede disminuir en gran medida el rendimiento general del control térmico (Tummala, 2008).

Superficies extendidas (*Heat sinks*)

Las superficies extendidas son una extensión lógica de la propagación térmica. Áreas superficiales mayores para la salida de calor hacia el aire, líquido, o inclusive por radiación al espacio son mejoras térmicas más directas y de menor costo. El concepto de superficies extendidas o disipador de calor se emplea tanto para el enfriamiento pasivo como activo. Las aletas son las superficies extendidas más comúnmente utilizadas para mejorar la transferencia convectiva de calor. Estas aletas aumentan el área superficial para que el fluido pueda remover el calor. Para cualquier sistema, se debe realizar un estudio de variabilidad del incremento en el rendimiento térmico con respecto a la diferencia de costo, espacio y peso para determinar la superficie extendida óptima (Tummala, 2008).

Tubos de calor (*Heat pipes*)

Los tubos de calor son predominantes en computadoras portátiles. Estas consisten en secciones con cambio de fase, un evaporador y un condensador, y un fluido de transferencia entre los extremos. El mecanismo de cambio de fase puede mover cantidades significativas de calor. En estos sistemas (en computadoras portátiles) la fuente, generalmente el microprocesador, se encuentra unido a la sección de evaporación. El vapor se desplaza hacia la sección de condensación donde el calor se propaga hacia el disipador de calor con una alta tasa de transferencia de calor de la condensación. El líquido condensado se regresa hacia el condensador por medio de capilaridad. La gravedad puede ayudar en el proceso de desplazamiento si se diseña apropiadamente para esto (Zohuri, 2011). La Figura 2.1.2 muestra un esquema de la configuración básica de un tubo de calor.

Si se emplean longitudes cortas, los tubos de calor pueden dar una transferencia de calor a un muy pequeño diferencial de temperatura, tal que las secciones de evaporación y condensación son casi isotérmicas. Esto da como resultado resistencia térmicas

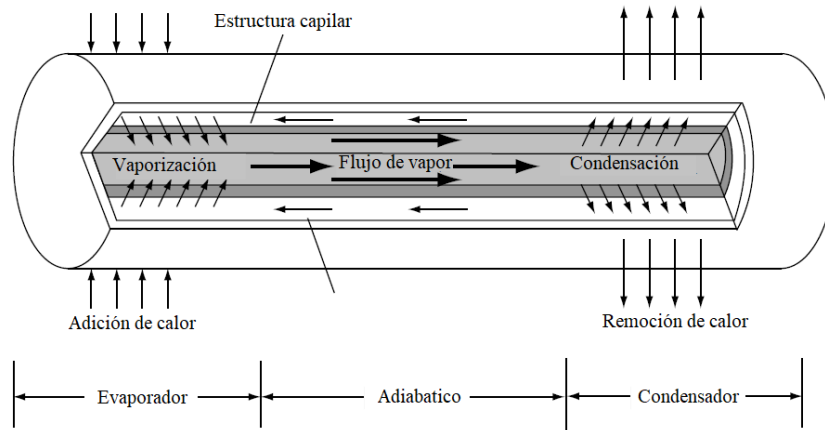


Figura 2.1.2. Esquema de un tubo de calor (Zohuri, 2011).

muy bajas. Las temperaturas de operación de los tubos de calor están dadas por la temperatura de saturación del fluido de trabajo. Se pueden emplear diferentes fluidos, el más utilizado es agua, con la presión interna ajustada para obtener la temperatura de saturación deseada (Tummala, 2008).

Los tubos de calor son componentes muy simples por el exterior, pero su comportamiento físico interno es bastante complejo. Los modelos de predicción del rendimiento en estado estable equilibran la carga de la capilaridad disponible junto con las caídas de presión de las fases líquido y vapor; incluyendo también las fases inerciales, viscosas e hidrostáticas, para determinar el límite de capilaridad y de capacidad de transferencia de calor del tubo de calor, después de este límite el dispositivo se secaría. Otros límites operacionales, incluyendo viscosos, sonoros, de evaporación y de arrastre, pueden limitar aún más la movilización térmica de los tubos de calor, dependiendo del rango de temperaturas de operación. La mayoría de los fabricantes poseen modelos simplificados para sus diseños, pero de igual manera se debe realizar una caracterización experimental para confirmar el rendimiento de cada diseño individual (Zohuri, 2011).

Los tubos de calor son relativamente baratos y con muy buenas propiedades de transferencia de calor, lo que los vuelve la norma en muchas unidades de control térmico.

co. Un tubo de cobre puede sustituir a una barra de cobre con las mismas dimensiones y aumentar la transferencia de calor en un orden de magnitud. No poseen partes móviles y la falla es rara. Sistemas simples de baja potencia pueden solo requerir de la conducción térmica y propagadores de calor a un disipador de calor. Pero para muchos dispositivos, la integración de los sistemas electrónicos empacados crece y la potencia generada también, así también la necesidad de tubos de calor de alta capacidad crece (Zohuri, 2011).

2.1.3. Métodos activos para control térmico

El enfriamiento activo requiere de energía externa para funcionar. Por lo general es un ventilador, moviendo aire a través de un disipador de calor o una superficie extendida, o una bomba desplazando fluido por un intercambiador de calor. Otro ejemplo son los sistemas de refrigeración, donde un compresor comprime y mueve el refrigerante. El enfriamiento activo suele sobrepasar en rendimiento al enfriamiento pasivo, un ventilador genera un flujo mayor por el disipador de calor del que se generaría el efecto boyante en la convección natural. Sin embargo, los costos son mayores, se incrementa el consumo de eléctrico y el ruido puede ser un problema. Sin embargo, se suele requerir un volumen menor para los sistemas de enfriamiento activo (Tummala, 2008).

Ciclos líquidos

Los ciclos de líquidos enfriados, particularmente los de bombeo de líquidos, merecen una consideración especial. Estos tienen capacidad para muy altos rendimientos, pero, aún existen desafíos en la confiabilidad de las bombas y en fugas de líquido en el sistema. Al ser resueltas estas complicaciones, el enfriamiento líquido proveería un impulso en la densidad energética para solucionar los desafíos térmicos de los sistemas electrónicos empacados. Un buen ejemplo es el sistema de enfriamiento de microcanales. Los microcanales de una sola fase pueden proveer tasa de transferencia de calor en el

rango asociado con el cambio de fase, pero con una mayor estabilidad y fácil control que los enfoques con evaporación y condensación. Estos microcanales son particularmente adecuados para sistemas empacados debido a su habilidad para ser fabricados en silicón u otros substratos en muy pequeños tamaños. Sus configuraciones están solamente limitadas por las capacidades de los sistemas microelectromecánicos que se emplean para construirlos, capacidades que van en aumento. Las microbombas basadas en sistemas microelectromecánicos son también utilizadas como conductoras del fluido, pero su aplicación puede verse limitada por los requerimientos de flujo y caída de presión (Tummala, 2008).

Otros métodos activos para control térmico

Tummala (2008) presenta otros métodos activos para el control térmico aún en desarrollo o con aplicaciones muy limitadas. Los siguientes son ejemplos de estas tecnologías:

Enfriamiento en aerosol

Actualmente es aplicado para el enfriamiento a nivel de sistema en ambientes severos. El ciclo de enfriamiento utiliza un fluido dieléctrico, rociado directamente sobre la electrónica. El fluido experimenta un cambio de fase, enfriando los componentes. Posteriormente es capturado y condensado, liberando así el calor del sistema, ya sea al aire ambiente o a un intercambiador de calor líquido-líquido.

Termosifón

Es un ciclo de dos fases gobernado por fuerzas boyantes. Puede ser implementado como un dispositivo de una sola cámara, o de doble cámara. El segundo separa las regiones de entrada y salida de calor para una mayor flexibilidad.

Enfriamiento termoeléctrico

La no-uniformidad en la generación de calor en los módulos de los sistemas empacados podría solucionarse con un enfriamiento termoeléctrico que desplace el calor fuera de los puntos calientes de alta densidad hacia una zona en el empaque donde puede

ser transferido fácilmente a la solución de enfriamiento principal. Es de saber, que los dispositivos disponibles actualmente en el mercado poseen coeficientes de rendimiento significativamente menores que los de muchas tecnologías mecánicas de refrigeración. Aún con las más optimistas predicciones, puede ser problemático emplear este tipo de enfriamiento como solución principal, debido al consumo extra de energía. Las limitaciones de potencia en la vida de la batería o en la liberación de calor pueden limitar todas las soluciones activas de enfriamiento, en particular el enfriamiento.

Enfriamiento termoiónico

Este funciona bajo fenómenos cuánticos donde el enfriamiento se da por la eyección de electrones debido a su alta energía térmica. La estructura básica de estos dispositivos consiste en un cátodo unido a la superficie caliente y un ánodo que actúa como disipador de calor. Una de las principales ventajas de estos sistemas es que pueden ser fácilmente integrados con otros dispositivos de disipación de potencia.

Refrigeración por compresión de vapor

Están siendo investigados por su miniaturización y aplicabilidad al enfriamiento de electrónicos. Aunque prometen mayores eficiencias que los sistemas de enfriamiento termoeléctricos, la mayor área de aplicación es en el enfriamiento de puntos calientes, o aplicaciones de muy alta densidad de potencia tales como el enfriamiento de sistemas basados en semiconductores complementarios de óxido metálico los cuales aumentan el rendimiento computacional a como se les disminuye la temperatura.

2.2. Materiales de cambio de fase (PCM)

Los materiales de cambio de fase son materiales de almacenamiento de calor latente, es decir, la transferencia de calor ocurre cuando el material cambia de fase; de sólido a líquido, o viceversa. Esto les permite absorber y liberar calor a una temperatura casi constante. Se conoce una gran cantidad de materiales de cambio de fase, con puntos de

fusión dentro de cualquier rango deseado. Sin embargo, para su empleo como materiales de almacenamiento de calor, estos deben exhibir ciertas propiedades termodinámicas, cinéticas y químicas deseables, además de consideraciones económicas y de disponibilidad (Sharma *et al.*, 2009). Las principales propiedades que debe cumplir un material de cambio de fase para su empleo como “batería térmica” son las siguientes:

- Propiedades térmicas
 - Temperatura de fusión adecuada
 - Alto valor de entalpía de fusión
 - Alta conductividad térmica
- Propiedades físicas
 - Equilibrio de fase favorable
 - Alta densidad
 - Bajo cambio de volumen
 - Presión de vapor baja
- Propiedades cinéticas
 - No presente sobrefusión
 - Tasa de cristalización suficiente
- Propiedades químicas
 - Estabilidad química a largo plazo
 - Compatibilidad con los materiales de trabajo
 - No tóxico
 - No inflamable
- Criterios económicos

- Abundante
- Disponible
- Económico

2.2.1. Clasificación de los materiales de cambio de fase

Los materiales de cambio de fase se pueden clasificar con respecto al tipo de compuesto, o compuestos que los conforman. La Figura 2.2.3 muestra una clasificación de los PCM en orgánicos, inorgánicos y eutécticos.

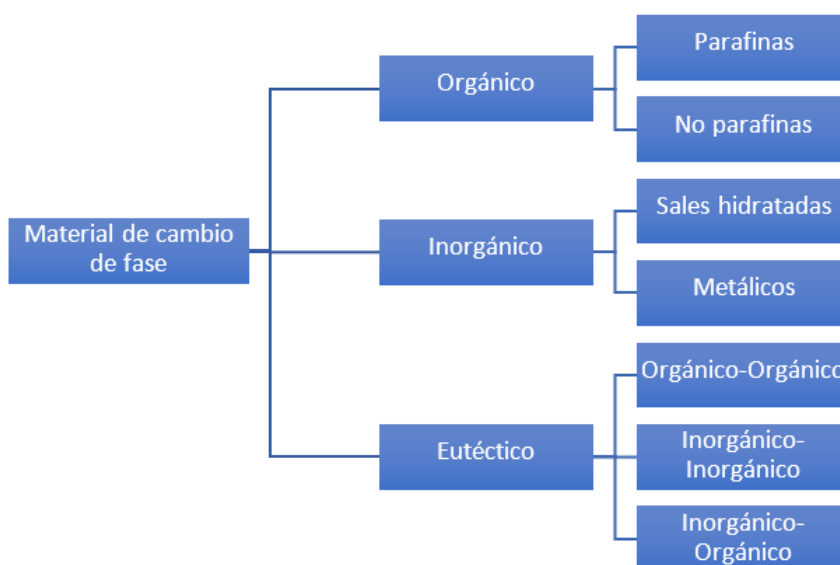


Figura 2.2.3. Clasificación de los materiales de cambio de fase (Sharma *et al.*, 2009).

Materiales de cambios de fase orgánicos

Los materiales orgánicos más estudiados son las ceras de parafina, los polímeros de etilenglicol, los ácidos grasos y sus derivados (Sarier y Onder, 2012). Estos materiales muestran ciertas características deseables como PCM. Una fusión congruente, lo que indica la capacidad de poder cambiar de fase repetidamente sin experimentar segregación

de fase, lo que conlleva a una degradación de la entalpía de fusión. La función de auto-nucleación de estos materiales permite una cristalización con mínima, si no inexistente, sobrefusión y usualmente no son corrosivos (Sharma *et al.*, 2009).

Parafinas

Las ceras de parafina consisten en mezclas de, principalmente, alcanos de cadena lineal. Tanto la temperatura de fusión como el calor latente de fusión incrementan con el largo de las cadenas. Se encuentran disponibles en un largo rango de temperaturas. La parafina es segura, confiable, predecible, no tan costosa y no corrosiva. Son químicamente inertes y estables en temperaturas menores a los 500 °C, el cambio de volumen al fundirse es despreciable y poseen baja presión de vapor. Aparte de cumplir estos requisitos, a su vez pueden presentar ciertas propiedades no deseadas como baja conductividad térmica, incompatibilidad con contenedores plásticos y flamabilidad moderada (Sarier y Onder, 2012). Algunos de estos factores no deseables pueden ser parcialmente eliminados modificando la composición de la cera y la unidad de almacenamiento. El Cuadro 2.2.1 muestra el calor latente y el punto de fusión para diferentes parafinas con respecto al número de carbonos.

Cuadro 2.2.1. Punto de fusión y calor latente de fusión de las parafinas con respecto al número de átomos de carbono (Sharma *et al.*, 2009).

Número de átomos carbonos	Punto de fusión T_f / (°C)	Calor latente de fusión λ_f / (kJ/kg)
14	5.5	228
17	21.7	213
20	36.7	246
23	47.5	232
26	56.3	256
29	63.4	240
32	69.5	170
34	75.9	269

No parafinas

Esta clasificación posee la mayor cantidad de materiales de cambio de fase con

propiedades muy diversas. Este grupo contiene ácidos grasos y sus derivados, y polímeros de etilenglicol. Los derivados de los ácidos grasos y otras no-parafinas presentan las siguientes características: alto calor de fusión, inflamabilidad, baja conductividad térmica, baja presión de vapor, diferentes niveles de toxicidad e inestabilidad a altas temperaturas (Sharma *et al.*, 2009).

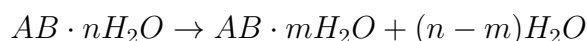
Otro tipo de materiales de cambio de fase dentro de esta categoría son los polímeros de etilenglicol. Entre sus características se encuentran altas entalpías de fusión, bajas y moderadas temperaturas de fusión, bajas presiones de vapor, estabilidad química y térmica, no inflamables, biodegradables, no tóxicos, no corrosivos y baratos. Los valores de punto de fusión y calor latente de fusión aumentan al incrementar el peso molecular medio del polímero. Pero estos polímeros presentan dos problemas: la diferencia entre las temperaturas de cristalización y fusión generan problemas de sobrefusión, y su baja conductividad térmica ($\approx 0.2985 \text{ W}/(\text{m K})$) (Sarier y Onder, 2012).

Materiales de cambio de fase inorgánicos

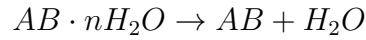
Los materiales de cambio de fase inorgánicos se conforman de dos subgrupos: sales hidratadas y metálicos. Los materiales inorgánicos tienen la ventaja de poseer una mayor entalpía de fusión. A su vez pueden presentar efectos indeseados como sobrefusión, corrosividad, separación de fases e inestabilidad térmica (Zalba *et al.*, 2003).

Sales hidratadas

La transformación sólido-líquido de las sales hidratadas se trata en realidad de una deshidratación e hidratación de la sal. Este proceso asemeja, en su carácter termodinámico, a un cambio de fase de fusión. Una sal hidratada usualmente se funde para formar una sal hidratada con menor cantidad de moles de agua, de la forma (Sharma *et al.*, 2009)



O su forma anhídrida



Muchas sales hidratadas presentan problemas de sobrefusión del líquido antes de comenzar con la cristalización. Este problema puede ser solucionado agregando un agente de nucleación. Los PCMs en este grupo poseen características muy atractivas como: altas entalpías de fusión por unidad de volumen, conductividad térmica relativamente alta y cambios pequeños de volumen al fundirse. Además, no son altamente corrosivos, son compatibles con plásticos y levemente tóxicos. Muchas sales hidratadas son, también, relativamente baratas (Sharma *et al.*, 2009). El Cuadro **2.2.2** muestra algunas sales hidratadas y sus propiedades de interés.

Cuadro 2.2.2. Selección de materiales inorgánicos investigados para su uso como PCM (Paksoy, 2007).

Material	Punto de fusión T_f / (°C)	Entalpía de fusión λ_f / (kJ/kg)	Conductividad térmica k / (W/(m K))	Densidad ρ / (kg/m ³)
Na ₂ HPO ₄ · 12 H ₂ O	35-40	265	liq: 0.476; sol: 0.514	1.522
Ba(OH) ₂ · 8 H ₂ O	78	265, 280	0.653 (86 °C); 1.255 (23 °C)	1.937 (84 °C); 2.180
Mg(NO ₃) ₂ · 6 H ₂ O	89-90	149, 163	0.490 (95 °C); 0.669 (55 °C)	1.550 (94 °C); 1.636 (25 °C)
MgCl ₂ · 6 H ₂ O	117	165, 169	0.57 (120 °C); 0.704 (110 °C)	1.45 (120 °C); 1.569 (20 °C)

Metálicos

Los compuestos metálicos de bajo punto de fusión poseen altas densidades lo que los hace poco utilizables por razones de peso. Pero poseen una serie de aspectos favorables como: bajo calor de fusión por unidad de masa, alta entalpía de fusión por unidad volumétrica, alta conductividad térmica, bajo calor específico y presiones de vapor relativamente bajas (Fukahori *et al.*, 2016).

Materiales de cambio de fase eutécticos

Un eutéctico es una composición mínima de fundido de dos o más componentes, donde ambos se funden y solidifican de manera congruente, formando una mezcla de cristales de los componentes al cristalizar. Los eutécticos, prácticamente, siempre cambian de fase sin segregación debido a que solidifican en una mezcla íntima de cristales, dejando poca oportunidad para la separación de los componentes. Al fundirse ambos compuestos liquidifican simultáneamente, nuevamente con una poca probable separación (Sharma *et al.*, 2009).

2.2.2. Potenciadores de conductividad térmica (TCE)

Muchos materiales no cumplen con todos los criterios necesarios para considerarse adecuados como materiales de cambio de fase para almacenamiento térmico. Como un solo compuesto no puede comprender todas las propiedades requeridas para un medio adecuado de almacenamiento térmico, se deben utilizar los materiales más adecuados disponibles e intentar cubrir las malas propiedades físicas por medio de un diseño del sistema adecuado. Una forma de realizarlo es mediante el uso de potenciadores de conductividad térmica (TCE; Thermal Conductivity Enhancer) para aumentar la conductividad del PCM.

El TCE se emplea para asegurar una más rápida y uniforme distribución del flujo de calor en todo el material, causando una fusión más homogénea. De manera práctica, la aplicación limita el tamaño de la unidad de control térmica (TCU; Thermal Control Unit), y el TCE reduce el volumen disponible para el PCM. Por lo tanto, al considerar la capacidad de almacenamiento térmico, la capacidad de absorción de calor del PCM es desplazada parcialmente por el calor específico con aumento de temperatura en el TCU, la cual es menor que la capacidad por calor latente del PCM. Por esta razón, el tamaño y diseño del TCE debe ser medido y comprobado con precaución (Alawadhi y Amon, 2003).

2.3. Simulación computacional de sistemas físicos

2.3.1. Modelos, modelado y simulación

El modelado de fenómenos físicos es una de las tareas más fundamentales de los ingenieros. Para lograr esto, se requiere el entendimiento de los axiomas y leyes de la física, o de otros campos sobre los cuales se esté trabajando, y el empleo de ecuaciones algebraicas, diferenciales e integrales que relacionen las diferentes variables que describen el fenómeno (Reddy, 1984a).

McGovern y Gupta (2011) define un modelo como la representación física, matemática o lógica de un sistema, entidad o fenómeno, mientras que, por modelado se entiende como la aplicación de una metodología estructurada para crear y validar dicho modelo. En relación con los primeros dos términos, la simulación es un método de implementación de un modelo en función del tiempo o como una serie de eventos. Con estas definiciones aclaradas, se puede definir la introducción del título de este trabajo, "Modelado y simulación", como el uso de modelos en una sucesión de eventos para generar información de valor útil con el fin de tomar decisiones técnicas o de ingeniería.

En el contexto de este trabajo se tratan cuatro tipos o clasificaciones, no excluyentes, de modelos: matemáticos, estáticos, dinámicos y físicos. En los modelos matemáticos se utilizan relaciones y símbolos matemáticos para expresar sus propiedades. Los modelos estáticos son aquellos que describe un sistema que no experimenta cambios, por el contrario, en los modelos dinámicos se dan cambios en sus definiciones o propiedades. Por último, los modelos físicos son aquellos en los cuales sus características físicas asemejan las características del sistema que se desea modelar (McGovern y Gupta, 2011).

Todo modelado y simulación de un fenómeno requiere ser verificado y validado. La verificación consiste en determinar la consistencia y precisión del modelo mediante la variación de algunas de sus entradas o configuraciones. La validación evalúa el producto

como un todo, comparándolo con el sistema real que se desea representar y determinando si el programa da una salida de información correcta para una dada entrada. Estos pasos permiten aceptar el modelo y sus resultados, entender sus capacidades, asegurar el grado de confianza en la salida de la simulación y proveen evidencia para substanciar decisiones informadas (McGovern y Gupta, 2011).

2.3.2. Método de elementos finitos

Con el uso de computadoras y la ayuda de modelos matemáticos y métodos numéricos es posible analizar muchos problemas de ingeniería. Lo cual era difícil hace varios años, cuando se debía simplificar drásticamente los modelos matemáticos para permitir alcanzar una solución analítica. El uso de métodos numéricos y computadoras para evaluar el modelo matemático de un sistema y estimar sus propiedades se llama simulación numérica (Reddy, 1984a).

Según Reddy (1984a), el estudio de los métodos numéricos por parte de los ingenieros es fundamental debido a las siguientes razones:

- La mayoría de sistemas a simular se basan en dominios complicados, condiciones de frontera, cargas e interacciones entre varios aspectos del sistema que imposibilitan encontrar soluciones analíticas. Por lo tanto, lo más adecuado es encontrar soluciones aproximadas utilizando métodos numéricos.
- Un método numérico se puede utilizar para investigar el efecto de varios parámetros en el sistema para obtener un mejor entendimiento del sistema en estudio. Esto es más efectivo, menos costoso y consume menos tiempo y recursos en comparación a realizar una gran cantidad de estudios experimentales para ganar el mismo nivel de entendimiento del sistema.
- La creciente eficiencia de los métodos numéricos y del poder de computo disponible permiten agregar a un modelo los factores mas relevantes del proceso físico sin

preocuparse si se puede obtener una solución por métodos analíticos.

- Para desarrollar y utilizar un modelo se debe tener un buen entendimiento de la teoría del problema así como de los métodos numéricos utilizados en dicho modelo.
- El método de elementos finitos y sus generalizaciones son los métodos computacionales más poderosos para analizar sistemas de ingeniería prácticos.

El método numérico de elementos finitos es un elemento altamente utilizado para resolver problemas que involucren multifísica, geometría complicada y condiciones de frontera. En este método, se divide el dominio en subdominios, llamados elementos finitos, en los que aproximan las ecuaciones físicas correspondientes por cualquiera de los métodos aplicables. Se emplea la aproximación de una solución en un conjunto de subdominios debido a la facilidad de representar una función complicada como un conjunto de polinomios simples. Esto sin dejar de lado que cada elemento individual de la solución debe corresponder con sus vecinos de forma que la solución sea continua entre los puntos de interconexión (Reddy, 1984b).

La división del dominio en elementos nos permite una representación precisa de geometrías complejas y propiedades de materiales disimilares. Así como una fácil representación de la solución que contiene los efectos locales mediante funciones definidas dentro de cada subdominio. Lo anterior recalca la necesidad de una subdivisión, o malla, adecuado de la geometría del sistema para permitir la continuidad de las ecuaciones nodales y la precisión en la solución encontrada (Reddy, 1984b).

Capítulo 3

Metodología

Para llevar a cabo el modelado y simulación de la unidad de control térmica se realizan una serie de pasos que incluyen la construcción del sistema de estudio en una herramienta de diseño estructural tridimensional, así como de las iteraciones del sistema con material de cambio de fase y para cada uno de los modelos de prueba. Seguidamente, se configura el modelo en el simulador para el estudio en estado estacionario, requerido para la verificación y validación del modelo y de la simulación.

La construcción del modelo lleva consigo muchas pruebas en versiones más simples del sistema, con el fin de comprobar el efecto de diferentes propiedades y de las ecuaciones físicas que gobiernan el fenómeno de estudio. Para la creación y configuración del modelo se emplea, como referencia principal, el manual introductorio de COMSOL Multiphysics[®] 5.1 (COMSOL, 2015b) y el manual de referencia (COMSOL, 2015a).

Una vez alcanzado un modelo veraz, se valida este con datos experimentales. Cuando el resultado se acerca a la realidad se procede al análisis de los perfiles de temperatura, para ayudar en la determinación de las configuraciones de localización de PCM a emplear en la etapa de simulación en estado dinámico.

Al modelo creado para la simulación en estado estacionario se le aplican los cambios necesarios para simular correctamente el estado dinámico, empleando como estado

inicial los resultados anteriores y las diferentes configuraciones de material de cambio de fase. Se modifica el sistema, también, de acuerdo a los estudios que se desean llevar a cabo.

Con estos modelos completos se llevan a cabo los diferentes estudios con los materiales y configuraciones elegidas. Se analizan los resultados para observar el efecto del PCM en la unidad de control térmico. Finalmente se realizan pruebas para determinar las propiedades óptimas para el material de cambio de fase en las configuraciones estudiadas.

3.1. Construcción tridimensional del sistema de trabajo

Antes de comenzar con el diseño de la simulación se ha de tomar una decisión importante: ¿Cuál sistema electrónico se debe elegir para la unidad de control térmico? El departamento de Diseño de Sistemas Termo-mecánicos de Intel Costa Rica brindó las características de cinco modelos de computadoras portátiles disponibles en el mercado. La discriminación entre los modelos tuvo en cuenta la complejidad de la unidad de control térmico, el espacio disponible para colocar el PCM en las tres dimensiones espaciales, la potencia térmica generada por los procesadores y la antigüedad del modelo.

Para construir la geometría del sistema se empleó AutoDesk AutoCAD® 2018, con las licencias estudiantiles de la Universidad de Costa Rica. Se eligió este programa de diseño tridimensional debido a la amplia experiencia en su uso y la flexibilidad que provee para la construcción de geometrías complicadas, en comparación con las herramientas de diseño integradas en los sistemas de simulación multifísicos.

3.1.1. Mapas bidimensionales

La construcción de la geometría se inició con las dimensiones presentes en la información proporcionada por Intel de Costa Rica (2018), correspondiente a las dimensiones del área de los procesadores y sus soportes para los propagadores de calor, como se muestra en la Figura 3.1.1 y la Figura 3.1.2, junto con los datos del Cuadro 3.1.1. Para estas dimensiones iniciales se emplean únicamente líneas en dos dimensiones y pequeños círculos para los agujeros en la placa madre

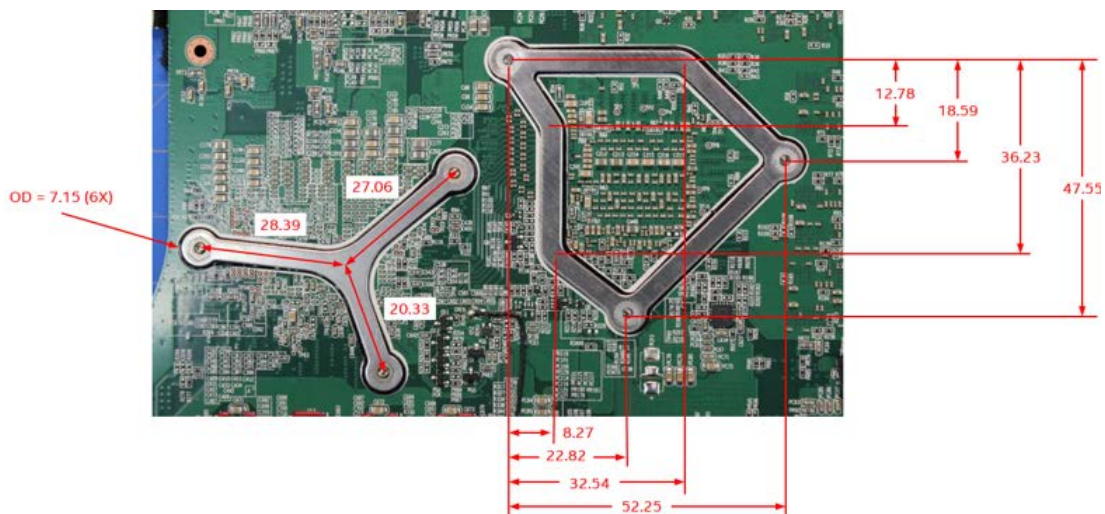


Figura 3.1.1. Dimensiones (mm) en los ejes x y y del soporte de los procesadores (Intel de Costa Rica, 2018).

Aprovechando la alta resolución de las imágenes proporcionadas se importan a AutoCAD y se “calibran”, es decir, se emplea una dimensión ya determinada para escalar la imagen de forma que una unidad en el programa corresponda a una unidad en la escala de la imagen. Las figuras escaladas sirven para extraer las demás dimensiones no indicadas explícitamente, permitiendo así, elaborar mapas bidimensionales de todas las partes de interés del sistema. Se emplean únicamente líneas, arcos y círculos para facilitar su ensamble en cuerpo cerrados y expansión a la tercera dimensión para formar los dominios.

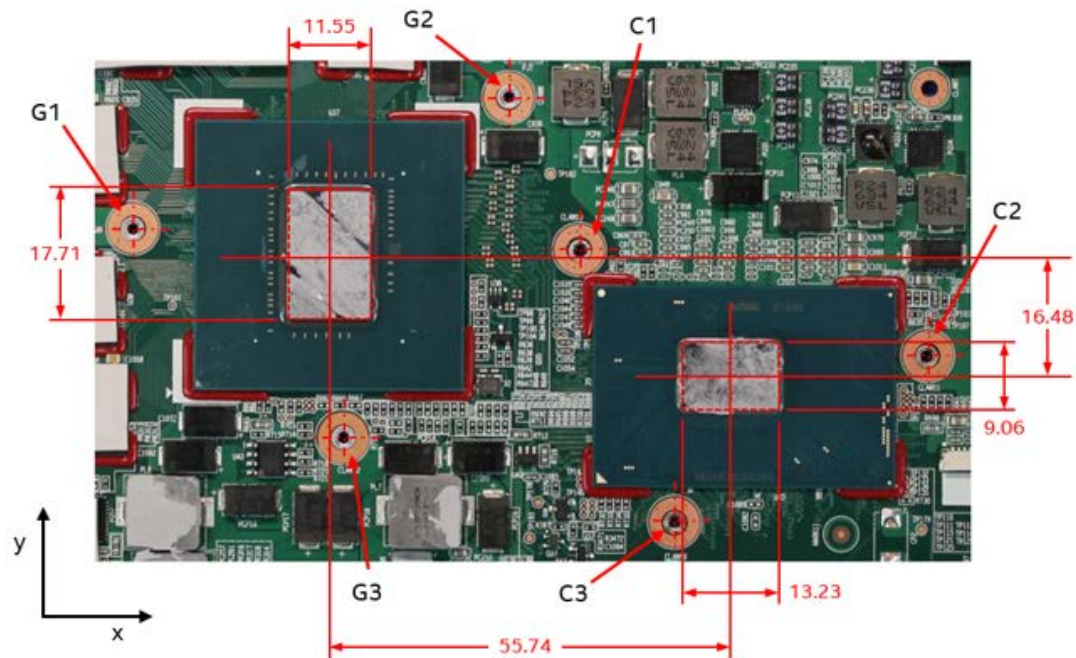


Figura 3.1.2. Dimensiones (mm) en los ejes x y y de los procesadores (Intel de Costa Rica, 2018).

Cuadro 3.1.1. Coordenadas para los puntos especificados en la Figura 3.1.2 (Intel de Costa Rica, 2018).

Punto	Coordenada en el eje x (mm)	Coordenada en el eje y (mm)	Diámetro interno (mm)	Diámetro externo (mm)
G1	-27.34	3.64	1.58	3.23
G2	24.91	22.23	1.60	3.23
G3	2.09	-25.32	1.59	3.24
C1	-20.87	17.32	1.71	3.14
C2	27.45	2.91	1.69	3.08
C3	-7.48	-20.42	1.66	3.30

Nota: El centroide de cada eje coincide con el centroide de área de cada procesador.

3.1.2. Sólidos en tres dimensiones

Con los mapas bidimensionales creados se dio profundidad a las partes del sistema empleando las dimensiones presentes en el Cuadro 3.1.2. Aunque en la información proporcionada no se indica la totalidad de las dimensiones de los elementos, fue posible deducir una mayoría y encontrar las demás en el momento de ensamblar todas las partes juntas.

Cuadro 3.1.2. Dimensiones en el eje z de diversos componentes del sistema (Intel de Costa Rica, 2018).

Parámetro dimensional	Valor (mm)
Grosor del CPU	0.56
Grosor del GPU	1.08
Grosor del substrato bajo el CPU	0.71
Grosor del substrato bajo el GPU	1.25
Grosor de la placa madre	1.05
Grosor de los soportes de los propagadores de calor	1.1
Grosor máxima del propagador de calor de aluminio sobre el CPU	3.09
Grosor del propagador de calor de cobre	1.06
Grosor general del propagador de calor del GPU	2.72
Grosor del propagador de calor del GPU sobre el canal de los tubos de calor	0.69
Distancia entre el panel inferior y los tubos de calor	1.54
Distancia entre los soportes y el teclado	0.45

Quedan dos tipos de elementos cuya construcción no fue simple: las aletas del dissipador de calor y los tubos de calor. Para las aletas se emplearon las dimensiones del Cuadro 3.1.3 para generar un cuboide rectangular y la función de *Matriz* en AutoCAD para generar una serie de aletas de iguales dimensiones y separación constante. Posteriormente se crean las “tapas” que unen las aletas y se genera una unión de los

elementos.

Cuadro 3.1.3. Dimensiones de las aletas de los disipadores de calor (Intel de Costa Rica, 2018).

Parámetro dimensional	Valor
Número de aletas por disipador	58
Grosor de las aletas	0.20 mm
Altura de las aletas	8.35 mm
Espaciado entre aletas	1.23 mm

Los tubos de calor fueron, por mucho, los elementos más complicados de construir. Para estos elementos, Intel de Costa Rica (2018) recomienda emplear un ancho de pared promedio de 0.2 mm. Se emplea el mapa bidimensional del tubo de calor, conformado como objeto completo; se coloca una línea de longitud del ancho de pared en dirección perpendicular interna para cada vértice, se crea una copia del tubo de calor, se mueve desde un vértice a la distancia señalada por la línea correspondiente y se escala para que una de sus dimensiones calce. Posteriormente se hace calzar cada uno de sus dimensiones con los nuevos vértices conformados por las líneas interiores y se traslada en una distancia igual en el eje z .

Con los dos objetos bidimensionales en la posición respectiva se extrude la cara en la magnitud requerida para formar los dos sólidos, uno dentro del otro. Se copia el sólido interno y se emplea la copia para substraer esta región del tubo de calor externo. Se obtienen dos sólidos por tubo de calor: el exterior corresponde a la pared de cobre y el interior al vapor, o la zona ocupada por él. Se repite este proceso para cada tubo de calor.

Además, se dividieron los elementos, mediante un corte transversal para separar los tubos de calor entre las zonas que están en contacto con los propagadores de calor metálicos y las zonas libres. Para las zonas sobre, o bajo, los propagadores de calor se especificará la capa de resistencia a la evaporación entre las caras en contacto internas de los tubos de calor.

Algunas de las geometrías se simplificaron para evitar zonas de elementos muy pequeños al momento de realizar el mallado del modelo y reducir la complejidad de la estructura. Un ejemplo serían los remanentes de los tubos de calor en un extremo de los mismos, estos se remplazan por terminaciones rectas para solucionar problemas con el mallado en el momento de la simulación.

3.1.3. Bloque de material de cambio de fase

Para las distintas configuraciones de PCM en el sistema de trabajo se parte del objeto sólido del substrato. Se copia y desplaza este cuboide hasta la posición deseada, se alteran sus dimensiones hasta el punto de interés y se le substraen copias de los elementos cuyos dominios interfieren. Las caras y puntos de referencia, así como las dimensiones finales de estos bloques se detallan en el Capítulo 4.

3.2. Simulación del sistema en estado estacionario

Posterior a la construcción de la geometría del sistema de trabajo se procedió con la configuración y simulación del estado estacionario del sistema. Para llevar esto a cabo se empleó un programa de simulación multifísica y las condiciones del sistema en estado estable proporcionadas por Intel de Costa Rica (2018) entre las características del sistema elegido.

La etapa de estado estacionario se realizó por dos motivos, para validar el sistema de simulación contra datos reales y como estado inicial para las variables al momento de simular el estado dinámico. Esta etapa de simulación se compone de tres partes definidas: la configuración del modelo, su verificación y, finalmente, su validación.

Para el modelado y la simulación se eligió el programa de simulación multifísica COMSOL Multiphysics[®] 5.1 (se denotará de ahora en adelante como COMSOL únicamente). Esto debido a su muy amplio repertorio de paquetes de físicas, materiales y

algoritmos de resolución por métodos numéricos; así también, como su disponibilidad en licencias adquiridas por la Universidad de Costa Rica y su uso en cursos anteriores de la carrera, lo que brinda una familiaridad con la interfaz y uso del sistema.

La construcción del modelo en COMSOL se realizó siguiendo la estructura de los módulos que componen un modelo en esta herramienta, exceptuando unos cuantos casos en los cuales fue necesario modificar un módulo más adelante para volver a los anteriores para una correcta configuración. La estructura de configuración fue la siguiente:

- Definiciones globales
 - Parámetros: se introdujeron las constantes del sistema y otros parámetros que se debían variar para alcanzar el estado estacionario válido.
- Componentes
 - Geometría: este módulo se empleó para importar la geometría generada en AutoCAD[®], generar los dominios del sistema y demarcar las zonas de unión entre caras.
 - Definiciones: sección en la cual se definieron las selecciones de dominios y fronteras, así como las variables de estudio.
 - Materiales: aquí se eligieron y asignaron los materiales de cada dominio y frontera. Además se crearon materiales nuevos y se les asignaron sus propiedades.
 - Físicas: este modulo contiene todas las especificaciones de los modelos físicos que describen el sistema, así como las condiciones iniciales y de frontera del sistema.
 - Mallado: sección designada para la configuración y construcción del mallado del sistema.
- Estudio

- Barrido paramétrico: se empleó cuando se deseaba correr la simulación repetidas veces variando el valor de uno o varios parámetros.
- Paso estacionario: se agregó para realizar un estudio en estado estacionario para determinar el estado final del sistema según las condiciones iniciales y físicas en trabajo.
- Presentación de resultados
 - Valores derivados: se empleó para tabular los resultados del sistema para los diferentes estudios.
 - Gráficos: se configuró para mostrar de manera visual las condiciones del sistema bajo diferentes criterios.

3.2.1. Modelos de prueba

A continuación no se planea explicar en abundancia la configuración de cada uno de los modelos de prueba empleados, sino, dar una breve reseña de algunos modelos creados, y necesarios, para llegar a un modelo de gran tamaño y complejidad como lo es el sistema de trabajo. Para esta cumplir esta tarea se crearon:

- Modelos pequeños en 2D con geometrías simples para probar el correcto funcionamiento de módulos y submódulos: mallado de un ensamble, acople de elementos en continuidades, barrido paramétrico y optimización.
- Modelo de solo el disipador de calor para probar su correcta configuración con físicas de flujo laminar, fluido compresible e incompresible, flujo turbulento y modelos de turbulencia.
- Modelo del sistema simplificado, conformado por un disipador de calor, dos tubos de calor y el GPU. Para probar formación del mallado por partes y correcto funcionamiento antes de pasar a la geometría completa.

- Modelo de disipador de calor de solo dos aletas, un tubo de calor y una entrada de calor para probar diferentes configuraciones para la física de flujo turbulento. Con el fin de solucionar un valor sin sentido en la simulación del sistema completo y analizar la convergencia en la temperatura del aire con respecto a la resolución del mallado en esta área.

3.3. Verificación del modelo

3.3.1. Análisis de sensibilidad de diferentes parámetros del sistema

Se realizaron pruebas para determinar el efecto de ciertos parámetros del sistema en estado final de la simulación. Empleando el módulo de *Barrido paramétrico* en la sección de *Estudio* del modelo. Se colocó un multiplicador al parámetro de estudio y se hizo variar su valor de 0.5 a 1.5.

- Efecto de la conductividad de los tubos de calor: los datos proporcionados por Intel de Costa Rica (2018) para los tubos de calor provienen de un modelo generado para tubos de calor de otro sistema, por lo que puede variar de los utilizados en el sistema de estudio. Por esta razón debe determinarse el efecto de la variación en esta variable.
- Efecto de la conductividad del vapor: por la misma razón que los tubos de calor, se debe comprobar el efecto de esta variable.
- Efecto de la conductividad de la resistencia a la evaporación en los tubos de calor: de igual manera a los parámetros para conductividad térmica de las otras partes de los tubos de calor, los valores proporcionados por Intel de Costa Rica (2018) son para un modelo en específico y pueden variar entre sistemas. Por lo que es preciso conocer su efecto.

- Efecto de la conductividad de la pasta térmica: este estudio se realiza por la misma razón que la resistencia a la evaporación, ya que diferentes sistemas pueden utilizar pastas térmicas de diferentes proveedores y distintas cantidades.
- Efecto del coeficiente convectivo de transferencia de calor en los disipadores: esta variable posee una gran importancia en la regulación del sistema por lo cual es preciso presentar su efecto.
- Efecto del coeficiente convectivo de transferencia de calor en el cuerpo del sistema: su efecto es menor que el de su homólogo en los disipadores pero de igual importancia para evitar la acumulación de calor en zonas alejadas de los tubos de calor y propagadores de calor, así como acercar el sistema a la realidad.
- Efecto de la potencia calórica en el CPU: aunque el calor generado en el CPU es constante en el estado estable, determinar su efecto puede ayudar a observar el comportamiento esperado al entrar en estado dinámico y como afecta este a todo el sistema.
- Efecto de la potencia calórica en el GPU: este estudio es indispensable ya que solo se posee la potencia máxima del GPU de acuerdo al fabricante, pero no el valor actual en el sistema de estudio.
- Efecto de la potencia de las resistencias variables cerca del CPU, en el punto caliente de la tarjeta madre y cerca de los chips: se requería determinar la potencia de los pares de VR en cada zona del sistema que se requiere para alcanzar la temperatura de los puntos calientes en la placa madre que los rodean.

3.3.2. Análisis de sensibilidad del mallado

Para determinar el efecto del mallado en la exactitud de los resultados del estado final de la simulación se realizó un análisis de sensibilidad. En este se variaron los parámetros de configuración de tamaño de los elementos. El cambio se realizó en el

submódulo de *tamaño general*, cuando uno de estos parámetros sobrepasa la fineza de otro parámetro de otra parte del mallado este se ve remplazado para evitar fallas e incongruencias.

Se eligen los tamaños recomendados por la aplicación por defecto para el sistema según las categorías siguientes:

- Grueso
 - Tamaño máximo de elemento = 20.6 mm.
 - Tamaño mínimo de elemento = 0.02 mm.
 - Tasa máxima de crecimiento de los elementos = 1.6.
 - Factor de curvatura = 0.7.
 - Resolución de regiones angostas = 0.4.

- Normal
 - Tamaño máximo de elemento = 20.6 mm.
 - Tamaño mínimo de elemento = 0.02 mm.
 - Tasa máxima de crecimiento de los elementos = 1.5.
 - Factor de curvatura = 0.6.
 - Resolución de regiones angostas = 0.5.

- Fino
 - Tamaño máximo de elemento = 20.6 mm.
 - Tamaño mínimo de elemento = 0.02 mm.
 - Tasa máxima de crecimiento de los elementos = 1.45.
 - Factor de curvatura = 0.5.

- Resolución de regiones angostas = 0.6.
- Extra fino
 - Tamaño máximo de elemento = 20.6 mm.
 - Tamaño mínimo de elemento = 0.02 mm.
 - Tasa máxima de crecimiento de los elementos = 1.35.
 - Factor de curvatura = 0.3.
 - Resolución de regiones angostas = 0.85.

3.4. Validación del modelo

Para confiar en los resultados de la simulación se debieron alcanzar valores en el estado estacionario, a TDP (*Thermal Design Power*) del CPU, que no varíen en gran medida a los obtenidos experimentalmente. Esto refleja que las propiedades de los materiales y las ecuaciones empleadas logran simular un sistema cercano a la realidad cuando se utilizan los mismos parámetros de entrada.

Los valores experimentales para el sistema de trabajo en potencia TDP fueron suministrados por el departamento de Diseño de Sistemas Termo-mecánicos de Intel de Costa Rica (Intel de Costa Rica, 2018). La variable asignada a cada posición se tabulan en el Cuadro **3.4.1**.

3.4.1. Determinación del estado más cercano a la realidad

Existían ciertas variables no conocidas para las cuales se debió estudiar su efecto en el sistema para determinar su valor correcto, o que llevan al sistema a un estado cercano a la realidad. Las variables se exponen a barridos paramétricos seguidos para refinar el resultado. Estos factores son:

Cuadro 3.4.1. Variables asignadas a los puntos de interés en estado estacionario en potencia TDP.

Posición de la termocupla	Variable asignada
SSD	T_SSD
PCH	T_PCH
Punto caliente de la placa madre	T_MB_Hotspot
Tubo de calor sobre el intercambiador de calor derecho	T_HP_Rightfan
Tubo de calor sobre el intercambiador de calor izquierdo	T_HP_Left-fan
Tubo de calor sobre el GPU	T_HP_GPU
Memoria RAM	T_Memory
Tubo de calor sobre el CPU	T_HP_CPU
VR cerca del CPU	T_VR_CPU

- Calor removido por convección en las aletas: al ser esta la principal salida de calor del sistema, se debe encontrar el valor de coeficiente convectivo de transferencia de calor en las aletas óptimo para alcanzar los perfiles de temperatura deseados.
- Potencia del GPU: solo se poseía el valor máximo del fabricante pero no cuanto calor producía al determinarse el estado estacionario experimental.
- Potencia de las resistencias variables: Intel de Costa Rica (2018) proporcionó un dato de aproximado para la potencia generada por los seis VR como un 10% de la potencia del CPU. Pero las simulaciones previas demostraron que la potencia de cada uno, o al menos, de cada par era distinta entre si. Por esta razón se debía determinar la potencia de cada par de VR por separado.

3.5. Simulación del sistema en estado dinámico

Cuando se habla del estado dinámico del sistema se hace referencia a un estudio de la variación de las variables y propiedades del sistema con respecto al tiempo al aplicar aumentos, “picos”, de potencia en el CPU. Estos picos se dan sobre la potencia TDP

por un tiempo específico, posteriormente, el sistema pasa a la potencia normal (PL1).

Estos estudios se realizan para las diferentes configuraciones de material de cambio de fase en la unidad de control térmico y distintos PCM. La construcción del sistema es muy similar para todos los casos, variando, únicamente, en los valores de los parámetros correspondientes a las propiedades del material y al mallado de cada ubicación.

Para la simulación en estado dinámico se emplea el modelo de estado estacionario como base y se aplican las modificaciones requeridas sobre este para asegurar su correspondencia con el modelo verificado y validado con anterioridad.

3.5.1. Configuración

La configuración del modelo para la simulación en estado dinámico se basó en el modelo desarrollado para el estado estacionario. Con las siguientes modificaciones:

- Se agregaron nuevos parámetros para la generación de los picos de potencia y las propiedades de los PCMs.
- Nueva selección para el PCM, variables de estudio y funciones para los picos de potencia.
- Diferentes geometrías para cada configuración de PCM en la unidad de control térmico.
- Nuevos materiales para los PCMs en estado sólido y líquido.
- Pequeños cambios en las físicas para incluir el cambio de potencia en el CPU y la capacidad de cambio de fase en el PCM.
- Cambios en el orden y configuración del mallado requeridos por los nuevos dominios introducidos.
- Un nuevo paso de estudio dependiente del tiempo que emplea los resultados del estado estacionario como estado inicial.

- Gráficos y valores derivados distintos para mostrar los resultados del nuevo estudio.

3.5.2. Selección de materiales

Con las simulaciones obtenidas durante el estudio del efecto de la potencia del CPU en la sección de *Verificación del sistema*, específicamente, a 1.0, 1.25 y 1.5 veces la potencia nominal, se extrajeron las temperaturas promedio y máximas de los diferentes puntos y regiones en futuro contacto con los PCM en sus distintas ubicaciones.

Esta información se empleó para filtrar de manera inicial entre los distintos materiales encontrados en la literatura, por las sustancias cuya temperatura de fusión se encuentre entre estos valores de temperatura. Para posterior filtrado y selección se eligieron aquellos con suficiente información disponible para todos los parámetros requeridos en la simulación.

Las propiedades requeridas para los materiales son las siguientes:

- Temperatura de fusión media en la curva que describe el cambio de fase.
- Rango de temperaturas que cubre el cambio de fase.
- Entalpía de fusión.
- Densidad en estado sólido.
- Densidad en estado líquido.
- Calor específico del sólido.
- Calor específico del líquido.
- Conductividad térmica de la fase sólida.
- Conductividad térmica de la fase líquida.

Se eligieron tres materiales cuya temperatura de fusión reportada se encontraba entre los valores obtenidos en las simulaciones mencionadas y para los cuales se lograron

obtener todos los datos requeridos para la simulación.

3.5.3. Simulación del sistema con varios picos de potencia

A continuación se enlistan las diferentes simulaciones y cambios en el modelo que se llevaron a cabo para obtener una simulación y resultados confiables:

- Simulación de 60 s con picos de 5 s y enfriamiento de 5 s para el sistema sin PCM para observar su comportamiento.
- Simulaciones para seleccionar el mejor algoritmo de resolución.
- Simulaciones empleando PCMs para observar el efecto de los parámetros del algoritmo de resolución.
- Cambios en los parámetros del sistema y del estudio para descifrar la razón de algunas simulaciones fallidas empleando PCMs.
- Corridas a 10 s y 20 s para observar el efecto de las diferentes configuraciones de tres materiales de cambio de fase en tres ubicaciones diferentes con 2 distintos volúmenes por ubicación.
- Simulaciones para determinar el efecto de la conductividad térmica del PCM.
- Múltiples simulaciones para determinar el comportamiento del sistema ante picos de menor duración pero mayor periodicidad durante el intervalo de tiempo de estudio.

Se detuvieron las simulaciones al encontrar nueva información acerca de la programación del “modo turbo” y reconocer el limitado enfoque que se tenía para la selección de materiales. Se realizó una evolución en el paradigma de estudio y selección del material de cambio de fase para la aplicación específica de este trabajo.

3.5.4. Cambio de paradigma

El método de estudio del trabajo se cambió con base en dos nuevas premisas: el tiempo de enfriamiento no es una constante del sistema, sino algo determinado por el sistema operativo con base en los requerimientos de los programas en ejecución; y se desea aumentar el tiempo efectivo de un pico de potencia empleando las propiedades del material de cambio de fase.

A este cambio en el estudio se le suma un nuevo enfoque en la forma en que seleccionamos el material de cambio de fase. No se inicia con un estudio del perfil de temperaturas para elegir una muestra de diferentes materiales, probar estos en el sistema de trabajo y realizar comparaciones. Ahora se parte de más refinados perfiles de temperatura para encontrar la mejor temperatura media de fusión del PCM, determinar el efecto de las diferentes propiedades del material de cambio de fase y poder comparar con un material real.

Simulación del sistema con un solo pico de potencia

A continuación se mencionan las diferentes simulaciones llevadas a cabo para el nuevo estudio en orden cronológico:

- Estudio del efecto del mallado del CPU y el tamaño del paso de tiempo en el sistema sin PCM.
- Estudio del comportamiento del sistema en un solo pico para los tres materiales de estudio anteriores, las tres ubicaciones del PCM y las dos variaciones de masa por localización.
- Simulación de un material idóneo en la localización de mayor efecto en sus dos variaciones de masa.
- Estudio de las propiedades del material idóneo en la configuración de mayor efecto.

- Simulaciones para la determinación de la temperatura de fusión media más efectiva para la configuración de mayor efecto.
- Cambio en los parámetros de paso de tiempo para aumentar la confianza de los resultados, pero, disminuyendo el tiempo y el peso de las simulaciones.
- Nuevo estudio de las propiedades para el PCM idóneo en la configuración de mayor efecto con los cambios anteriores aplicados.
- Estudio del PCM idóneo en las diferentes configuraciones.
- Determinación de la temperatura de fusión idónea para los sistemas en las otras dos configuraciones y el sistema con un aumento en la potencia del pico.
- Comparación del material perfecto con un PCM seleccionado de la teoría con propiedades cercanas a la idoneidad.

Método de determinación de un material idóneo para la aplicación de estudio

Con los resultados de tantas simulaciones se procedió a construir el algoritmo para la determinación y selección de un material de cambio de fase, su ubicación y masa adecuada, en un sistema de construcción semejante al estudiado para extender el tiempo de los picos de potencia del procesador central durante los ciclos de potencia.

Capítulo 4

Diseño tridimensional del sistema de trabajo

El modelado de cualquier sistema para simulación parte de la definición de los dominios o fronteras del caso de estudio. El presente trabajo no es excepción, pero, antes de proceder con el diseño del sistema se debe decidir en un punto importante: ¿cuál sistema?

Para dar una respuesta a esta pregunta y ser capaces de elegir el sistema de trabajo se debe tener claro el enfoque del problema: se desea observar y comparar el efecto de colocar materiales de cambio de fase en zonas del sistema para apaciguar el incremento de temperatura en la unidad central de procesamiento de la computadora causado por aumentos en la potencia de trabajo en los ciclos de “modo turbo”.

Con el enfoque claro se procede a decidir el tipo de sistema de computo. De manera comercial se trabajan en tres categorías: computadoras de escritorio, portátiles (*laptops*) y dispositivos móviles (como celulares y tabletas). Las computadoras de escritorio cuentan con gran espacio para colocar la unidad de material de cambio de fase, pero, a su vez, cuentan con muy efectivos sistemas activos de extracción de calor debido a la disponibilidad de espacio lo que vuelve relativamente innecesario implementar la

solución de estudio en estos sistemas.

En el caso de los dispositivos móviles y computadoras portátiles el espacio es reducido y la tendencia del mercado apunta a una disminución del mismo. Esto convierte a estos sistemas como ideales para la implementación de la solución térmica de enfoque. Para ayudar en la discriminación, se toman en cuenta sistemas que cuenten con un método activo de remoción de calor para asegurar la rápida extracción del calor introducido en el PCM. Esto descarta la mayoría de dispositivos celulares y muchas tabletas.

Un factor importante es, como se menciona anteriormente, la existencia de espacio físico considerable para colocar la unidad de control térmico de trabajo. Por esta razón se decide un enfoque en las computadoras portátiles. El departamento de Diseño de Sistemas Termo-mecánicos de Intel Costa Rica facilita un listado de sistemas estudiados y para los cuales se cuenta con suficiente información del estado TDP para validar una simulación en estado estacionario (requisito de este trabajo).

Entre las cinco opciones disponibles se tomó una decisión con base en los siguientes criterios:

- Un modelo reciente: para enfocar la solución térmica en miras al futuro de esta tecnología.
- Una separación física considerable entre los procesadores: para aislar el efecto cruzado entre las distintas fuentes de calor.
- Espacio disponible suficiente en los tres ejes espaciales: este requerimiento es indispensable para la implementación de la solución de estudio.
- Una complejidad considerable: como decisión personal se desea un sistema que no sea relativamente fácil de diseñar pero tampoco con una complejidad que dificulte trabajar en el verdadero enfoque del trabajo.

Tomando en cuenta los criterios anteriores se decide por un sistema el cual se muestra

en la Figura 4.0.1. Por motivos de derechos legales se priva de revelar la marca y modelo del computador, pero, como se observa, el mismo cumple con todos los puntos y presenta retos de diseño y estudio interesantes. Sus dimensiones se señalarán más adelante.

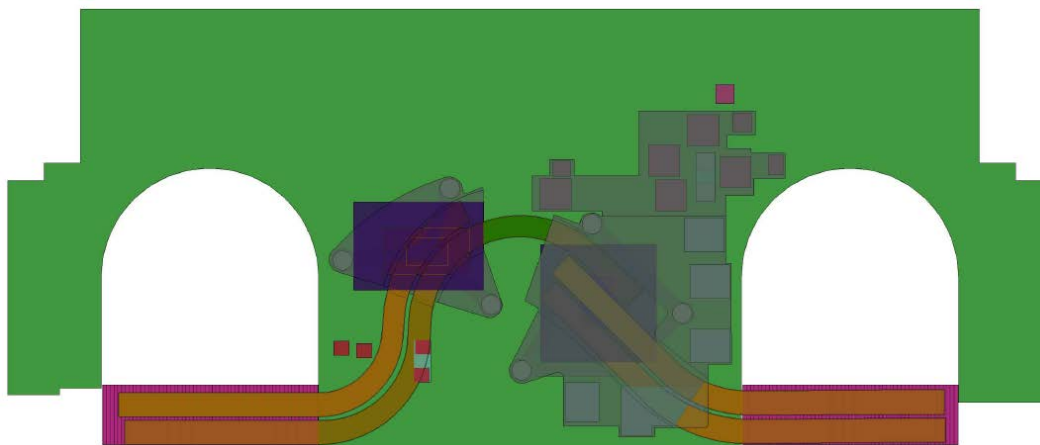


Figura 4.0.1. Vista superior en transparencia de la geometría del modelo diseñada en AutoCAD[®] (Elaboración propia, 2019).

Al modelar un sistema físico, se debe aprovechar toda simetría y factibles suposiciones para simplificar el modelo de estudio. Lastimosamente, para el sistema de trabajo no existen simetrías considerables en su geometría. Aunque si existen suposiciones que se pueden llevar a cabo para simplificar el sistema de trabajo, como asumir la generación de calor de los demás componentes del sistema, aparte de los procesadores y las resistencias variables, como despreciables. De esta manera se opta por eliminar dichos componentes del sistema, entiéndase: demás chips y circuitos integrados de la placa madre, batería, disco duro, memoria RAM, entre otros. Además, se desea un enfoque en el efecto térmico en la zona cercana al procesador central, lo cual nos permite ignorar en el sistema (mientras que su efecto se tome en cuenta de manera generalizada) la carcasa y demás componentes de entrada y salida de la computadora. Esto resulta en el sistema presente en la Figura 4.0.1.

4.1. Sistema sin PCM

A continuación se especifican las partes que conforman el sistema de cómputo elegido y modelado en el trabajo. Se hace también una breve explicación de la función, con respecto al sistema de control térmico, de cada una de estas partes así como los materiales de fabricación generales (las especificaciones exactas de los materiales son propiedad del fabricante).

La geometría de algunas de las partes del sistema fueron simplificadas para evitar problemas al momento de la simulación. Muchos de estos problemas surgieron durante el proceso de modelado por lo que se muestra es el resultado final del modelo posterior a todas las simplificaciones y cambios. Se mencionarán los cambios realizados cuando sea necesario.

Unidades de procesamiento

Los sistemas modernos de computadores cuentan con dos tipos principales de unidades de procesadores: la unidad central de procesamiento (CPU; *Central Processing Unit*), conocido como el procesador central o principal, se encarga de llevar la aritmética, lógica, control y operaciones de entradas y salidas requeridas por el software. La unidad de procesamiento gráfico (GPU; *Graphics Processing Unit*) ayuda a la rápida generación de imágenes para los gráficos a mostrar en pantalla (Clements, 2006).

Los procesadores se fabrican de silicio de muy alta pureza, con filamentos internos de cobre que conforman los circuitos lógicos (Intel, 2015).

Para el sistema de trabajo, al ser una computadora especializada para el uso de videojuegos, ambos procesadores se encuentran separados por una considerable distancia física, como se visualiza en la Figura 4.1.2, y cuentan con sistemas de remoción de calor casi independientes, con una pequeña dependencia en un tubo de calor. Esto se debe a la alta generación de calor por parte de cada uno de ellos.

La Figura 4.1.2 muestra las dimensiones de las unidades de procesamiento cada una

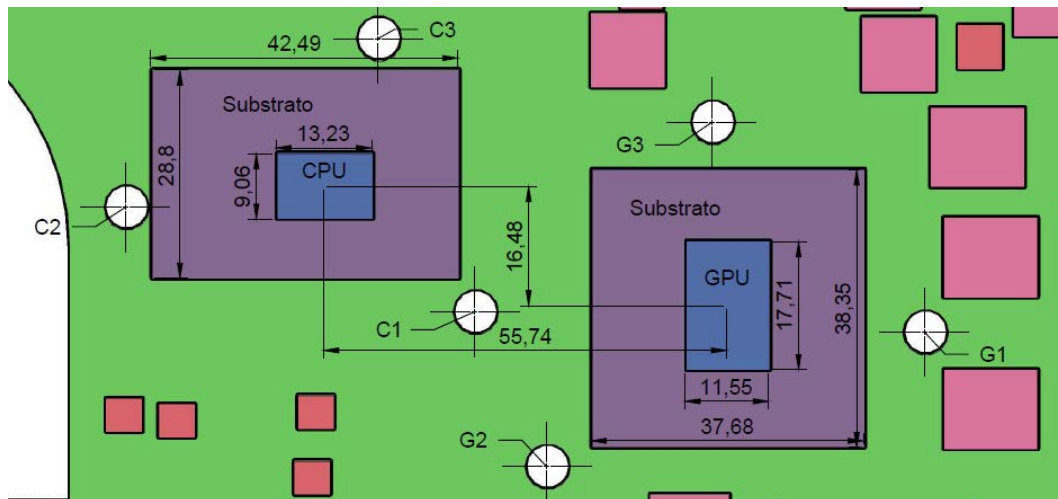


Figura 4.1.2. Dimensiones (mm) de los procesadores y sus respectivos substratos para el modelo final, vista superior (Elaboración propia, 2019).

sobre su respectivo substrato. Los agujeros numerados corresponden a los accesos en la placa madre para la conexión entre los propagadores de calor y sus soportes según la Figura 3.1.2.

Los substratos son placas de un material compuesto de fibra de vidrio y resina epoxi, comúnmente llamado FR-4 (*Flame Retardant 4*), y filamentos de cobre para los circuitos (Sarvar *et al.*, 1990). Sirve como interfaz de conexión entre el procesador y el resto del sistema, a través de la tarjeta madre.

Propagadores de calor

El sistema de trabajo posee tres unidades de propagadores de calor. Una sobre el procesador central, una sobre el procesador gráfico y un propagador secundario sobre los chips y resistencias variables en contacto con el propagador del GPU.

En la Figura 4.1.3 se presentan algunas dimensiones en el plano xy para los tres propagadores de calor. Junto con señalizaciones para los centroides de las zonas de conexión con los soportes. La Figura 4.1.4 muestra una vista en transparencia del

propagador de calor sobre el GPU con más dimensiones. En esta vista se puede observar los canales por los cuales pasan los tubos de calor y las zonas de acople con el soporte del propagador.

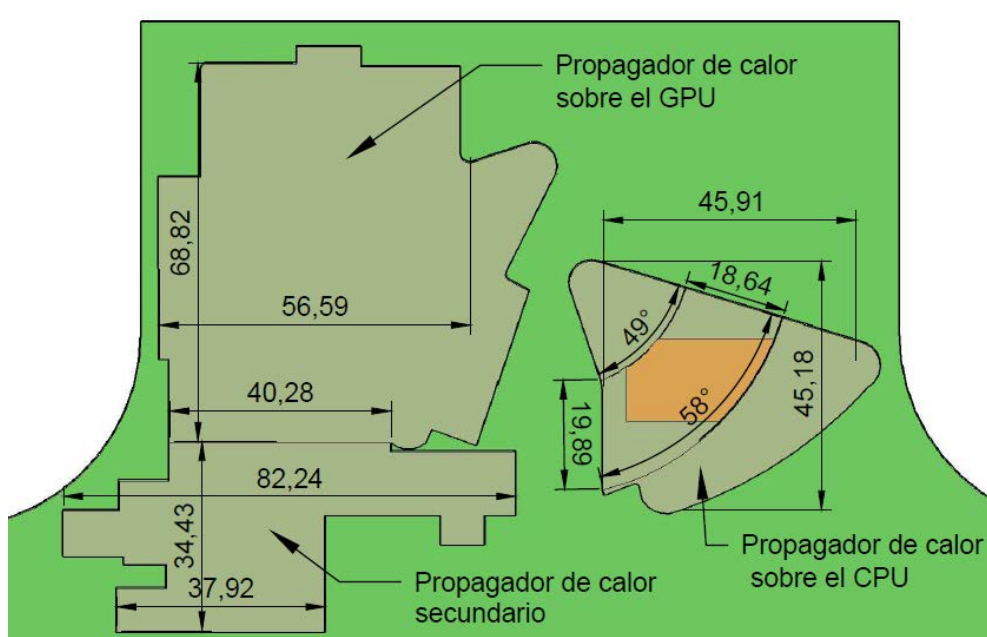


Figura 4.1.3. Dimensiones (mm) de los propagadores de calor sobre los procesadores para el modelo final, vista superior (Elaboración propia, 2019).

El material empleado para los propagadores es aluminio, pero, para el caso del CPU se coloca un pequeño propagador de cobre, ver Figura 4.1.5, el cual debe ayudar para una rápida distribución del calor proveniente de la mayor fuente del sistema, el CPU. Los fabricantes, probablemente, eligen cobre para esta aplicación debido a su relativo bajo costo y alta conductividad térmica, por el contrario, no se emplea para toda la estructura debido a su alta maleabilidad. Ya que los propagadores se exponen a cierta compresión para asegurar el contacto con las fuentes de calor y el cobre se deforma más fácilmente que el aluminio.

Para ayudar a fijar los propagadores de calor en el lugar y asegurar el contacto de estos con las fuentes de calor se emplean soportes en la base de la tarjeta madre, ver

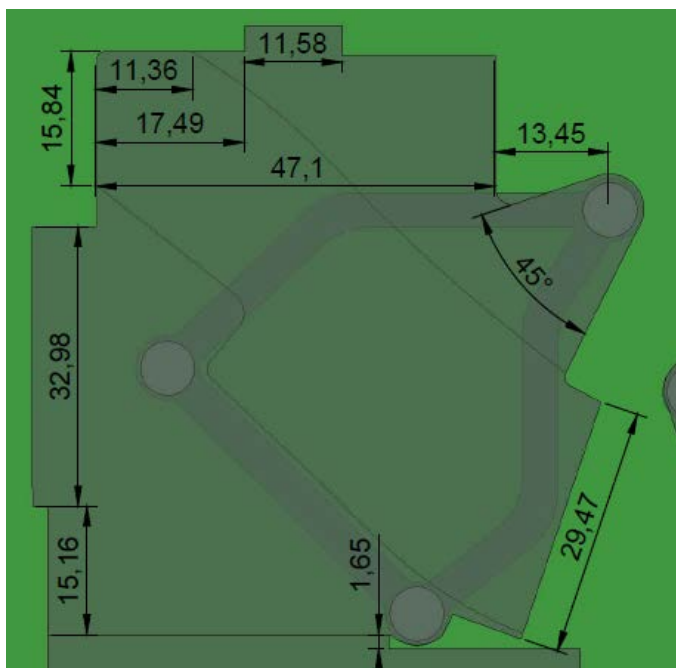


Figura 4.1.4. Dimensiones (mm) del propagador de calor sobre el GPU para el modelo final, vista superior (Elaboración propia, 2019).

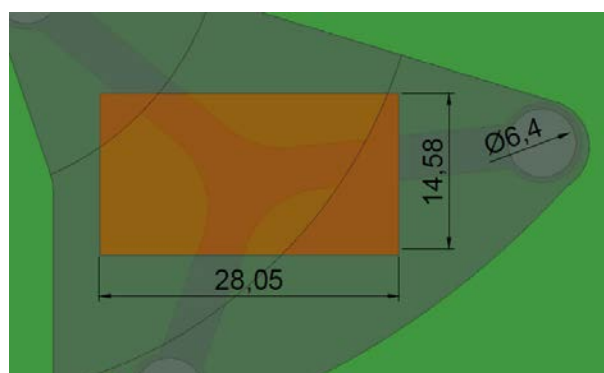


Figura 4.1.5. Dimensiones (mm) del propagador de calor sobre el CPU para el modelo final, vista superior (Elaboración propia, 2019).

Figura 4.1.6. Estos se acoplan a los propagadores con tornillos que se fijan con gran precisión y cuidado al momento de ensamblar el sistema para asegurar el contacto de toda la superficie pero evitando fragmentar los procesadores o colocar demasiada carga

mecánica sobre los mismos.

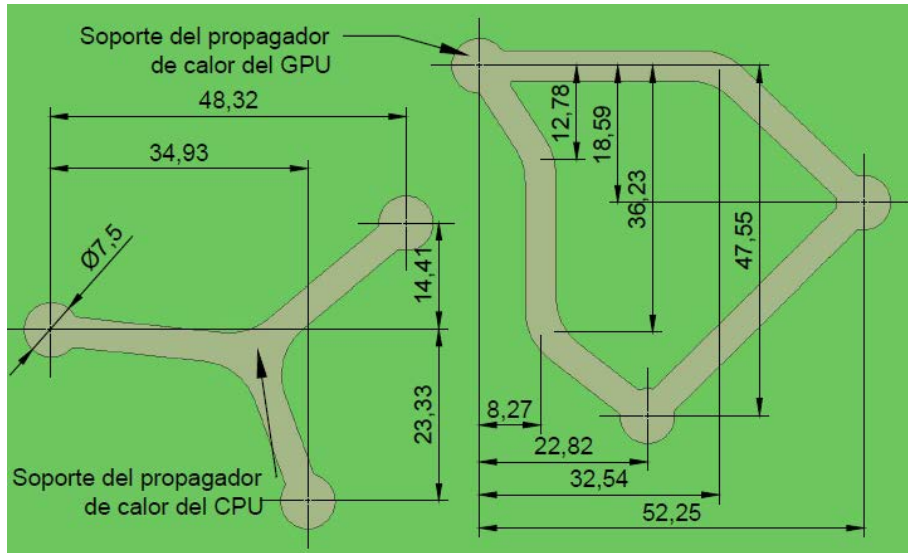


Figura 4.1.6. Dimensiones (mm) de los soportes de los propagadores de calor, vista inferior (Elaboración propia, 2019).

La Figura 4.1.6 muestra las dimensiones de los soportes de los propagadores de calor así como señalizaciones para los centroides de las zonas de conexión con los propagadores.

Tubos de calor

El calor proveniente de los procesadores es conducido desde las fuentes hasta los disipadores de calor por medio de los tubos de calor. El sistema de trabajo está conformado por cuatro de estos tubos cuya configuración se muestra en la Figura 4.1.7. La razón exacta para esta peculiar combinación de cantidad y posición de los tubos de calor es conocida únicamente por el fabricante del sistema de computo.

Se puede observar en la Figura 4.1.7 que uno de los tubos de calor es compartido por el procesador gráfico y el central, lo que asegura una dependencia entre el calor generado por el GPU y la temperatura del CPU, y viceversa. Por otra parte, la Figura

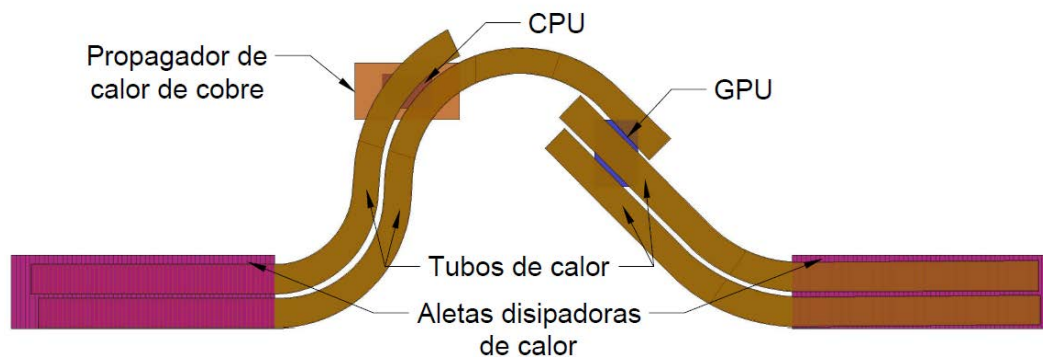


Figura 4.1.7. Dimensiones (mm) del sistema activo de control térmico para el modelo final, vista superior (Elaboración propia, 2019).

4.1.8 muestra las dimensiones en el eje z de los procesadores, propagador de cobre y los tubos de calor. Se puede observar que para el caso del CPU se emplea una placa de cobre como propagadora de calor entre el procesador y los tubos de calor. Esto para ayudar en la distribución del calor y compensar por la altura restante para llegar al nivel de los tubos de calor alineados a la altura del GPU. Además, la placa de cobre asegura un completo contacto, a través de la pasta térmica, entre la cara superior del CPU y el sistema de control térmico.

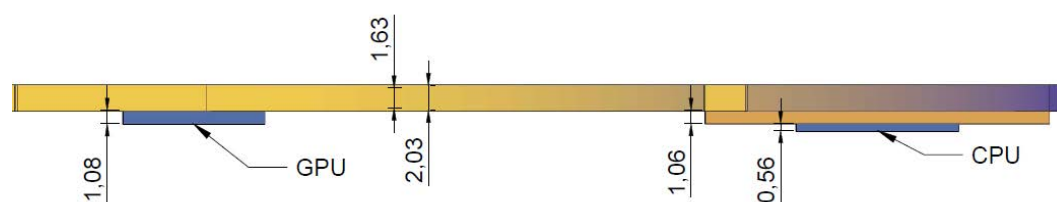


Figura 4.1.8. Dimensiones (mm) del sistema activo de control térmico para el modelo final, vista frontal (Elaboración propia, 2019).

Los tubos de calor se construyen, como se explicó con anterioridad en el Capítulo 3, con dos bloques: la carcasa hueca de cobre con un grosor de 0.20 mm y el vapor interno. Esto para relacionar el mismo con el método de modelado de sistemas con tubos de

calor empleado en el departamento de Diseño de Sistemas Termo-mecánicos de Intel de Costa Rica.

Disipadores de calor

El sistema de trabajo cuenta con dos disipadores de calor de aletas, cada uno con 58 aletas de 0.20 mm de espesor, sus dimensiones se especifican en el Cuadro 3.1.3. Su función es aportar una gran área de contacto con el fluido, aire, proveniente de los ventiladores, uno para cada disipador. Una mayor área propicia una mayor transferencia de calor por convección. Las dimensiones de los disipadores de calor se presentan en la Figura 4.1.9.

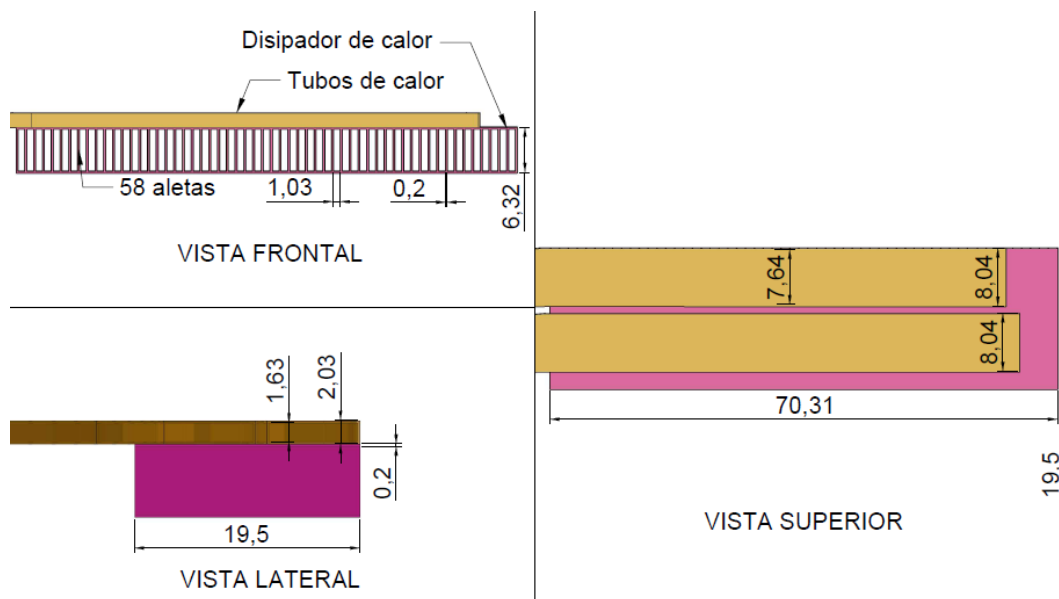


Figura 4.1.9. Dimensiones (mm) de las aletas del sistema activo de control térmico para el modelo final (Elaboración propia, 2019).

Los disipadores se encuentran en contacto directo con los tubos de calor, asegurando así la remoción de calor de las fuentes. Estos son fabricados completamente de cobre en lo que parece ser una sola pieza. El área superficial de contacto con el fluido de cada propagador es de 309 cm².

Tarjeta madre, chips y demás componentes

La tarjeta madre sirve como base física y electrónica para la interconexión de todos los componentes del sistema de computo así como vía para la alimentación eléctrica de cada uno de ellos (Clements, 2006). Contiene los circuitos eléctricos de cobre y se fabrica del mismo material que los substratos de los procesadores, FR-4, (Sarvar *et al.*, 1990). Para el sistema de trabajo, como se observa en la Figura 4.1.10, incluimos solamente la parte de la tarjeta madre que se encuentra próxima a los elementos de trabajo. La misma cuenta con dos espacios considerables donde se alojan los ventiladores y una serie de seis agujeros que permiten la conexión entre los propagadores de calor y sus respectivos soportes.

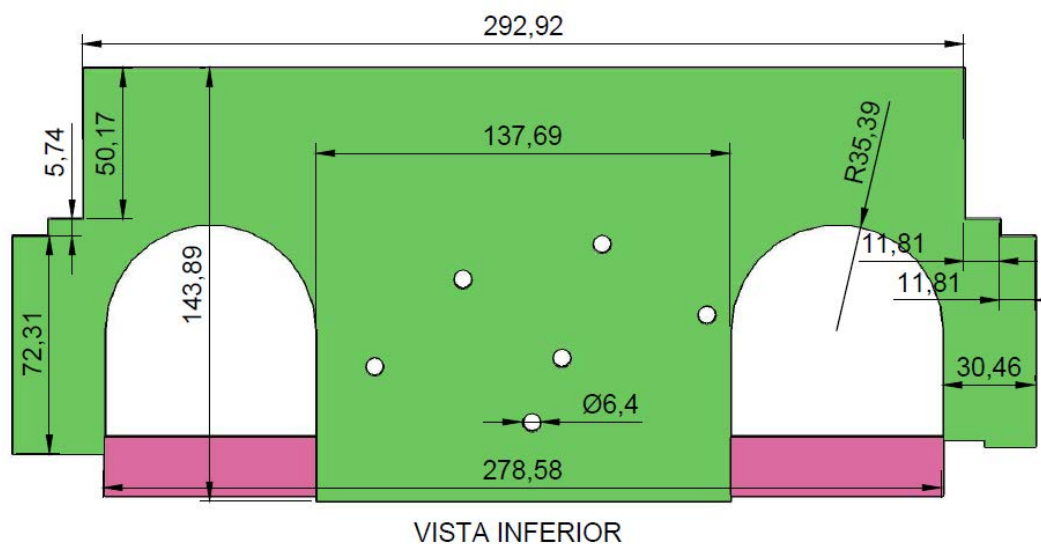


Figura 4.1.10. Vista inferior de la tarjeta madre para el modelo final (Elaboración propia, 2019).

Unas fuentes de calor que afectan los perfiles térmicos del sistema de trabajo son las resistencias variables (*variable resistors; VR*). Estas cumplen la función de variar la cantidad de corriente que fluye o se alimenta a un circuito. Durante su función liberan energía en la forma de calor. Como se muestra en la Figura 4.1.11, en el sistema

existen tres pares de VRs con considerable influencia en la temperatura de las zonas circundantes: dos cerca del CPU, dos bajo un tubo de calor, también cerca del CPU y uno en la zona cercana al GPU entre varios chips.

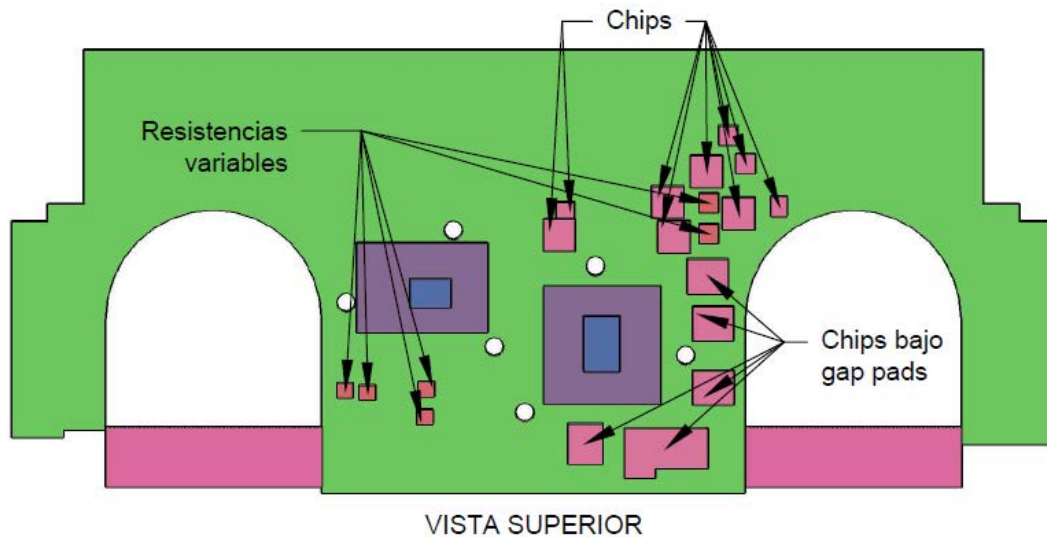


Figura 4.1.11. Vista superior de la tarjeta madre para el modelo final (Elaboración propia, 2019).

Estas resistencias variables contienen un filamento metálico en su interior cubierto por una capa de cerámica. Para la simulación se consideran como una sola pieza de óxido de silicio, ya que solo interesa como fuente de calor no variante durante el tiempo.

Otros componentes presentes en el sistema son una serie de chips. Estos cumplen diferentes procesos de cálculos dentro del sistema y su efecto térmico es considerado despreciable, pero, se toman en cuenta como estructuras que absorben calor y brindan un puente térmico entre los propagadores de calor y la tarjeta madre. Se fabrican principalmente de silicio y en el sistema de trabajo, como se ve en la Figura 4.1.11, los dividimos en dos clases: los que cuentan con una almohadilla térmica entre ellos y los propagadores de calor y los que no.

La almohadilla térmica (*Gap pads*) sirve como puente entre el propagador y los chips (y dos pares de VRs, uno bajo un tubo de calor) para habilitar el flujo de calor entre estos elementos y evitar el daño por tensión mecánica al ajustar el propagador de calor del GPU. En la Figura 4.1.12 se visualiza la localización de cada almohadilla y sus dimensiones. El material de las almohadillas varía entre sistemas y es de propiedad intelectual del fabricante.

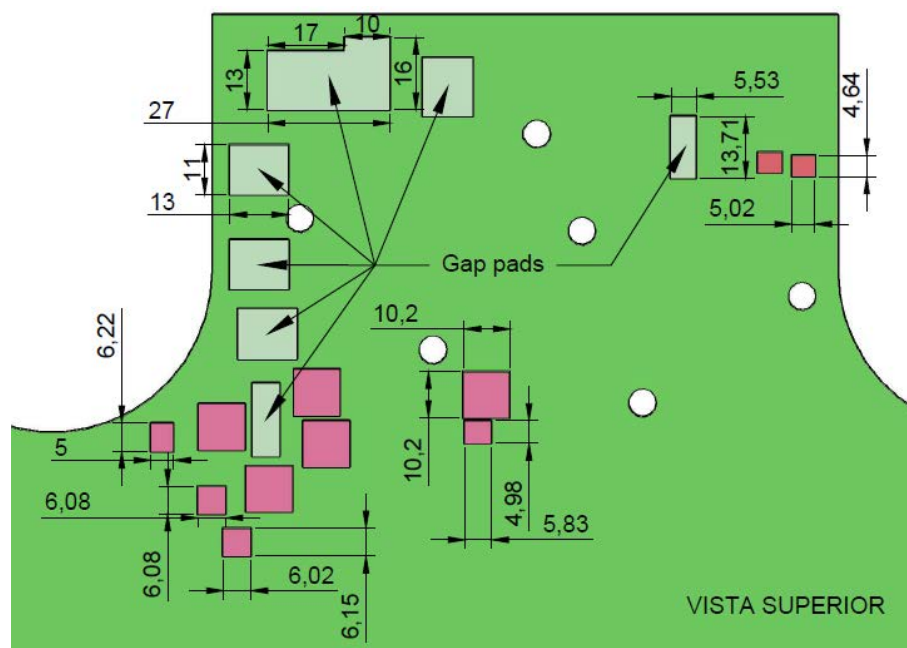


Figura 4.1.12. Dimensiones (mm) de los chips y resistencias variables cercanas a los procesadores en el modelo final (Elaboración propia, 2019).

4.2. Sistemas con material de cambio de fase en sus diferentes configuraciones

Para el diseño de las unidades de control térmico empleando PCMs se decide elegir tres ubicaciones distintas para el bloque de material de cambio de fase y dos variaciones en su volumen. Esto genera un total de seis configuraciones distintas.

Entre toda la dimensión del sistema se debe decidir las localizaciones más lógicas para colocar el PCM, es decir, los potenciales lugares donde el efecto sea el más significativo. Como se sabe, la transferencia de calor depende de la diferencia de temperatura entre dos puntos, la distancia relativa entre ellos y la conductividad térmica de los componentes en esa distancia. Además, el fenómeno de estudio se basa en un incremento de corta duración de la potencia calórica. El flujo de calor se ve disipado conforme el mismo atraviesa el sistema de enfriamiento a causa de la ley de enfriamiento de Newton y la absorción de calor de forma sensible por los componentes del sistema.

Estas dos características limitan a considerar aquellas zonas las cuales se encuentran próximas a la fuente de calor y en contacto a través de capas con baja resistencia térmica. Este supuesto es comprobado posteriormente con datos de la simulación en estado estacionario.

Para la variación en el volumen se toman en cuenta criterios meramente geométricos y estructurales, pero que generen una diferencia considerable entre los volúmenes de los bloques de PCM. El criterio geométrico se basa en emplear dimensiones existentes en el sistema para facilitar la creación de los bloques y posterior mallado de los dominios y fronteras.

De manera estructural, al variar las dimensiones de los bloques de PCM se hace de forma tal que no afecte las dimensiones de otras partes del sistema ni entre en contacto con componentes no tomados en cuenta en el diseño, ya que esto afectaría los flujos de calor de formas no predecibles por el modelo de trabajo.

La variación del volumen de los bloques se realiza para determinar el posible efecto de un aumento en la masa del PCM en la solución térmica de estudio.

4.2.1. Sistema con PCM a los alrededores del CPU

Se ubica un pequeño volumen de PCM rodeando el CPU con las dimensiones del propagador de calor de cobre de la Figura 4.2.13. La altura del mismo se ve reducido a

0.56 mm debido a que es el espacio disponible entre el propagador de calor y el substrato del CPU según la Figura 4.2.14.

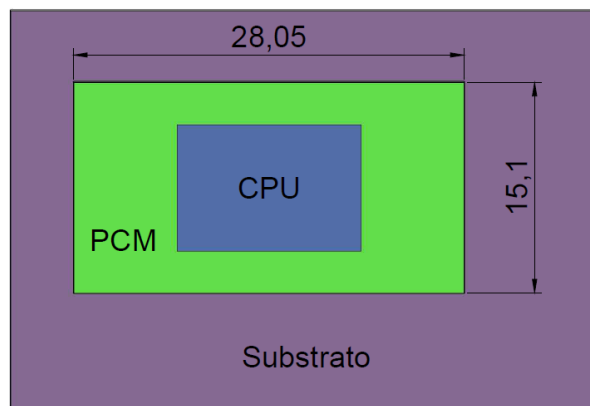


Figura 4.2.13. Vista superior del sistema con PCM a los alrededores del CPU, menor volumen (dimensiones en mm) (Elaboración propia, 2019).

Este sistema se espera que posea el mejor rendimiento al estar en contacto directo con la fuente de calor. Pero al ser un volumen tan pequeño su efecto puede verse limitado. El volumen del PCM para esta configuración es de: 170.1 mm^3 .

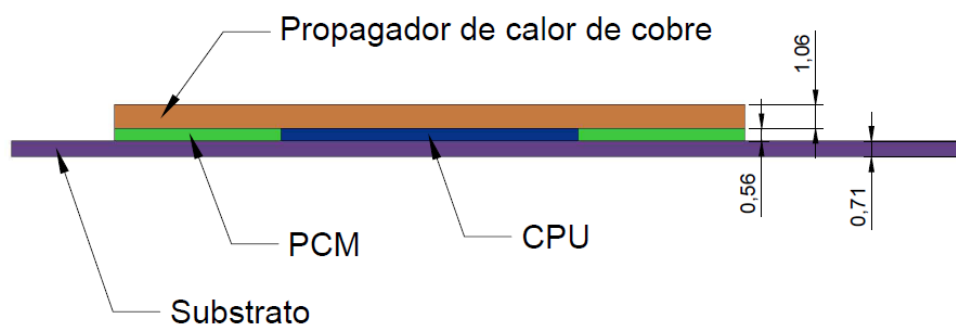


Figura 4.2.14. Vista frontal del sistema con PCM a los alrededores del CPU, menor volumen (dimensiones en mm) (Elaboración propia, 2019).

Para el aumento en el volumen del sistema con PCM a los alrededores del procesador central se elige ampliar las dimensiones longitudinales hasta adoptar las medidas del substrato en la Figura 4.2.15. Siempre manteniendo la altura del bloque dentro del

espacio disponible, al igual que en el caso anterior, entre el substrato y los propagadores de calor, ver Figura 4.2.16. El volumen del PCM para esta configuración es de: 618.3 mm^3 .

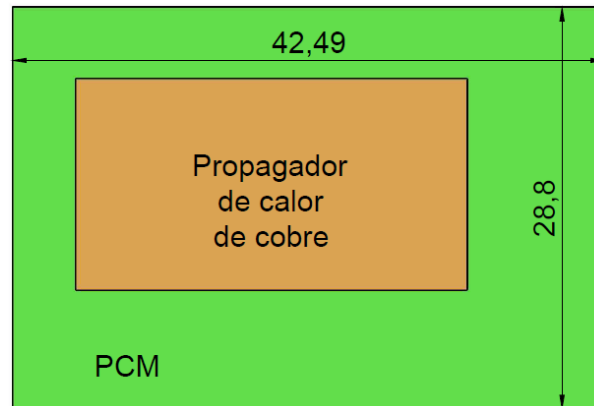


Figura 4.2.15. Vista superior del sistema con PCM a los alrededores del CPU, mayor volumen (dimensiones en mm) (Elaboración propia, 2019).

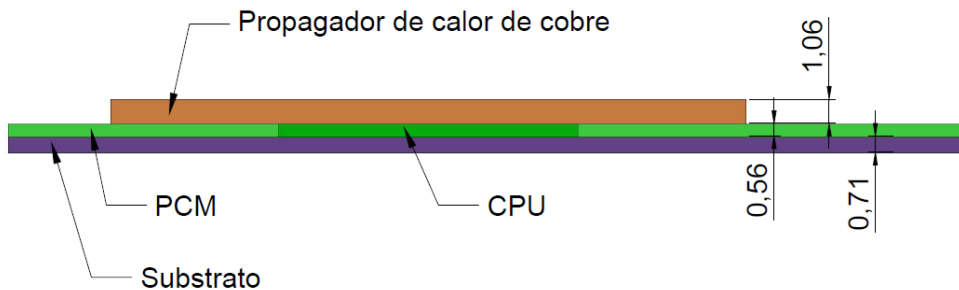


Figura 4.2.16. Vista frontal del sistema con PCM a los alrededores del CPU, mayor volumen (dimensiones en mm) (Elaboración propia, 2019).

4.2.2. Sistema con PCM bajo la unidad de control térmico

Este sistema puede verse como el más tentador, ya que cuenta con área de contacto suficiente sin tantos obstáculos para colocar el PCM y con suficiente espacio en el eje z para aumentar su altura y con esto su volumen.

Para su construcción se emplean las dimensiones del sustrato del CPU y su ubicación espacial con un desplazamiento en el eje z para ubicarlo sobre la placa madre y el soporte del propagador de calor, como se observa en la Figura 4.2.17.

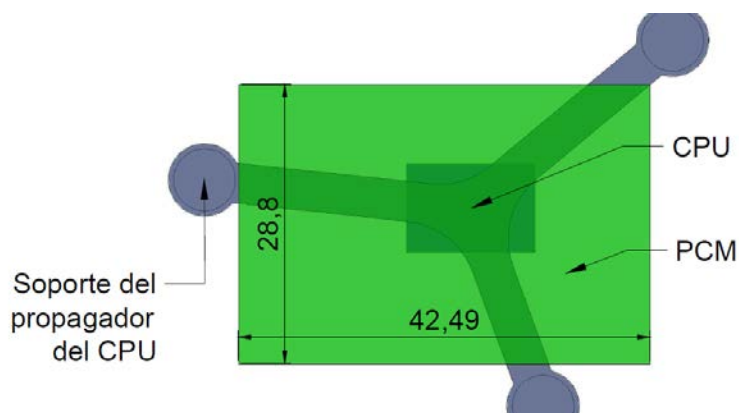


Figura 4.2.17. Vista superior del sistema con PCM bajo la unidad de control térmico, menor volumen (dimensiones en mm) (Elaboración propia, 2019).

Se espera que los soportes de aluminio ayuden a distribuir el calor por el bloque de PCM de mejor manera que la placa madre debido a las diferencias de conductividades térmicas y que los propagadores se encuentran incrustados dentro del material, aumentando así el contacto y facilitando la distribución de calor hacia mayores profundidades, ver Figura 4.2.18. El volumen del PCM para esta configuración es de: 1456 mm^3 .

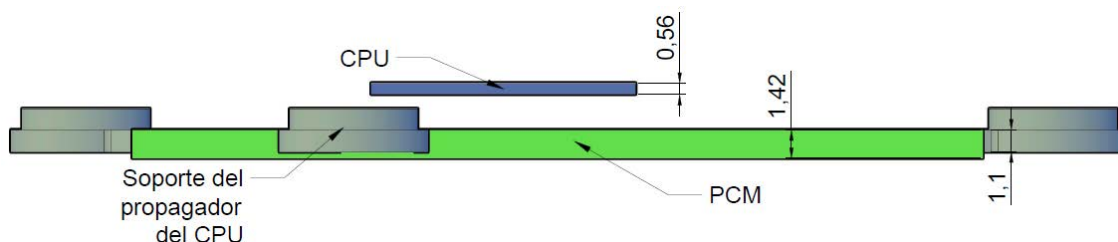


Figura 4.2.18. Vista frontal del sistema con PCM bajo la unidad de control térmico, menor volumen (dimensiones en mm) (Elaboración propia, 2019).

En el caso del sistema con PCM bajo la unidad de control térmico con un volumen mayor se mantienen las mismas dimensiones espaciales en los ejes x y y , presentando no

variación con respecto a las dimensiones de la Figura 4.2.17. Esto con el fin de evitar alejarnos demasiado de la zona caliente.

El espacio disponible entre la placa madre y la parte inferior del teclado es de 1.55 mm, lo cual indica que nuestro sistema de menor volumen ocupa casi todo el espacio disponible. Con base en esto, se propone aumentar la dimensión en el eje z del sistema con PCM bajo el sistema de control térmico de 1.42 mm hasta 10 mm, ver Figura 4.2.19. Con el fin de asegurar obtener una diferencia significativa en los resultados, a pesar de que en un sistema real no se desea un contacto con el teclado para evitar sobrepasar los límites de temperatura para las zonas de contacto directo para el usuario. El volumen del PCM para esta configuración es de: 11 960 mm³.

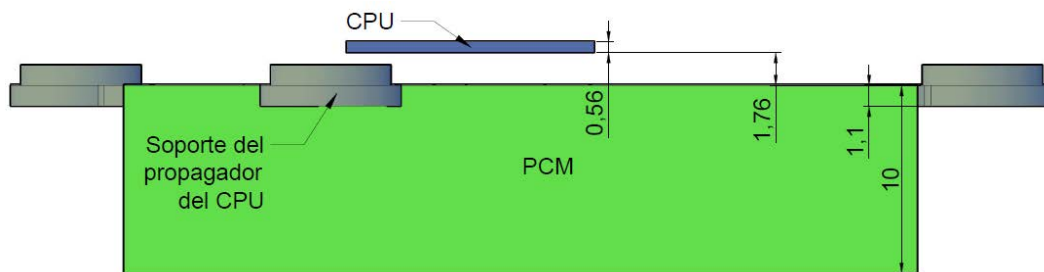


Figura 4.2.19. Vista frontal del sistema con PCM bajo la unidad de control térmico, mayor volumen (dimensiones en mm) (Elaboración propia, 2019).

4.2.3. Sistema con PCM sobre la unidad de control térmico

Como tercera alternativa de posición para el PCM se diseña su colocación sobre la TCU. Esta configuración se considera adecuada ya que pretende aprovechar la dirección del flujo de calor, así como la rápida remoción de esta energía por medio de los tubos de calor. Una aparente desventaja es su distancia con respecto al procesador.

Para su diseño se toma como base las dimensiones del substrato, al igual que se realizó con la configuración anterior, pero extendiendo un poco sus dimensiones para cubrir completamente algunas áreas del propagador de cobre, como se puede observar

en la Figura 4.2.20. Esto para aprovechar la función de distribución de calor brindada por los propagadores y evitar complicaciones en el mallado por dejar fuera de cobertura áreas muy pequeñas de los dominios.

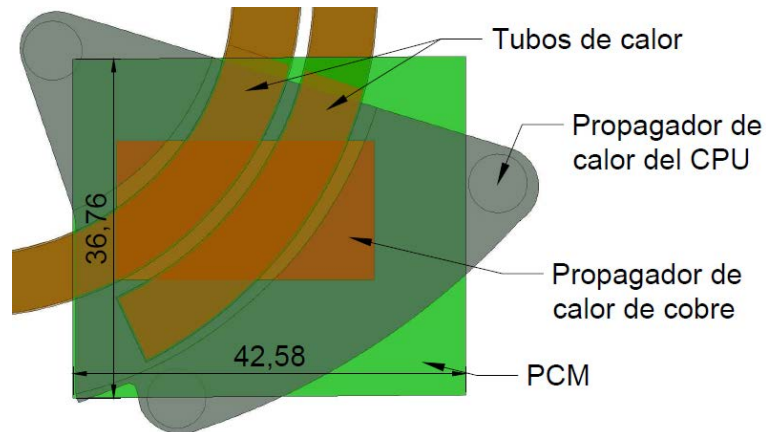


Figura 4.2.20. Vista superior del sistema con PCM sobre la unidad de control térmico, menor volumen (dimensiones en mm) (Elaboración propia, 2019).

Para la altura se decide cubrir levemente todo el sistema en contacto para no separar el PCM en partes, las dimensiones en el eje z se observan en la Figura 4.2.21. El volumen del PCM para esta configuración es de: 2372 mm^3 .

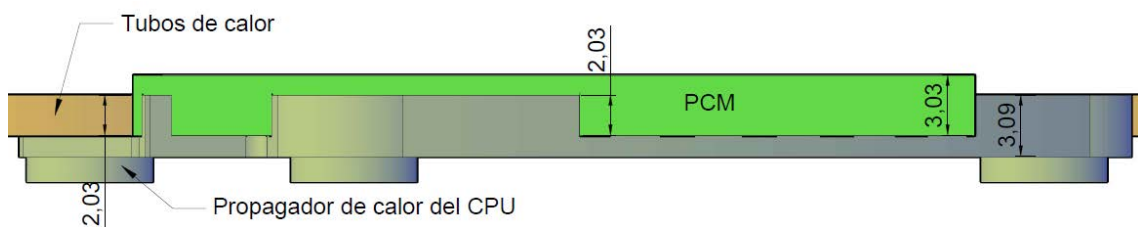


Figura 4.2.21. Vista frontal del sistema con PCM sobre la unidad de control térmico, menor volumen (dimensiones en mm) (Elaboración propia, 2019).

El aumento de volumen para esta configuración se realiza mediante un incremento en la altura del bloque. Se mantienen constantes las dimensiones en los ejes x y y debido a qué, como se ve en la Figura 4.2.20, el propagador de calor del CPU no cubre una

gran área en ese plano.

En la Figura 4.2.22 se aprecia el aumento de medio centímetro en la altura del bloque de PCM, de igual manera al caso anterior, se elige esta amplia expansión para asegurar obtener diferencias significativas. En la realidad esta dimensión no se puede aumentar de esta forma por precaución de entrar en contacto con los paneles de la computadora que pueden estar en contacto con el usuario. El volumen del PCM para esta configuración es de: 7114 mm^3 .

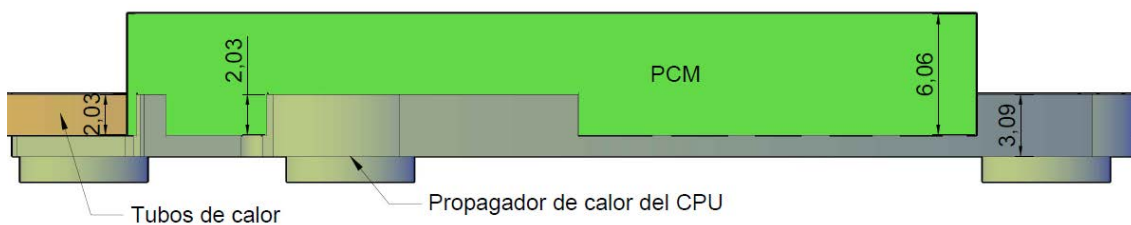


Figura 4.2.22. Vista frontal del sistema con PCM sobre la unidad de control térmico, mayor volumen (dimensiones en mm) (Elaboración propia, 2019).

4.3. Recapitulación

A manera de síntesis, se mencionan a continuación los puntos más importantes a la hora de realizar el diseño tridimensional del sistema de trabajo:

- Se decide por un modelo en el cual la solución térmica empleando materiales de cambio de fase sea conveniente y se cuente con la disponibilidad de espacio suficiente, entre las opciones con información suficiente para validar la simulación.
- Tomando en cuenta los componentes cuyo efecto en los perfiles térmicos se consideran significantes y las dimensiones reales del sistema, se diseña el sistema de trabajo.
- Se realizan simplificaciones del sistema para facilitar su modelado sin reducir la confianza de los resultados de las simulaciones.

- Tres ubicaciones distintas del bloque de PCM en las unidades de control térmicos son seleccionadas para el estudio con base en las variaciones esperadas de temperatura en las zonas circundantes a la fuente de calor.
- Se crean dos variaciones significantes en el volumen del bloque de PCM, para cada ubicación, con base en las geometrías y el espacio físico disponible.
- En total se trabajará con un sistema en estado estacionario además de seis diferentes configuraciones para el estado dinámico.

Con el diseño listo se procede con la simulación del sistema en estado estacionario así como su debida verificación y validación.

Capítulo 5

Simulación en estado estacionario

Con el fin de analizar el comportamiento dinámico del sistema de estudio se debe partir de un estado inicial válido para las variables del sistema. En términos de la simulación, se genera una solución para el estado en equilibrio con respecto a las condiciones de frontera y de distintos parámetros mediante un estudio en estado estacionario. El mismo debe ser verificado y validado para garantizar su consistencia y precisión con respecto a datos experimentales.

El presente capítulo detalla la configuración del modelo final para el estado estacionario en COMSOL Multiphysics 5.1 empleando la geometría final del sistema detallada en el capítulo anterior. Incluye también la configuración inicial del modelo tomando en cuenta el enfriamiento del sistema mediante la simulación del flujo de aire en los disipadores, la selección del modelo de turbulencia y las razones por las cuales se excluye este de la simulación final.

Posteriormente, se demuestra la verificación del modelo mediante un análisis de sensibilidad de diferentes parámetros del sistema y de la finura del mallado para comprobar la precisión de la simulación. Por último, se valida el resultado final comparando este con los datos experimentales del sistema en potencia de diseño térmico (TDP) proporcionados por el departamento de Diseño de sistemas termo-mecánicos de Intel de Costa

Rica.

5.1. Configuración de la estructura de simulación para el sistema en estado estacionario

En esta sección se explicará de manera detallada la estructura y configuración del modelo elaborado para la simulación del sistema en estado estacionario. A manera de llevar un orden lógico en la secuencia para su construcción se describirán los pasos realizados siguiendo la organización ya constituida en el programa para los modelos. Empezando con las definiciones bases del sistema, la geometría, materiales, físicas, mallado, estudios y resultados. Cuando se altere este orden se aclarará dicho cambio.

En COMSOL, un modelo puede iniciarse en blanco o con el ayudante de selección. Para facilidad se utiliza este guía para elegir la geometría, físicas y tipo de estudio. La geometría de trabajo es tridimensional, para la física se selecciona la categoría de transferencia de calor y la opción de transferencia de calor en sólidos. El estudio se elige de tipo estacionario simple. Estas elecciones se explican en sus determinadas subsecciones.

5.1.1. Definiciones globales

La estructura básica, y seguida en este trabajo, de construcción del modelo en COMSOL empieza, como muchos modelos de programación, por un directorio raíz, *root*, del cual se despliegan cuatro secciones principales: las definiciones globales, los componentes del modelo, los estudios a realizar y los resultados a mostrar; como se observa en la Figura 5.1.1. En la sección de definiciones globales se encuentra únicamente la definición de los parámetros, los mismos se muestran en el Cuadro 5.1.1 y el Cuadro 5.1.2. Algunos de estos parámetros se presentan tal y como fueron obtenidos, para otros se demuestra su cálculo en la sección de **Muestra de Cálculo** y, para los terceros, se determinaron sus valores mediante simulación y optimización.

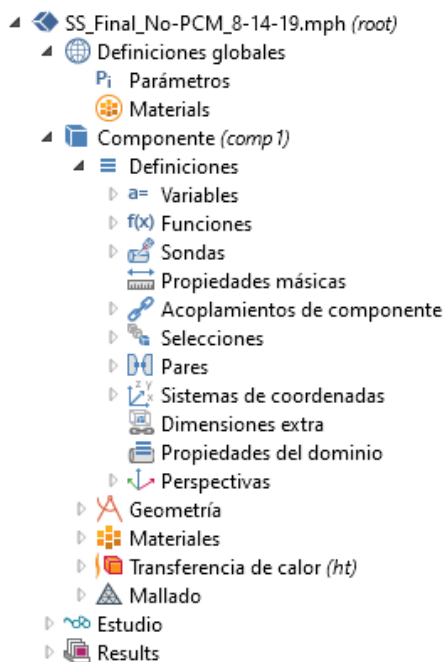


Figura 5.1.1. Secciones del constructor del modelo para la simulación del estado estacionario en COMSOL (Elaboración propia, 2019).

Los parámetros proporcionados por el equipo de Intel de Costa Rica (2018) en el Cuadro 5.1.1 y el Cuadro 5.1.2 se colocan como intervalos bastante amplios con el fin de no divulgar información confidencial. En las simulaciones se emplearon valores específicos los cuales no se variaron a menos que se indique lo contrario.

5.1.2. Componente

La siguiente sección en la estructura del modelo, y la más larga, es la de los componentes del modelo. Esta se constituye por las definiciones, geometría, materiales, físicas y mallado. Las definiciones empleadas en este modelo dependen directamente de la geometría, por este motivo se dejará su aclaración hasta después de comentarse la geometría.

Cuadro 5.1.1. Parámetros del modelo en estado estacionario.

Parámetro	Valor	Descripción
P_CPU [†]	45 W	Potencia de diseño térmico del CPU
P_max_GPU [‡]	120 W	Potencia máxima del GPU
T_air_in_left*	(30-50) °C	Temperatura de entrada del aire en el ventilador izquierdo
T_air_in_right*	(30-50) °C	Temperatura de entrada del aire en el ventilador derecho
T_amb_in*	(30-50) °C	Temperatura del aire de entrada al sistema
x_P_GPU	0.2	Razón de potencia del GPU
P_VR_Chips	2 W	Potencia de los VR cerca del GPU
P_VR_CPU	0.355 W	Potencia del VR cerca del CPU
P_VR_HS	1.13 W	Potencia del VR en el punto caliente
h_conv	(5-30) W/(m ² K)	Coefficiente convectivo en el cuerpo del sistema
h_fan_left	(80-200) W/(m ² K)	Coefficiente convectivo en las aletas del ventilador izquierdo
h_fan_right	0.85×h_fan_left	Coefficiente convectivo en las aletas del ventilador derecho

[†] Obtenido de Intel (2016)

* Recomendado por Intel de Costa Rica (2018)

[‡] Obtenido de Nvidia (2016)

Geometría

Para trasladar la geometría desde AutoCAD hasta COMSOL se debe guardar la misma en formato *.dwg* en compatibilidad con AUTOCAD 2010 con el fin de permitir su importación en versiones anteriores a COMSOL 5.2. Con el archivo listo, se agrega un módulo de Importación a la geometría, se selecciona el archivo CAD y se elige la importación únicamente de los sólidos con una tolerancia por defecto de 1×10^{-10} . Una vez importada sin errores, el módulo *Formar Unión* por defecto cambia a *Formar Ensamble*, esto debido a que la geometría posee muchos elementos en contacto fraccionado. El ensamble acarrea complicaciones no presentes con la unión: la necesidad de impresiones en los contactos, de continuidades en las físicas y la imposibilidad de utilizar mallado por defecto. Cada una de estos requerimientos se explican en sus respectivas

Cuadro 5.1.2. Parámetros de propiedades de los materiales del modelo en estado estacionario.

Parámetro	Valor	Descripción
Cp_vap*	(1000-4000) J/(kg K)	Capacidad calorífica del vapor
rho_vap*	(0.1-1.0) kg/m ³	Densidad del vapor
k_vap*	(10-200) kW/(m K)	Conductividad térmica del vapor
Cp_HP*	(200-1000) J/(kg K)	Capacidad calorífica de los tubos de calor
rho_HP*	(500-10000) kg/m ³	Densidad virtual de los tubos de calor
k_HP*	(100-500) W/(m K)	Conductividad térmica de los tubos de calor
Cp_evap*	(5000-100000) J/(kg K)	Capacidad calorífica de la resistencia a la evaporación
rho_evap*	(500-3000) kg/m ³	Densidad de la resistencia a la evaporación
k_evap*	(0.1-2.0) W/(m K)	Conductividad térmica de la resistencia a la evaporación
t_evap*	(0.01-0.5) mm	Ancho de la zona de resistencia térmica
t_TIM*	(0.01-0.5) mm	Ancho de la interfaz de pasta térmica
Cp_TIM*	(100-4000) J/(kg K)	Capacidad calorífica de la pasta térmica
rho_TIM‡	2595 kg/m ³	Densidad de la pasta térmica
k_TIM‡	6 W/(m K)	Conductividad térmica de la pasta térmica
Cp_gappad†	1000 J/(kg K)	Capacidad calorífica de los gap Pads
rho_gappad†	2100 kg/m ³	Densidad de los gap pads
k_gappad†	1.5 W/(m K)	Conductividad térmica de los gap pads

* Recomendado por Intel de Costa Rica (2018)

‡ Obtenido de Shin-Etsu MicroSi (2014)

† Obtenido de Stockwell Elastomerics (2011)

subsecciones.

Para las impresiones de los contactos, dentro del mismo modulo de *Formar Ensamble* se selecciona la opción de *Crear impresiones*. Se debe también especificar la creación de pares, los cuales son requeridos para las continuidades en las físicas, y que sean de tipo *Par de identidad*. La otra opción presente, pares de contacto, se emplea cuando existen elementos móviles que, en algún momento de la simulación, entran en contacto con otros elementos.

Definiciones

Las definiciones del componente se dividen en *Variables, Funciones, Sondas, Propiedades másicas, Acoplamientos de componentes, Selecciones, Pares, Sistemas de coordenadas, Dimensiones extra, Propiedades del dominio y Perspectivas*. En el módulo de *Pares* se puede observar los diferentes pares de identidad creados al formar el ensamble de la geometría, estos no se modifican.

En primera instancia explicaremos la creación de las selecciones de las zonas, ya que estas permiten especificar y agrupar con facilidad los dominios, fronteras, bordes y puntos del sistema. En la Figura 5.1.2 se muestran las selecciones creadas para el modelo en estado estacionario. Los dominios, o fronteras, correspondientes a cada selección se aclaran a continuación:

- Motherboard: dominio de la tarjeta madre.
- Aluminium: dominios de los propagadores de calor metálicos, excepto el de cobre, y los soportes de los propagadores.
- Heat Pipes: dominio de la parte externa de los tubos de calor.
- Copper: dominio de propagador de calor de cobre sobre el CPU.
- Fins: dominios de los disipadores de calor de aletas.
- FR-4: dominios del substrato entre la tarjeta madre y el microprocesador.
- VR: dominios de las resistencias variables.
- VR_Chips: dominios de los VR bajo el propagador de calor.
- VR_CPU: dominios de los VR cerca del CPU.
- VR_HS: dominios de los VR cerca del punto caliente en la tarjeta madre.
- Vapor: dominios de las secciones internas de los tubos de calor.
- Evap. Resist.: fronteras entre las partes internas y externas de los tubos de calor, en las zonas en contacto con los propagadores de calor.

- Gap Pad: dominios de los gap pads.
- Silicon: dominios de los procesadores, CPU y GPU.
- Chips: dominios de los chips y elementos bajo los propagadores de calor.
- TIM: fronteras donde se coloca pasta térmica, sobre los procesadores y los chips bajo propagadores de calor sin almohadilla térmica (ver Figura 4.1.12).
- CPU: dominio de la unidad central de procesamiento (CPU).
- GPU: dominio de la unidad de procesamiento gráfico (GPU).
- Fins_boundaries: fronteras de las aletas en contacto con el aire.
- HP_boundaries_in: fronteras internas de los tubos de calor.
- Vapor_boundaries_out: fronteras externas del vapor.
- HP + Vapor: Dominios totales de los tubos de calor, incluyendo el vapor.
- Conv_MB_Up: Fronteras superiores del sistema a considerar para convección.
- Conv_MB_Down: Fronteras inferiores del sistema a considerar para convección.
- Left_Fins: Fronteras de las aletas del disipador de calor izquierdo en contacto con el aire.
- Right_Fins: Fronteras de las aletas del disipador de calor derecho en contacto con el aire.

El módulo de *Acoplamiento de componentes* permite crear funciones internas de integración, determinación de promedios, mínimos y máximos. Llevar control del resultado de varias variables es imprescindible para identificar el buen funcionamiento de la simulación y, para generar estas variables, requiere generar acoples de funciones a distintas secciones de la geometría del modelo, específicamente, la temperatura de los procesadores. Así también, para la validación en estado estacionario se requiere saber la temperatura de ciertos puntos del sistema para su posterior comparación con los datos

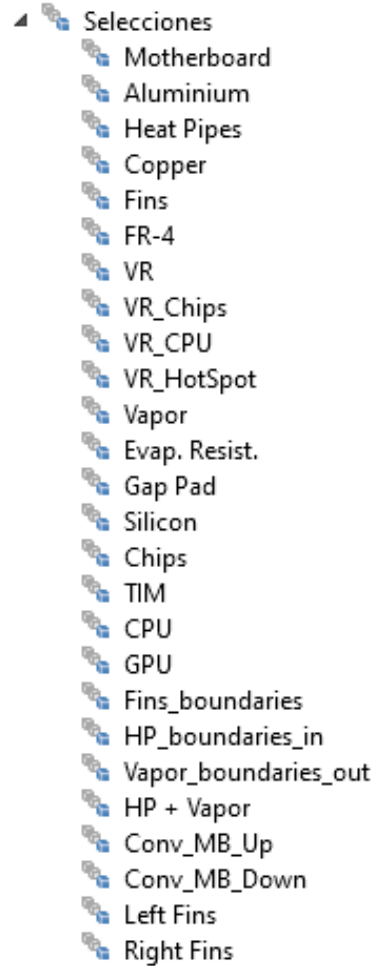


Figura 5.1.2. Módulo de *Selecciones* para la simulación del estado estacionario en COMSOL (Elaboración propia, 2019).

experimentales. Los acoples creados se presentan en la Figura 5.1.3 y se describen a continuación:

- aveop_CPU: promedio volumétrico en el CPU.
- aveop_GPU: promedio volumétrico en el GPU.
- aveop_SSD: promedio puntual cerca del SSD (Solid State Drive).
- aveop_PCH: promedio puntual cerca del PCH (Platform Controller Hub).

- `aveop_MB_Hotspot`: promedio puntual cerca de la zona de mayor temperatura de la tarjeta madre.
- `aveop_HP_right_fan`: promedio puntual sobre un tubo de calor cerca del disipador derecho.
- `aveop_HP_GPU`: promedio puntual sobre el disipador de calor en la zona del GPU.
- `aveop_Memory`: promedio puntual cerca de los módulos de memoria RAM.
- `aveop_HP_CPU`: promedio puntual sobre un tubo de calor en la zona del CPU.
- `aveop_HP_left_fan`: promedio puntual sobre un tubo de calor cerca del disipador izquierdo.
- `aveop_VR_CPU`: promedio puntual de una esquina del VR cerca del CPU.
- `aveop_a_j`: promedio superficial de la cara del CPU en contacto con sustrato.
- `maxop_CPU`: valor máximo en el volumen del CPU.
- `maxop_a_j`: valor máximo en la cara del CPU en contacto con sustrato.

No se hace énfasis en las ubicaciones de los puntos en esta sección, esto se aclarará en la sección de validación del modelo.

Una vez creados los acoples, estos se emplean para la generación de las variables. Se emplea el módulo de *Variables* bajo la sección de *Definiciones* para declarar las variables necesarias, con los valores presentes en el Cuadro **5.1.3**. No es necesario aclarar en gran medida la denotación de cada una de las variables, pero cierta información es indispensable.

El nombre de la variable comienza con la definición de la magnitud a medir, T para temperatura. Seguidamente viene el tipo de acople: v para volumétrico, a para superficial, o de área, y sin letra para puntuales. Posteriormente hace referencia al acople al cual se relaciona, el mismo nombre sin el prefijo, *aveop* o *maxop*.



Figura 5.1.3. Módulo de *Acople de componentes* para la simulación del estado estacionario en COMSOL (Elaboración propia, 2019).

Cuadro 5.1.3. Variables del modelo en estado estacionario.

Nombre	Expresión	Unidad
T_v_CPU	aveop_CPU(T)	°C
T_v_GPU	aveop_GPU(T)	°C
T_SSD	aveop_SSD(T)	°C
T_PCH	aveop_PCH(T)	°C
T_MB_Hotspot	aveop_MB_Hotspot(T)	°C
T_HP_right_fan	aveop_HP_right_fan(T)	°C
T_HP_GPU	aveop_HP_GPU(T)	°C
T_Memory	aveop_Memory(T)	°C
T_HP_CPU	aveop_HP_CPU(T)	°C
T_HP_left_fan	aveop_HP_left_fan(T)	°C
T_VR_CPU	aveop_VR_CPU(T)	°C
T_max_CPU	maxop_CPU(T)	°C

La expresión de la variable se realiza llamando al acople correspondiente y colocando como parámetro, entendiéndose en el sentido de programación, a la magnitud a la cual se desee que se calcule, en este caso, T para temperatura.

Materiales

Para determinar las propiedades de los diferentes elementos de la geometría se asignan, o seleccionan, materiales para cada dominio o frontera. Los materiales pueden ser tomados de las bases de datos, *librería de materiales*, de COMSOL o creados por el usuario; con opción para ver y editar las funciones de relación, o valores exactos, para cada una de las propiedades.

Si se desea colocar un material en blanco, solo se debe elegir esta opción y seleccionar las propiedades a especificar, o asignar, al nuevo material.

Agregar un material existente en la base de datos de COMSOL al modelo es fácil. Se selecciona la opción de *Agregar material*, esto despliega la librería, y de ahí se navega por las diferentes categorías hasta llegar al material deseado. O se utiliza el buscador si se tiene una idea del nombre con el cual está almacenado el material. Para materiales con múltiples fases se debe tener en cuenta la temperatura a la cual se va a trabajar para seleccionar de manera adecuada el estado del material.

Al asignar el material a una zona de la geometría, se despliega una lista de las propiedades requeridas con respecto a las físicas cuyas ecuaciones se deben resolver en dicha zona. Las propiedades estándar para simular transferencia de calor en sólidos son: el calor específico, la densidad y la conductividad térmica; como mínimo. Para una gran mayoría de materiales en la base de datos, existe información sobre estas propiedades en forma de valores exactos o funciones, por lo general dependientes de la temperatura. Estas funciones poseen un rango funcional específico y la opción de habilitar diferentes tipos de extrapolación si se requiere trabajar fuera del rango, lo cual no es aconsejable para diferencias grandes.

Para el modelo se emplearon cinco materiales de la base de datos y cuatro materiales en blanco. Se prefiere utilizar materiales de la base de datos ya que, en su mayoría, cuentan con funciones para definir sus propiedades de forma dependiente a la temperatura, presión y otras variables del sistema. Los materiales empleados de la librería

de COMSOL se especifican a continuación (con su etiqueta de nombre entre paréntesis), así como las *Selecciones*, descritas con anterioridad, respectivas a la geometría que corresponde:

- Cobre (Copper): se desconoce la aleación utilizada por cada proveedor por lo que se selecciona cobre metálico estándar. Selección: *Fins*.
- Cobre (Copper 1): se repite el material para una selección diferente por facilidad en su asignación y en pruebas de sensibilidad. Selección: *Copper*.
- FR4 para circuitos integrados (FR4 (Circuit Board)): Se emplea para el substrato que facilita la conexión entre el procesador y la tarjeta madre. Selección: *FR-4*.
- FR4 para circuitos integrados (FR4 (Circuit Board) 1): al igual que con el cobre se emplea una copia del material. Selección: *Motherboard*.
- Aluminio (Aluminum): de manera análoga al cobre, como se desconoce la aleación exacta, se emplea aluminio estándar para los propagadores de calor. Selección: *Aluminium*.
- Silicio (Silicon): se emplea para los procesadores ya que estos utilizan en su composición silicio ultra puro. Selección: *Silicon*.
- Silicio (Silicon 1): se repite nuevamente para crear una copia. Selección: *Chips*.
- Óxido de Silicio (SiO₂ (fused quartz)): cerámica seleccionada para las resistencias variables. Selección: *VR*.

Los materiales vacíos o “en blanco” utilizados se enfocan en dominios o fronteras donde la única física en juego es la transferencia de calor en sólidos, por esta razón solo se requiere especificar su conductividad térmica, capacidad calorífica y densidad. Para cada uno de los siguientes materiales se emplearon como propiedades los correspondientes parámetros según el Cuadro 5.1.1. Los materiales en blanco creados son los siguientes:

- Cobre de los tubos de calor (HP_Copper): no se emplea el cobre estándar ya que Intel de Costa Rica (2018) provee valores de referencia para los tubos de calor, determinados por experimentación. Selección: *Heat Pipes*.
- Resistencia de evaporación (Evap): aplicado a la frontera para simular la evaporación del agua dentro de los tubos de calor (Intel de Costa Rica, 2018). Selección: *Evap Resist*.
- Vapor (Vapor): como su nombre lo indica, se refiere a la zona de vapor dentro de los tubos de calor según la información recomendada por Intel de Costa Rica (2018). Selección: *Vapor*.
- Gap pads (Gap Pad): material de relleno para contacto térmico entre algunos de los chips y los disipadores de calor. Se emplean valores de las propiedades térmicas de una marca comercial. Selección: *Gap Pad*.
- TIM (TIM): material para la interfaz de pasta térmica según marca comercial recomendada por Intel de Costa Rica (2018). Selección: *TIM*.

Físicas

La selección de las físicas adecuadas es el corazón del modelo, pues requiere entender los fenómenos físicos involucrados, como interactúan con la geometría y como se deben de integrar al sistema. COMSOL permite una fácil y amigable introducción de físicas al modelo, separadas en categorías y con opción de integrar multifísicas para acoplar una o varias físicas.

La simulación se enfoca en el comportamiento térmico del sistema empleando únicamente sólidos. En un principio se integra el módulo multifísico de fluido no isotérmico para simular el paso del aire en las aletas de los disipadores. La razón por la cual el modelo final no posee este módulo se profundiza en la sección de **Modelado del enfriamiento convectivo**.

La física de transferencia de calor se compone de varios módulos separados por su zona de efecto en la geometría, dominios, fronteras, bordes y puntos. Se irá explicando la selección y configuración de cada módulo elegido, como se observa en la Figura 5.1.4.

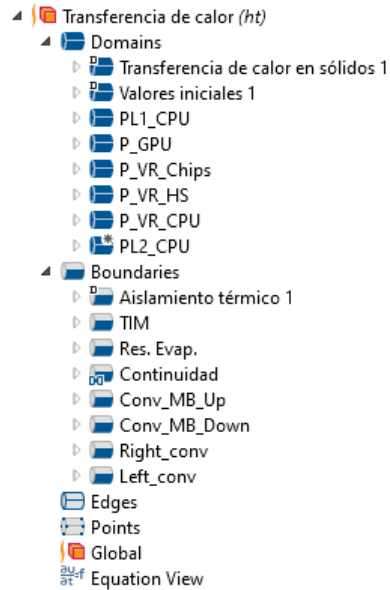


Figura 5.1.4. Física de transferencia de calor y submódulos para la simulación del estado estacionario en COMSOL (Elaboración propia, 2019).

En el primer submódulo de *Transferencia de calor en sólidos* se seleccionan todos los dominios. COMSOL mantiene una conducta de prioridad a los módulos más abajo, sobre escribiendo a los de arriba, es de importancia entender esto para las demás secciones. Las siguientes opciones se dejan con sus valores por defecto, revisando que la definición de las propiedades provengan de los materiales elegidos con antelación. En la opción de *valores iniciales* se coloca el parámetro T_{amb_in} .

De manera seguida se colocan las fuentes de calor volumétricas, a entender, el calor generado por el procesador central ($PL1_CPU$) y gráfico (P_GPU). La selección es clara para cada fuente de calor, la correspondiente a cada dominio; GPU para el calor del procesador gráfico y CPU para el central. El tipo de fuente de calor para todas ellas se coloca como *Tasa de transferencia de calor total* y se ingresa el pará-

metro correspondiente a cada fuente, entiéndase P_CPU para el procesador central y $P_max_GPU \times x_P_GPU$ para el procesador de video. El valor de potencia del GPU máximo se multiplica por un factor adimensional para ajustar el calor generado según las condiciones del sistema, ya que no se cuenta con el valor real de generación de calor del GPU en el sistema a TDP.

Para la potencia en las resistencias variables se emplearon tres fuente de calor volumétricas: una para el par de VR cerca del GPU bajo el propagador de calor, una para las VR cerca del CPU y otra para las VR en el punto caliente de la tarjeta madre, bajo un tubo de calor. Las selecciones, según corresponden, son VR_Chips , VR_CPU y VR_HS . Para el parámetro de *Tasa de transferencia de calor total* se emplean, respectivamente, P_VR_Chips , P_VR_CPU y P_VR_HS . Se emplean valores de potencia diferentes para los pares de resistencias variables debido a que solo se cuenta con un aproximado para todos los VR juntos, mas las simulaciones señalan que la potencia de cada par es distinta y se debe ajustar por separado.

El submódulo de *Aislamiento térmico* aparece por defecto y no requiere cambios, aunque es importante que se mantenga arriba de los demás para evitar problemas por anulaciones. De manera seguida se tratan los submódulos de *Capa delgada* para introducir la pequeña capa de pasta térmica y de resistencia a la evaporación en los tubos de calor. Para la primera se elige la selección de *TIM*, se coloca el parámetro t_TIM para el espesor. En la capa de resistencia a la evaporación, con selección *Evap Resist*, se coloca como espesor el parámetro t_evap . Para ambas capas se deben seleccionar sus propiedades según el material y que se seleccione el tipo de capa como *general*, para que aplique todas las ecuaciones para capas delgadas sin simplificaciones.

Como se explicó al discutirse el módulo de *Geometría*, el ensamble de los elementos conlleva la necesidad de definir las continuidades del sistema. Esto, para el modelo, significa crear igualdades entre los nodos de las superficies en contacto de los diferentes elementos. El submódulo de *Continuidad* permite esto, solo es cuestión de seleccionar

los pares de identidad correspondientes a fronteras en contacto por las cuales se desea que el calor fluya, es decir, todos los pares. Como el modelo posee un tamaño considerable, con más de 80 pares, esto puede tomar un tiempo. Si el programa arroja un error de falta de memoria se debe modificar en el archivo *comsol.ini*, encontrado en la ruta “C:/Program Files/COMSOL/COMSOL51/Multiphysics/bin/win64/”, el valor *-Xmx2048m* (los números pueden variar) por alguna cantidad múltiplo de la que aparece. El valor original en la computadora utilizada era de 1024m. Esto con el fin de aumentar el tamaño de la pila de memoria autorizada por defecto para Java en el uso del cache de la computadora.

Para simular el calor removido del sistema por los disipadores de calor se incluyen dos submódulos de *Flux de calor*: *Left_conv* y *Right_conv*, para el disipador izquierdo y derecho, respectivamente. La selección es simple, *Left_Fins* y *Right_Fins* para cada submódulo. Dentro de ellos se selecciona *Flux de calor convectivo* y se coloca un coeficiente de transferencia de calor definido por el parámetro *h_conv_left* y *h_conv_right*, como es conveniente. Los valores de estos parámetros se obtienen mediante ajustes de la simulación por medio de barridos paramétricos, esto para el disipador del lado del CPU. Para el derecho se emplea la relación existente entre las velocidades de los ventiladores según la ecuación C.3 en la sección de **Muestra de Cálculos**.

Por último en esta física, se agrega otro submódulo de *Flux de calor* para dar al sistema un aproximado del calor removido por el aire que circula por él, en este caso, por la parte superior. Como simular el recorrido del aire por todo el sistema es sumamente demandante en recursos se opta por una convección simple en las regiones fuera de los disipadores. Se genera el submódulo *Conv_MB_Up* para la selección de mismo nombre, se elige la opción de *Flux de calor convectivo* y se selecciona la opción de coeficiente de transferencia de calor definido por el usuario. Se coloca el parámetro *h_conv* como coeficiente y *T_amb_in* como temperatura externa. Para el segundo submódulo, *Conv_MB_Down*, se hace de igual manera pero se multiplica el coeficiente

anterior por 0.05 para reducir significativamente su valor y que funcione como una salida mínima que no permita la sobre acumulación de energía.

Mallado

El mallado del sistema corresponde a la creación de los subdominios sobre los cuales se calculan las ecuaciones de estado del modelo. Como se indica en las bases de las ecuaciones diferenciales de Newton entre menor sea la distancia entre puntos, más exacta es la respuesta. De esta manera, el objetivo del mallado es lograr una división de los dominios la cual permita encontrar una respuesta con el deseado grado de precisión y que requiera de una cantidad adecuada de recursos computacionales. Esto porque, para cada subdominio, COMSOL debe almacenar en memoria los valores de las variables y las ecuaciones para unir todos los nodos entre elementos vecinos, lo que genera una gran necesidad de poder de computo durante la simulación.

Para geometrías simples, sin muchos elementos, COMSOL permite realizar una configuración automática del mallado como los algoritmos internos encuentren más adecuado. Lastimosamente, el sistema de trabajo no entra en la categoría de “simple”. Como se especificó en el módulo de *Geometría*, al realizarse un ensamble de los elementos, estos no reconocen los dominios en contacto; misma razón por la cual se deben realizar los acoples de los pares en contacto térmico en el módulo de *Transferencia de calor*. Debido a esto, el grado de complejidad del mallado aumenta dado que se deben señalar las fronteras en contacto y llevar un orden al momento de mallar los elementos.

Mallar geometrías complicadas requiere de las impresiones generadas al momento de formar el ensamble. Estas forman subdivisiones en las fronteras de los dominios en las zonas en contacto con otros elementos. Como los nodos de los elementos en contacto deben corresponder al mismo punto geométrico, se debe de crear, en primera instancia, el mallado de un elemento y posteriormente copiar, mediante un submódulo de *Copia*, el patrón de la frontera mallada al elemento no mallado en contacto. Posteriormente,

se procede a mallar el segundo elemento para asegurar la concordancia de todos los nodos. Este procedimiento se complica cuando un dominio está en contacto con varios otros o alguno de los dominios requiere de elementos más pequeños, ya sea a causa de la geometría o de ser una zona que requiera un estudio con mayor precisión.

Para geometrías tridimensionales no simétricas se emplea la división del sistema en tetraedros con triángulos en las fronteras. Esto para facilitar su generación gracias a la posibilidad de variar sus diferentes dimensiones y adaptarse a una gran cantidad de geometrías. En la Figura 5.1.5 se identifican los submódulos de creación de tetraedros como “FT”, *Tetraédrica libre*. Para el mallado de superficies se generan triángulos y se identifica como “FTriang”, *Triangular libre*. Aparte de los submódulos ya descritos se emplean submódulos de *Tamaño* para definir las propiedades de los elementos para un dominio, frontera o borde; y *Barrido* para tomar el mallado de un elemento en una de sus fronteras y barrerlo en la dirección normal a esta dentro de uno o varios elementos hasta otra frontera.

Dentro de cada submódulo de *Tamaño* se puede especificar uno de los tamaños estándar de COMSOL o modificar sus parámetros. Los tamaños estándar disponibles son: *extremadamente grueso*, *extra grueso*, *muy grueso*, *grueso*, *normal*, *fino*, *muy fino*, *extra fino* y *extremadamente fino*; cada uno provee una mejor división, distribución y calidad de los elementos en la geometría. Los parámetros que se pueden modificar dentro de cada submódulo son:

- Tamaño máximo de los elementos.
- Tamaño mínimo de los elementos.
- Factor de crecimiento máximo de los elementos. Este rige la razón de crecimiento entre un elemento y los adyacentes, donde 1 significa el mismo tamaño para todos los elementos.
- Factor de curvatura. Determina la razón entre el tamaño del elemento y el radio

de curvatura de la zona. Entre más cerca de cero se encuentre más finos serán los elementos.

- Resolución de las zonas angostas. Controla la cantidad de capas creadas en regiones angostas. Se usan valores positivos, entre más cercano a la unidad más finos los elementos en estas regiones.

A continuación se describirán los diferentes submódulos utilizados para generar el mallado del sistema de estudio como se muestra en la Figura 5.1.5. Es necesario recordar que COMSOL sigue un orden descendente en la aplicación y prioridad de los módulos y submódulos.

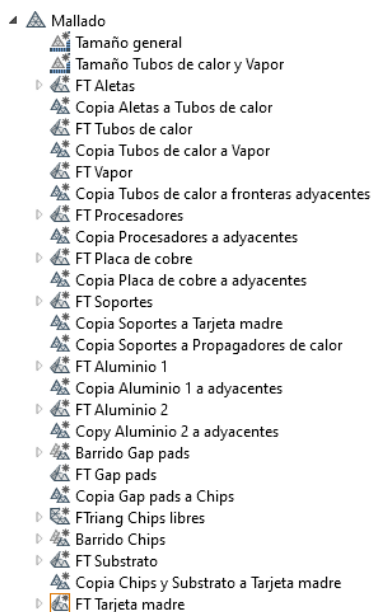


Figura 5.1.5. Modulo de mallado para la simulación del estado estacionario en COMSOL (Elaboración propia, 2019).

Muchos de los parámetros seleccionados fueron el resultado de una gran cantidad de pruebas e inspecciones para lograr un modelo funcional y sin problemas de mallado. Estos llevaron una gran cantidad de intentos y modelos fallidos, y se identificarán con un asterisco. En otros casos son producto de pruebas de refinamiento del mallado.

Cuando se especifican parámetros de mallado dentro de un submódulo de *Tetraédrica libre* o *Triangular libre* quiere decir que se implementa uno o varios submódulos de *Tamaño* dentro del mismo y en estos se introducen los parámetros. La estructura del mallado es la siguiente:

- Tamaño general: Grueso. Se debe seleccionar un tamaño por defecto para toda la geometría. Se recomienda elegir uno de elementos grandes y luego afinar para las partes que así lo requieran. En los siguientes submódulos, cuando no se especifique alguno de los parámetros de mallado significa que COMSOL emplea el que ya se indico más arriba para dicho elemento. En caso general, el de este submódulo.
 - Tamaño máximo de los elementos = 20.6 mm.
 - Tamaño mínimo de los elementos = 0.02 mm.
 - Factor de crecimiento máximo de los elementos = 1.5.
 - Factor de curvatura = 0.6.
 - Resolución de las zonas angostas = 0.5.
- Tamaño tubos de calor y vapor: especificaciones de mallado para las selección *HP + Vapor*.
 - Tamaño máximo de los elementos = 4 mm.*
- FT aletas: mallado de la selección *Fins*.
 - Tamaño máximo de los elementos = 1 mm.*
- Copia aletas a tubos de calor: Copia del mallado fronterizo de las aletas en la zona en contacto con los tubos de calor.
- FT tubos de calor: tetraedral libre para la selección *Heat Pipes*.

- Copia tubos de calor a vapor: copia del mallado de la parte interna de los tubos de calor, *HP_boundaries_in*, a las fronteras externas del vapor, *Vapor_boundaries_out*.
- FT vapor: mallado para la selección *Vapor*.
- Copia de los tubos de calor a fronteras adyacentes: copia del mallado de los tubos de calor a los elementos en contacto no antes especificados. Selección manual.
- FT procesadores: se aplica a la selección *Silicon*. Sus parámetros se eligen como extremadamente finos ya que es el área de mayor interés en la simulación.
 - Tamaño máximo de los elementos = 0.5 mm.
 - Factor de crecimiento máximo de los elementos = 1.3.
 - Resolución de las zonas angostas = 1.
- Copia de procesadores a adyacentes: copia de mallado de los procesadores a elementos en contacto. Selección manual.
- FT placa de cobre: construcción de tetraedros libres para la selección *Copper*.
 - Tamaño máximo de los elementos = 11.9 mm.
 - Factor de crecimiento máximo de los elementos = 1.3.
 - Resolución de las zonas angostas = 0.85.
- Copia placa de cobre a adyacentes: copia de mallado del propagador de cobre hacia los elementos adyacentes al mismo. Selección manual.
- FT soportes: mallado tetraédrico de los soportes inferiores de los propagadores de calor. Estos poseen curvas muy finas y elementos muy pequeños en sus juntas. Selección manual.

Tamaño para el soporte debajo del CPU. Selección manual.

 - Tamaño máximo de los elementos = 11.9 mm.

- Factor de crecimiento máximo de los elementos = 1.35.
- Resolución de las zonas angostas = 0.85.

Tamaño para las fronteras circulares en contacto con la placa madre. Selección manual.

- Tamaño máximo de los elementos = 1 mm.*
- Factor de curvatura = 0.1.*

Tamaño para las fronteras planas en contacto con la placa madre. Selección manual.

- Tamaño máximo de los elementos = 2 mm.*
- Factor de curvatura = 0.1.*

- Copia soportes a la placa madre: copia del mallado de los soportes a la tarjeta madre. Selección manual.
- Copia soportes a propagadores de calor: copia de los soportes de aluminio a los propagadores de calor. Selección manual.
- FT aluminio 1: construcción de los tetraedros libres de los propagadores de calor sobre los procesadores. Selección manual.

Tamaño para propagador sobre el GPU:

- Factor de crecimiento máximo de los elementos = 1.3.*

Tamaño para propagador sobre el CPU:

- Tamaño máximo de los elementos = 11.9 mm.
- Factor de crecimiento máximo de los elementos = 1.35.
- Resolución de las zonas angostas = 0.85.

Tamaño para las fronteras cilíndricas. Selección manual.

- Tamaño máximo de los elementos = 1 mm.*
- Factor de curvatura = 0.1.*

Tamaño de las fronteras planas en contacto con los chips y gap pads. Selección manual.

- Tamaño máximo de los elementos = 2 mm.*

- Copia de aluminio 1 a adyacentes: copia del mallado de los propagadores de calor sobre los procesadores a los elementos en contacto. Selección manual.
- FT aluminio 2: mallado del propagador de calor sobre los chips. Selección manual.

Tamaño de las fronteras planas en contacto con los chips y gap pads. Selección manual.

- Tamaño máximo de los elementos = 2 mm.*
- Factor de crecimiento máximo de los elementos = 1.4.*

- Copia de aluminio 2 a adyacentes: copia del mallado del propagador de calor sobre los chips a la frontera de dichos chips. Selección manual.
- Barrido gap pads: barrido cuadrilateral del mallado en los gap pads en contacto únicamente con el propagador de calor sobre el GPU. Con distribución de 3 capas, se especifica en un submódulo de distribución. Selección manual.
- FT gap pads: generación del mallado de los gap pads sobre los VR y en contacto con los tubos de calor. Selección manual.
- Copia gap pads a chips: copia del mallado de los gap pads hacía los chips y VR en contacto. Selección manual.

- FTriang chips libres: mallado triangular de la superficie sin contacto de los VR libres. Selección manual.
 - Tamaño máximo de los elementos = 2 mm.*
- Barrido chips: barrido cuadrilateral del mallado en todos los chips y VRs. Con distribución de 3 capas, se especifica en un submódulo de distribución. Selección manual.
- FT substrato: construcción del mallado tetraédrico de los substratos. Selección *FR-4*.

Tamaño de los dominios: Se elige un tamaño extra fino ya que estos elementos están en contacto directo con la zona de interés de la simulación.

- Tamaño máximo de los elementos = 1 mm.
- Factor de crecimiento máximo de los elementos = 1.35.
- Resolución de las zonas angostas = 0.85.
- Copia chips y substrato a tarjeta madre: copia del mallado de la frontera de todos los chips y VRs en contacto con la tarjeta madre hacia esta misma. Selección manual.
- FT tarjeta madre: mallado tetraedral de la tarjeta madre. Selección *Motherboard*.
 - Factor de curvatura = 0.4.*

5.1.3. Estudio

El estudio de la simulación en estado estacionario se conforma de dos módulos configurables y sin opciones de configuración, así como un módulo extra utilizado para realizar variaciones continuas de distintos parámetros en el modelo. Los módulos de estudio junto con sus submódulos se muestran en la Figura 5.1.6.

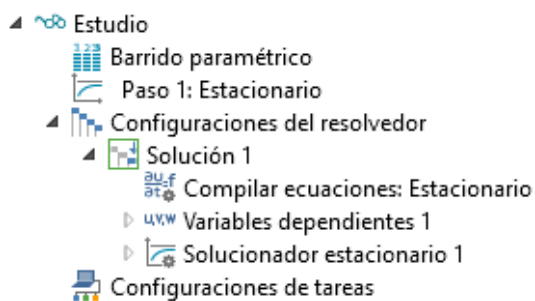


Figura 5.1.6. Modulo de estudio para la simulación del estado estacionario en COMSOL (Elaboración propia, 2019).

Inicialmente se crea un módulo de *Paso* de tipo estacionario ya que, como es claro, se desea estudiar la respuesta final o estacionaria del sistema con las condiciones fijas durante su configuración. Como se seleccionó el ayudante de configuración del modelo al inicio, este paso ya aparece por defecto y no se debe modificar ninguna de sus opciones.

Cuando se realiza una corrida del sistema aparecen otros dos submódulos: el de *Configuraciones del solucionador* y el de *Configuraciones de trabajo*, este último es utilizado por el programa al realizar las corridas pero no posee opciones modificables por lo que no se trata.

El módulo de *Configuraciones del solucionador* almacena información de las soluciones calculadas. Dentro de estas soluciones solo se modifica el submódulo de *Solucionador estacionario* para modificar la tolerancia relativa de requerirse, pero, el valor por defecto de 0.001, 0.1%, es adecuado para la simulación.

Cuando una corrida presenta advertencias u errores al momento de buscar la solución, estos se muestran en diferentes partes de la solución correspondiente. El mensaje de error se almacena en cada categoría dentro de la solución dependiendo del tipo error o fase del solucionador en la cual se presentó.

El módulo extra mencionado, *Barrido paramétrico* se emplea para generar varias soluciones dentro de un mismo estudio las cuales varían en su configuración en el valor de uno o varios parámetros de entrada. Cuando se añade este módulo se tiene la opción

de agregar los parámetros requeridos, el valor inicial, valor final y la magnitud de cada paso entre estos límites. Así como el tipo de barrido, ya sea, realizar solamente las combinaciones especificadas o todas las combinaciones posibles. Como cada corrida tarda cierto tiempo y requiere de significativos recursos computacionales solo se utilizó la opción de combinaciones específicas.

5.1.4. Presentación de resultados

Para la correcta inspección y generación de información importante del sistema se emplea el componente de *Resultados*, este posee módulos para generación de información puntual, tablas y gráficas de cualquier variable o función generable a partir de variables del sistema. Para el sistema en estado estacionario es de interés extraer información de temperatura, presión y calidad de diferentes zonas del sistema una vez encontrada su solución en estado estacionario y almacenarla en tablas. Así como generar gráficos que permitan analizar el resultado final de manera visual.

En primer instancia se crea una tabla en el submódulo *Tablas* para guardar ahí la información generada. Posteriormente se procede al módulo de *Valores derivados* y se genera un submódulo de *Evaluación global*, se le coloca el nombre de la variable T_v_CPU y se coloca “comp1.T_v_CPU” como expresión. El prefijo “comp1.” hace referencia a la raíz de la variable, en este caso el nombre del componente tridimensional base como se observa en la parte superior de la Figura 5.1.1. Se repite el procedimiento anterior, de manera homóloga para las demás variables creadas.

Finalmente se genera un submódulo de *Promedio volumétrico* donde se seleccionan todos los dominios y de expresión se coloca “qual”. Esta expresión representa la calidad de los elementos del mallado, para ayudar con una indicación general al momento de buscar mejorar el mallado. Posee un valor entre cero y uno, donde la unidad corresponde a un elemento con todos sus lados de igual tamaño. A todos los submódulos de evaluación de variables se les selecciona la opción de evaluar los resultados en la tabla

generada con anterioridad. Si esto no se realiza se genera una tabla por submódulo.

Para la inspección visual del resultado se generan tres grupos de gráficos tridimensionales. El primero se empleará para visualizar la temperatura en escala de colores. Dentro de este módulo se genera un submódulo de *Volumen* con expresión “T” para temperatura. Las demás opciones se mantienen por defecto.

De igual manera para el segundo módulo pero agregando un submódulo de tipo *Iso-superficie* y colocando la expresión “T” para generar un gráfico de los perfiles de temperatura en todo el sistema.

En el tercer módulo, al igual que en el primero, se coloca un submódulo volumétrico con expresión “qual” para visualizar la calidad de los elementos. Pero, en la sección de *Filtro de elementos* se añade la expresión lógica $qual < 0,01$ para observar solo aquellos elementos con calidad muy baja.

Esto concluye la configuración final del modelo de trabajo. Fruto de muchas pruebas en modelos más simples, empleando casi toda opción posible de configuración, con sentido lógico; muchos barridos paramétricos configurables y manuales; con un total de cerca de 2000 horas de simulación.

5.2. Modelado del enfriamiento convectivo

El proceso de modelado inicial, entiéndase con flujo de aire, del sistema en estado estacionario abarca más de 1800 horas de simulación. Con una gran cantidad de pruebas para aprender el uso correcto de los diferentes módulos utilizados, definir los mejores algoritmos y ecuaciones para describir los fenómenos físicos en acción, corregir errores introducidos en los diferentes módulos, en fin, para alcanzar un sistema muy cercano al descrito en la sección anterior.

En un principio, el modelo contaba con la simulación del sistema de disipación de calor por medio de un flujo de aire proveniente de los ventiladores que atravesaba los

disipadores de aletas. Esto incluía parámetros, selecciones, variables, materiales, físicas, multifísicas y mallado diferente para tomar en cuenta el fenómeno de transferencia de calor a un fluido en movimiento.

El modelo cuya configuración se describe en breve fue el resultado de pruebas de ecuaciones de turbulencia, implementación de capas de frontera, suposiciones en las variables de entrada y una gran cantidad de pruebas de mallado.

5.2.1. Configuración del sistema de disipación de calor por flujo de aire

La configuración del modelo con simulación del flujo de aire de enfriamiento en los disipadores de calor parte de un modelo semejante al detallado con anterioridad para el sistema en estado estacionario. Mas incluye algunos cambios que se explicarán a continuación.

Definiciones globales

En los parámetros del sistema se incluyen los valores de la velocidad del aire para cada disipador, $V_{left} = 1.2265$ m/s para el ventilador izquierdo y $V_{right} = 1.0314$ m/s para el derecho, y se emplea un factor x_{vel} que multiplica la velocidad de cada ventilador para aumentarse según sea requerido.

Los valores de velocidad se calculan a partir del flujo total y la razón de velocidad de cada ventilador, ver ecuación C.2 en la sección de **Muestra de Cálculo**. El factor x_{vel} se agrega a causa de que la simulación requería demasiados recursos para acercar el valor de calor retirado del sistema, como se explicará en la siguiente sección, por lo que se opta por aumentar el factor para compensar este efecto sin afectar sustantivamente el tiempo y los recursos requeridos. Esta es uno de las razones por las cuales se optó por no utilizar este modelo.

Definiciones

Las selecciones exclusivas de este modelo son las siguientes:

- Air: selección del dominio de los bloques de aire.
- Left_inlet: frontera de entrada de aire del disipador izquierdo.
- Right_inlet: frontera de entrada de aire del disipador derecho.
- Left_outlet: frontera de salida de aire del disipador izquierdo.
- Right_outlet: frontera de salida de aire del disipador derecho.
- Air-to-fins: fronteras del aire en contacto con las aletas.
- Fins-to-air: fronteras de las aletas en contacto con el aire.
- Boundary_layers: fronteras del aire exceptuando la entrada y la salida.
- Air+Fins: fronteras del aire y de las aletas de los disipadores en contacto.

Para este modelo se crean también acoples y variables para monitorear la temperatura del aire de salida de los disipadores y la caída de presión en los mismos, pero, para efectos de esta sección no es necesario explicar su creación. Se emplea el mismo método y nomenclatura de la sección anterior empleando “p” como variable para la presión.

Materiales

En la sección de *Materiales* se agrega el material *Aire* de la librería. No se modifica ninguna de sus propiedades y se agrega como selección *Air*.

Físicas

A diferencia de la configuración del modelo final descrita con anterioridad, para este sistema se elige la multifísica de *Fluido no isotérmico* con subfísica de *Flujo turbulento*. Esto cambia el submódulo de *Transferencia de calor en sólidos* por *Transferencia de*

calor en fluidos. El cual incluye todas las opciones del módulo de sólidos y varias más para la simulación de un fluido.

Para el submódulo de *Transferencia de Calor en Fluidos* se elige la selección *Air*. Y se coloca la opción de tipo de fluido como “Gas/Líquido”. Se revisa el origen de las propiedades como en el submódulo anterior. En el submódulo de *Valores Iniciales* se coloca la temperatura inicial para las iteraciones, el parámetro T_{amb_in} .

Para configurar el aire que atraviesa los disipadores de calor en forma de fluido turbulento se emplea la física de *Flujo Turbulento*, $\kappa - \omega$. La elección de este modelo de turbulencia se decide luego de varios modelos de prueba en los cuales se compara la exactitud de los resultados entre las ecuaciones de $\kappa - \omega$ y $\kappa - \epsilon$, con y sin capas de frontera. En la configuración del módulo principal se especifica la selección *Air* la cual indica que las funciones se deben aplicar únicamente en los dominios del aire. Se elige la opción de *Flujo compresible* ($Ma < 0.3$), esto porque el número de Mach para el aire, determinado con una velocidad menor a 10 m/s y una temperatura de 310 K, es menor a 0.3. Para simular turbulencia, COMSOL utiliza el modelo de ecuaciones de Navier-Stokes con Reynolds-promediado (RANS), el más utilizado en CFD, entre las opciones que posee se elige $\kappa - \omega$.

Para definir la temperatura de frontera en la entrada del aire a sus dominios se emplean submódulos de *Temperatura*. Uno para cada disipador con selección *Right_inlet* y temperatura de entrada $T_{air_in_right}$ para el disipador derecho y sus homólogos para el disipador izquierdo.

En las salidas del flujo para cada disipador se debe asegurar que se cumplan las condiciones de sus fronteras. Una condición muy importante es que el calor pueda abandonar el sistema por medio de dicha frontera. Esto se logra mediante submódulos de *Salida de flujo*, una para cada selección de salida, *Right_outlet* y *Left_outlet*.

Por defecto se crean tres submódulos: *Propiedades del fluido*, *Valores iniciales* y *Pared*, estas no ameritan cambios; pero, los valores iniciales se pueden modificar a valores

cercanos al estado estacionario una vez se conozcan para ayudar con la convergencia del resultado final.

Las condiciones de entrada del aire se configuran creando dos submódulos de *Entrada*, uno para cada disipador. Para el disipador izquierdo se coloca la selección *Left_inlet* y la condición de frontera como velocidad con un valor de entrada normal especificada por el parámetro V_left multiplicado por x_vel . De igual forma para el disipador derecho, empleando la selección *Right_inlet* y el parámetro $V_right \times x_vel$.

En la salida del fluido se deben fijar condiciones que no vayan a alterar ningún resultado y, por el contrario, brinde información útil, como la caída de presión en los disipadores. Para esto se emplean dos submódulos de *Salida*. En el disipador izquierdo empleamos la selección *Left_outlet* y *Right_outlet* para el derecho. Se fija una condición de salida de 0 Pa, ya que se emplean presiones absolutas en el sistema.

Multifísicas

Para acoplar las físicas empleadas se utiliza el módulo de *Multifísicas* con su submódulo de *Flujo no-isotérmico*. En este se eligen las opciones de *Incluir el trabajo generado por los cambios de presión* e *Incluir disipación viscosa*, esto ya que agregan términos a las ecuaciones para acercarla más a la realidad sin aumentar considerablemente los recursos ni el tiempo de simulación.

Mallado

El mallado para este modelo es igual al de la sección anterior pero incluyendo los dominios de aire y el acople de estos con las aletas de los disipadores. Para esto se incluyen los siguientes pasos:

- Tamaño del dominio del aire: se emplea la selección de *Air* con parámetros estándar del mallado general.
- Fronteras del aire: se emplea la selección *Air+Fins*.

- Tamaño máximo de los elementos = 1 mm.
- Factor de crecimiento máximo de los elementos = 1.13.
- Copia de aletas a aire: copia del mallado de las aletas al aire. Selección *Fins-to-air* a *Air-to-fins*.
- FT aire: mallado del aire. Selección *Air*.
- Capas de frontera: cuando se utilizan se agregan al final del modelo. Selección *Air* y se elige la opción de *recorte* para el manejo de los bordes agudos.
 - Propiedades de las capas de frontera: se elige la cantidad de capas de frontera según convenga, el factor de crecimiento entre capas contiguas y el grosor de la primera capa. Selección *Boundary_layers*.

Para el mallado de sistemas empleando fluidos, por lo general se parte de los mismos y se procede con los elementos sólidos en contacto. Esto debido a que el fluido por lo general requiere de una mayor precisión de cálculo. Sin embargo, este sistema cuenta con aletas muy delgadas con elementos muy pequeños, razón por la cual se parte de los dominios más finos. Además, emplear elementos demasiado finos en el aire aumenta significativamente el tiempo de simulación y los requerimientos de computo.

Estudio y resultados

La sección de *Estudio* del modelo no cambia al elegir estás físicas ya que lo que se desea estudiar sigue siendo el estado final del sistema con respecto a las condiciones iniciales, las variables introducidas y las físicas de trabajo.

En la presentación de resultados, se agregan valores derivados para las variables nuevas y un gráfico volumétrico con iso-superficie de la presión, p , del sistema.

5.2.2. Selección del modelo de turbulencia

La simulación del enfriamiento convectivo de los disipadores a través del flujo de aire proveniente de las aletas requiere identificar el régimen de flujo a través de los disipadores, seleccionar el modelo adecuado para la simulación y la implementación de capas de frontera.

Para una más adecuada simulación del fluido en las zonas cercanas a la pared se prefiere colocar capas de frontera. Estas son subdivisiones del mallado en las zonas donde el fluido presenta más variación con respecto al promedio de la masa ubicada en el centro del flujo. Como se conoce, la velocidad del fluido tiende a cero mientras se acerca a la pared y por esta razón su capacidad, en el caso de estudio, para absorber y transferir calor se ve afectada.

La introducción de las capas de frontera en el fluido afecta significativamente la complejidad del mallado, por ende, el tiempo de ejecución y la cantidad de recursos requeridos para la simulación. En el modelo completo no se logró conseguir la introducción de las capas del sistema en el mallado debido a la alta complejidad de la geometría, aún después de satisfactoriamente hacerlo en un sistema simplificado con uno solo de los disipadores. Por esta razón se decide realizar una prueba para entender el efecto de la ausencia de estas capas en la precisión de los resultados finales.

La prueba se realiza en un sistema simplificado del disipador de calor con solamente dos aletas, un tubo de calor cortado y una fuente de calor superficial en el extremo caliente del sistema. Se emplean velocidades cercanas a las empleadas en la simulación y una potencia calórica adecuada para producir temperaturas cercanas a las existentes en el sistema experimental. Se compara la cantidad y existencia de las capas de frontera, el modelo de turbulencia elegido y la finura del mallado, empleando como variable respuesta la temperatura de la cara caliente del tubo de calor, donde se coloca la fuente. Se debe tener en cuenta que los resultados sirven para denotar diferencias significativas, mas no representan las condiciones reales del sistema debido a que se obtienen de una

sobre-simplificación del modelo.

La Figura 5.2.7 muestra las curvas de temperatura de la zona caliente con respecto a la velocidad del aire para tres simulaciones variando el número de capas de frontera y el mallado empleando el modelo $\kappa - \epsilon$ para la turbulencia. En esta gráfica se observa como, a las velocidades de estudio, el número de capas afecta considerablemente. Esto se debe a la existencia del gradiente de velocidades cerca de la pared, por lo que una mayor subdivisión de los elementos nos brinda mayor precisión. A su vez, la finura del mallado no varía significativamente el resultado final ya que las capas de frontera no se ven afectadas en gran medida por el mallado general del dominio en esta geometría.

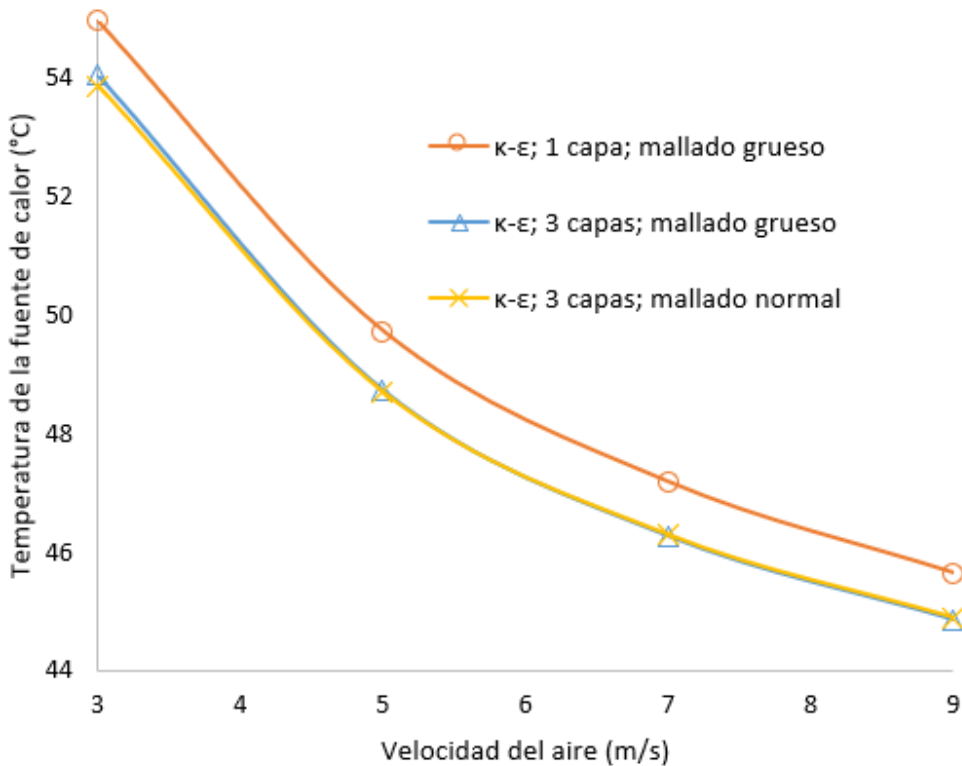


Figura 5.2.7. Variación en la extracción de calor producto de la cantidad de capas de frontera y el mallado para una aleta simple (Elaboración propia, 2019).

Al variar el modelo de turbulencia entre $\kappa - \epsilon$ y $\kappa - \omega$ además de la presencia de

capas de frontera en el mismo modelo de prueba se obtienen las curvas de la Figura 5.2.8. Las curvas con y sin capas de frontera para un mismo modelo son cercanas en diferencia absoluta, en cambio, la diferencia con la temperatura final denota una mayor precisión al emplear capas de frontera, como es esperado. El modelo $\kappa - \omega$ contiene ecuaciones más adecuadas para su empleo en modelos cerca de las paredes (Wilcox, 2006), esto se denota en la pequeña diferencia entre los modelos tanto para las corridas con capas de frontera como sin ellas.

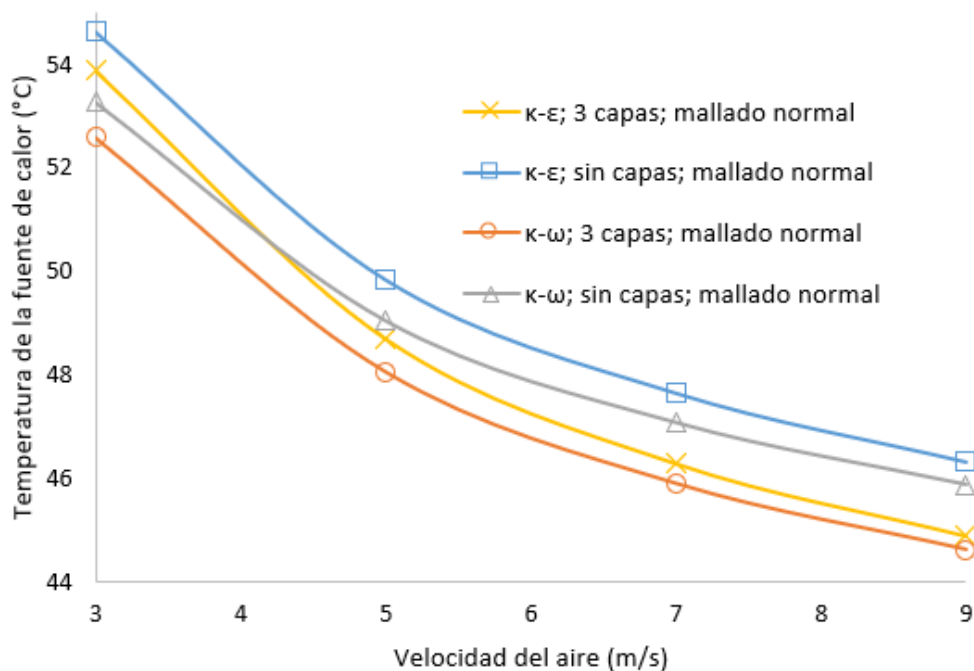


Figura 5.2.8. Variación en la extracción de calor producto de la presencia de capas de frontera y el modelo de turbulencia para una aleta simple (Elaboración propia, 2019).

La Figura 5.2.9 se conforma de las curvas en las cuales, empleando el modelo $\kappa - \omega$ sin capas de frontera, se varió la finura del mallado. Como se puede observar, la temperatura disminuye al emplear parámetros más finos para la subdivisión del dominio. Esto se debe a que al disminuir el tamaño de los elementos se obtienen elementos cada vez más finos cerca de las paredes, los cuales ayudan a resolver con mayor precisión las

ecuaciones en la zona del gradiente de velocidades. Para el mallado *muy grueso* y *grueso* el mallado no afecta de forma tan significativa debido a que predominan los parámetros del mallado de las aletas, las cuales son delgadas y contienen elementos pequeños.

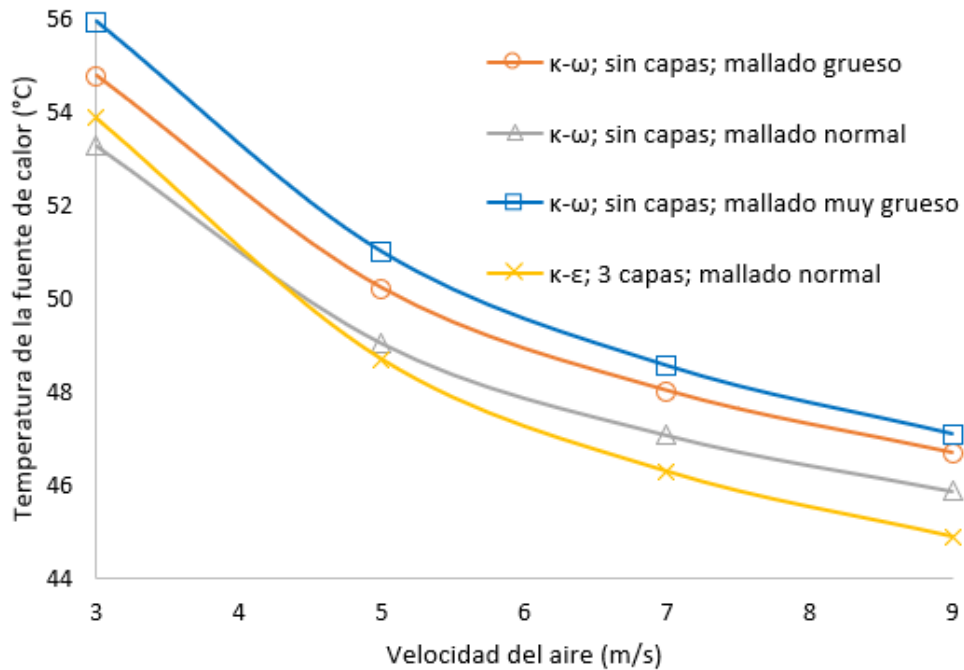


Figura 5.2.9. Variación en la extracción de calor producto del mallado para una aleta simple sin capas de frontera (Elaboración propia, 2019).

A la velocidad de 3 m/s y menores, para todas las gráficas, los valores de temperatura comienzan a dispararse. Esto se debe a que se acercan al flujo laminar donde las ecuaciones empleadas son inexactas y se debe cambiar a modelos para flujo laminar.

Cuando el modelo con fluido de enfriamiento se empleaba, existía un error en el cálculo de la velocidad del aire, lo que arrojaba valores superiores a los reales y aseguraban una condición de flujo turbulento. Al encontrarse y arreglarse este problema la velocidad del fluido acerca el flujo a la condición laminar con valores de Reynolds dentro de la zona de transición. Esta es una de las razones por las cuales se opta por reemplazar la simulación del flujo de aire por un coeficiente convectivo de transferencia

de calor en las aletas.

5.2.3. Reemplazo del modelo de enfriamiento convectivo

Posterior a la corrección en la velocidad del aire mencionada y una reunión con miembros del equipo de Intel de Costa Rica se decide por reemplazar la simulación del flujo de aire en los ventiladores por coeficientes convectivos de transferencia de calor. La decisión se basa en los siguientes criterios:

- No se logró la implementación de las capas de frontera en los disipadores debido a su compleja geometría y mallado. Esto afecta considerablemente la exactitud de los resultados.
- Los requisitos computacionales, en especial de memoria RAM, aumentan considerablemente al utilizar mallado fino para compensar la ausencia de capas de frontera.
- El tiempo de la simulación en estado estacionario con flujo de aire es de mínimo 7 horas. En cambio, empleando los coeficientes convectivos se reduce a cerca de 20 minutos. Esto permite agilizar las simulaciones y aumentar la cantidad de pruebas a realizar.
- Al arreglar el error de la velocidad, el flujo de aire se encuentra en término transitorio cerca del flujo laminar. Esto dificulta su simulación tanto con modelos turbulentos como para flujo laminar.
- El equipo de Intel indica que, para las simulaciones en estado dinámico, el enfoque de este estudio, se emplean, como norma, coeficientes convectivos para reducir la complejidad del sistema. Esto permite disminuir el tiempo efectivo de simulación y los requerimientos computacionales.

Al realizar el cambio en el modelo se decide realizar una pequeña prueba con el modelo anterior para aproximar los valores del coeficiente convectivo de transferencia

calor en las aletas. Se utiliza un modelo con variación en la velocidad del aire para acercar el valor de las variables de respuesta a los datos experimental. Se utiliza una aproximación de la ecuación 5.1 con un área de intercambio de 0.0156 m^2 , la diferencia entre la temperatura promedio del disipador y la temperatura del aire de entrada y el promedio de calor entrante por las fronteras de los disipadores. Como se muestra en la **Muestra de cálculo**, ecuación C.3.

$$\frac{q_{conv}}{A_n} = h\Delta T \quad (5.1)$$

donde q_{conv} es la tasa de transferencia de calor por convección, en W; A_n es el área normal a la dirección del flujo calórico, en m^2 ; ΔT es la diferencia de temperatura entre la superficie y el fluido, en K; y h es el coeficiente convectivo de transferencia de calor, en $\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

El cálculo se aplica para los disipadores y se obtiene un valor de $108 \text{ W}/\text{m}^2/\text{K}$ para el disipador izquierdo y $96 \text{ W}/\text{m}^2/\text{K}$ para el derecho. Estos valores se emplean como valores iniciales para la determinación del coeficiente convectivo de transferencia de calor en las aletas mediante barrido paramétrico.

Posterior a la aplicación de los coeficientes convectivos de transferencia de calor como remplazo a la extracción de calor por medio del flujo de aire se realizan aproximadamente 150 horas de simulación para obtener un resultado válido para el sistema en estado estacionario. Con la simulación lista, se realiza una serie de análisis de sensibilidad de ciertos parámetros del sistema y del mallado para observar su efecto en el resultado final.

5.3. Verificación del modelo final

Una vez obtenido un modelo funcional para el sistema de estudio, se deben realizar pruebas para verificar su consistencia y precisión. Esto para asegurar que los resultados

de la simulación corresponden a condiciones físicas esperadas del sistema en equilibrio.

Para verificar la consistencia de la simulación, se observa el resultado de la variable, o variables, de interés cuando se aplican cambios en los parámetros de entrada. Esto permite identificar si existen problemas a la hora de plantear las variables, ecuaciones y relaciones que conforman el sistema de estudio (McGovern y Gupta, 2011).

La precisión de la simulación se analiza mediante pruebas de variación del mallado. Como se explicó con anterioridad, y se entiende del teorema fundamental del cálculo, el resultado de una aproximación a la respuesta de un sistema de ecuaciones diferenciales mediante diferencias finitas es más preciso cuanto menor sea el tamaño del paso tomado para la aproximación. Para el modelo tridimensional se puede decir que el resultado es más preciso cuanto menor sea el tamaño de los elementos debido a que esto asegura una mejor continuidad de las ecuaciones en los nodos (Reddy, 1984b).

5.3.1. Efecto de parámetros en el modelo

El modelo posee ciertos parámetros los cuales se consideraron de importancia para estudiar su efecto en la simulación. Estas se eligen debido al origen de sus valores, la importancia en el resultado final, la relevancia para el siguiente paso de simulación y la inexactitud esperada en su determinación.

Los parámetros de estudio se hacen variar desde un 50 % hasta un 150 % de su valor final, se emplea una variable multiplicadora en un barrido paramétrico con el fin de observar el efecto normalizado de cada parámetro. Como variable de respuesta se elige la temperatura máxima del CPU, ya que es el valor más importante a tener en consideración en el estudio, en general, y en la siguiente etapa de simulación en estado dinámico.

En las gráficas de esta sección se puede observar un punto de convergencia de todas las curvas. Este corresponde al resultado final del sistema en estado estacionario sin cambios en sus parámetros y se da al mantener como “1” el factor multiplicador.

Sólidos de interés

Los primeros parámetros a analizar son las conductividades térmicas de varios materiales o dominios del sistema. Los valores de “ k ” para los tubos de calor, k_{HP} , y el vapor, k_{vapor} , son datos proporcionados por Intel de Costa Rica (2018) de modelos construidos para diferentes tubos de calor y emplean datos promediados de diferentes sistemas, pero no del sistema de estudio, ya que las propiedades de estos componentes depende de los materiales empleados y el método de fabricación. También se estudia el efecto de la conductividad del material de la placa madre, k_{FR4_MB} , debido a que la conductividad del mismo suele variar dependiendo de la cantidad de filamentos de cobre entre sus placas Sarvar *et al.* (1990).

En la Figura 5.3.10 se muestra el efecto de la conductividad térmica de los distintos dominios de interés. Partiendo de la ecuación de Fourier simplificada, 5.2, es de esperarse la forma de la gráfica debido a la dependencia de la temperatura con respecto a la conductividad de la forma $T \propto 1/k$.

$$\frac{q_{cond}}{A} = -k\nabla T \quad (5.2)$$

donde q_{cond} es la tasa de flujo de calor, en W; A es el área normal a la dirección del flujo de calor, en m^2 ; k es la conductividad térmica, en $W/(m\ K)$; ∇T es el gradiente de temperatura, en K.

La gráfica también denota que la dependencia de la respuesta final no es tan sensible al valor de la conductividad térmica de estos sólidos, ya que presenta una variación máxima de cerca de $2.5\ ^\circ C$ al pasar de 0.5 a 1.5 veces la conductividad de los tubos de cobre, con un valor central cercano al valor común para el cobre metálico. Esta variación se comprende cuando se identifica que todo calor que sale del sistema por medio de los disipadores de calor debe viajar por los tubos de calor y su extensión es significativa.

La conductividad térmica del vapor posee un efecto cercano al de la coraza de cobre

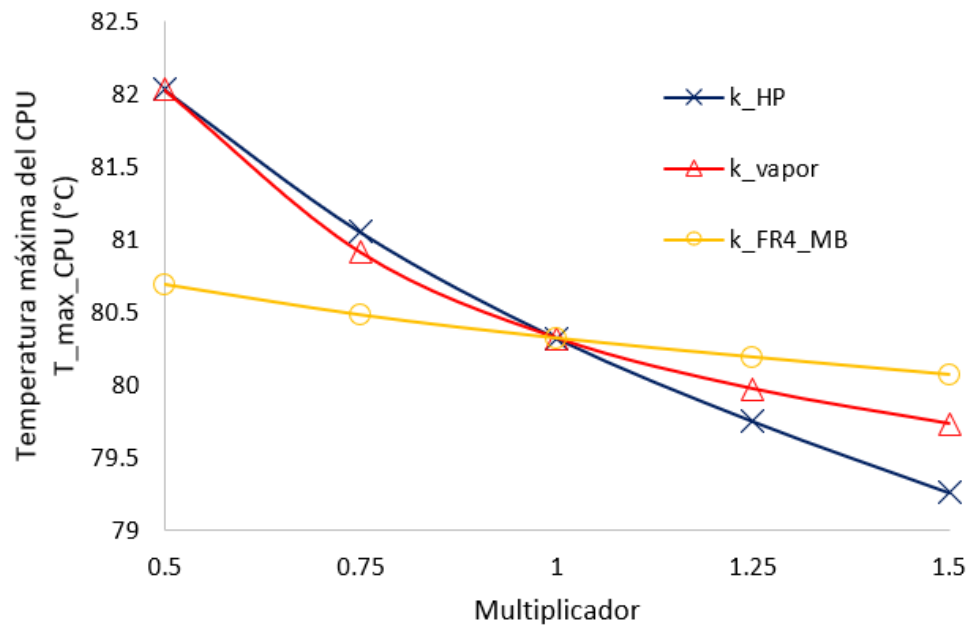


Figura 5.3.10. Efecto de la conductividad térmica de los tubos de calor, el vapor y la tarjeta madre sobre la temperatura del CPU (Elaboración propia, 2019).

en los tubos de calor, de igual manera por su rol en la extracción de calor del sistema y la extensión que comprende. Sin embargo, su valor central es sumamente grande, con respecto a la conductividad de los demás sólidos del sistema, por lo que no se considera que vaya a variar tanto de un sistema a otro.

El efecto de la variación en la conductividad térmica del material de la placa madre en la temperatura final del CPU no muestra significancia notable. En este dominio, a pesar de poseer una extensión notable y funcionar como salida de calor, la tasa de extracción de energía por su superficie no juega un papel tan notable como el de la energía extraída por los disipadores, como se discute más adelante. Lo que permite seguir utilizando el valor recomendado por Intel de Costa Rica (2018).

Capas delgadas

El siguiente análisis se enfoca en el efecto de la conductividad térmica de dos materiales que se simulan como capas delgadas en el modelo: la resistencia a la evaporación en los tubos de calor, k_{evap} , y la pasta térmica, k_{TIM} . Estos parámetros se eligieron para el estudio debido a que los valores de conductividad empleado para ambos fueron recomendados por Intel de Costa Rica (2018) y pueden variar de sistema a sistema. La Figura 5.3.11 muestra los resultados obtenidos.

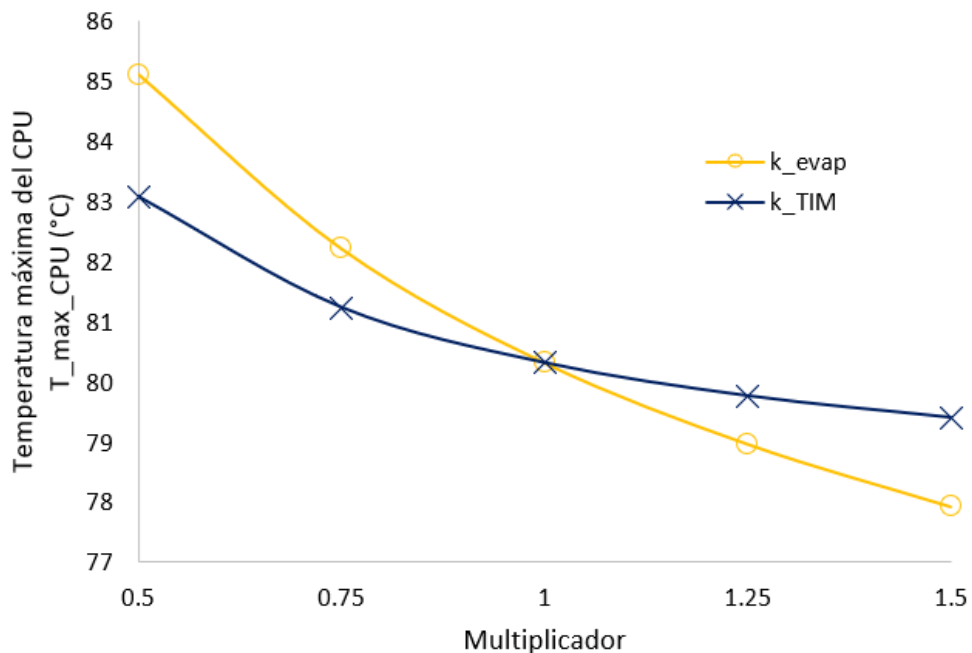


Figura 5.3.11. Efecto de la conductividad térmica del TIM y la resistencia a la evaporación sobre la temperatura del CPU (Elaboración propia, 2019).

El comportamiento de las curvas sigue lo esperado según lo impuesto por la ecuación 5.2. Para ambos parámetros se observa un efecto significativo para un componente que se podría subestimar al momento de la simulación, pero que juega un rol importante como capas resistivas. El mayor efecto se da con respecto a la conductividad térmica de la resistencia a la evaporación en los tubos de calor, esto es esperado debido a que

su grosor es mayor que el del TIM.

Salidas de calor

El coeficiente convectivo de transferencia de calor empleado en el cuerpo del sistema, h_{conv} , es un valor promedio sugerido por Intel de Costa Rica (2018) con base en las entradas de aire del sistema. Como tal, se debe estudiar su efecto en el resultado final. Por otro lado, el coeficiente homólogo para los disipadores de calor, h_{fan} , se determina mediante barridos paramétricos con el fin de llegar a la respuesta final válida del sistema de trabajo. La Figura 5.3.12 muestra el efecto de estos coeficientes sobre la temperatura del procesador.

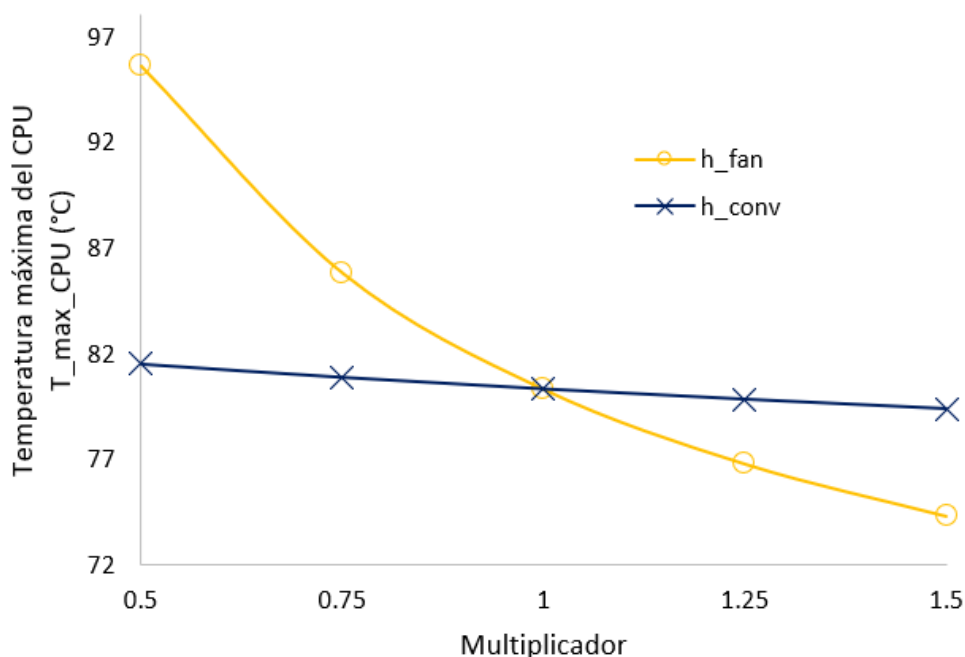


Figura 5.3.12. Efecto de los coeficientes convectivos de transferencia de calor en las aletas y el sistema sobre la temperatura del CPU (Elaboración propia, 2019).

De manera muy satisfactoria, se puede observar que el valor de coeficiente convectivo de transferencia de calor en el cuerpo del sistema no afecta significativamente, menos

de 1 °C, la temperatura del sistema. Esto a causa de la existencia de un método activo de extracción de calor que predomina y reduce significativamente la dependencia del sistema al aire que circula sobre el mismo. Esto permite aceptar el valor utilizado.

El comportamiento de las curvas cumple con la ecuación 5.1, en la cual la temperatura es proporcional al inverso del coeficiente convectivo de transferencia de calor. De igual forma que con la conductividad en los casos pasados.

El efecto del coeficiente en las aletas es sumamente significativo, por esta razón, este parámetro se determina mediante simulación para obtener el valor que permite llegar al sistema a un estado válido según los resultados experimentales.

Fuentes primarias de calor

Al igual que con el coeficiente convectivo en los disipadores, el calor producido por el procesador gráfico, P_{GPU} , no es un dato que se posee inicialmente, solo el calor máximo posible, 120 W. Por esta razón se determina por medio de barridos paramétricos y se estudia su efecto sobre la variable respuesta para observar la dependencia existente.

En el caso de la potencia del procesador central, P_{CPU} , es un parámetro fijo del sistema en la simulación en estado estacionario, pero, variante en el estudio en estado dinámico. Se estudia su efecto para conocer el estado estacionario del sistema al emplearse de base alguna de estas potencias. La Figura **5.3.13** muestra la dependencia de la respuesta final con respecto a la potencia de los procesadores.

Como se espera de la ecuación 5.2 la temperatura del CPU debe ser proporcional al calor generado o transmitido, a esto se debe la linealidad de las curvas. El calor generado en el procesador central afecta en gran medida la variable respuesta debido a que ocupan el mismo volumen físico. Por otro lado, el efecto del calor generado por el GPU, con un valor central de 24 W, demuestra la dependencia entre los sistemas de extracción de calor, conectados por medio de un tubo de calor.

Se puede observar también la temperatura límite de 100 °C, según Intel (2016), es

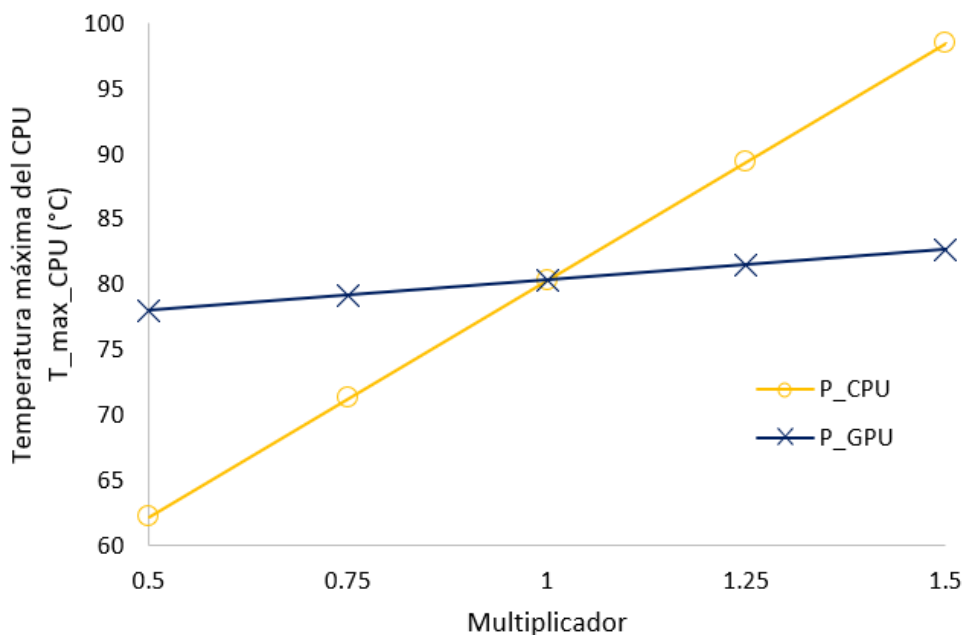


Figura 5.3.13. Efecto de la potencia de los procesadores sobre la temperatura del CPU (Elaboración propia, 2019).

alcanzada por el CPU cuando se emplea una potencia de 1.5 veces el valor TDP.

Fuentes secundarias

Por último, se analiza el efecto de la potencia de las resistencias variables. El valor final para cada uno de estos parámetros se determinó mediante barridos paramétricos al igual que para la potencia del GPU. Su efecto se muestra en la Figura 5.3.14.

El efecto sobre la temperatura del CPU, como se observa en las curvas, es mínimo. Esto se debe a que el calor producido por estas fuentes es muy pequeño, en comparación con el producido por los procesadores, y no se encuentran a corta proximidad del CPU. Como se muestra, el mayor efecto lo tienen las VRs cerca de los chips, P_{VR_Chips} , esto porque poseen la mayor potencia de los tres, 2W, y están en contacto físico con el disipador del GPU y este conectado al CPU por medio de un tubo de calor.

Las resistencias variables cerca de la zona caliente del sistema, P_{VR_HS} , poseen

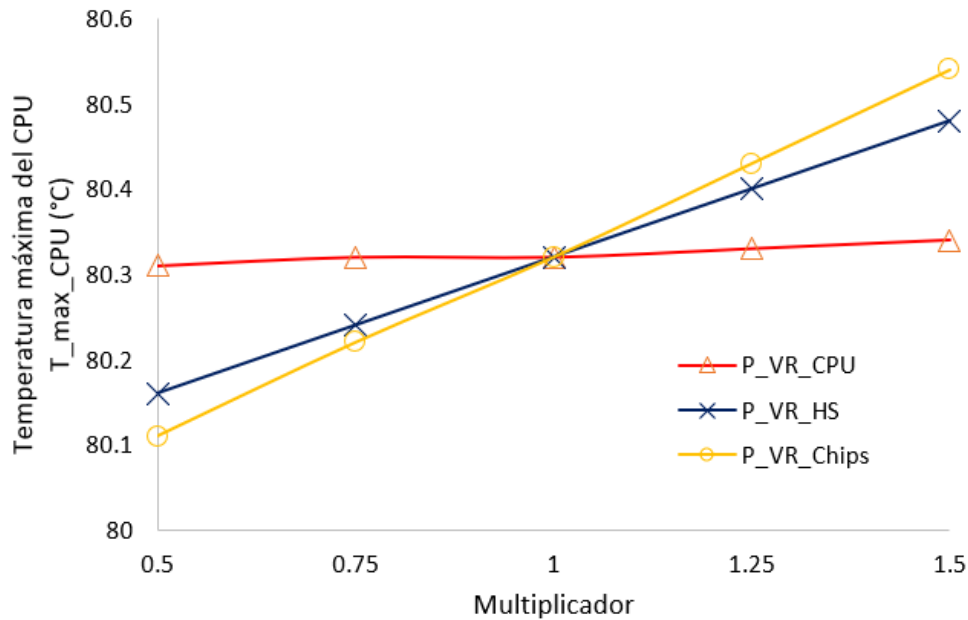


Figura 5.3.14. Efecto de la potencia de las resistencias variables sobre la temperatura del CPU (Elaboración propia, 2019).

una potencia determinada como 1.12 W y afectan al CPU debido a su contacto físico con un tubo de calor. Por último, los VRs cerca del CPU, P_VR_CPU , solo se encuentran en contacto con la tarjeta madre, cuya conductividad térmica es sumamente baja, razón por la cual no afecta de manera significativa la variable respuesta.

Una vez analizado el efecto de estos parámetros en la temperatura máxima del CPU, se procede a verificar la precisión de la respuesta mediante un análisis de sensibilidad del tamaño de las subdivisiones de los elementos.

5.3.2. Análisis de sensibilidad del mallado

Otro requerimiento, y uno muy importante, para verificar el modelo es realizar un debido análisis de sensibilidad para observar el efecto de los parámetros del mallado. Esto permite, a la vez, determinar el tamaño de malla más adecuado, con respecto a algunas variables de interés, en este caso, la temperatura máxima del CPU.

En el Cuadro **5.3.1** se muestran los diferentes resultados obtenidos en términos de memoria volátil (RAM) máxima requerida durante la simulación, el tiempo de la corrida, el peso del archivo final, la temperatura de la unidad central de procesamiento y la diferencia relativa entre las temperaturas del CPU con respecto al mallado más grueso.

Los distintos valores en los parámetros del mallado según la fineza elegida se muestran más arriba en este capítulo, en la sección de **Configuración de la estructura de simulación para el sistema en estado estacionario**.

Cuadro 5.3.1. Variación de la temperatura de los procesadores con respecto la finura del mallado.

Mallado	RAM (GB)	Tiempo (min)	Peso (MB)	T _{max} CPU (°C)	Diferencia relativa
Grueso	7.2	7.1	84	80.33	Ref.
Normal	10.5	9.1	126	80.40	0.09 %
Fino	11.9	12.0	178	80.45	0.15 %
Extra Fino	20.1	21.4	347	80.50	0.21 %

Las diferencias relativas entre los resultados de la temperatura del núcleo de procesamiento para los diferentes mallados no varían significativamente debido a dos razones muy importantes.

La primera causa son los valores utilizados para el mallado de ciertas zonas en específico como aquellas cerca del CPU. Como se menciona en la metodología, la zona cerca de la unidad de control térmico es de suma importancia, por esta razón se emplea un mallado “extremadamente fino”, según la caracterización de COMSOL, para el procesador y el substrato; y “extra fino” para el propagador de calor del CPU y su respectivo soporte. De igual forma se da en los tubos de calor y los disipadores de calor. Por esta razón un incremento en la fineza del mallado no aumenta en gran medida el tamaño de los elementos ni su calidad en las zonas de mayor interés.

La segunda la se le atribuye a las salidas de calor. En el modelo inicial con simu-

lación del flujo de aire en el disipador, el tamaño de los elementos, como se analizó con antelación, afecta significativamente la energía removida del sistema y con esto los perfiles de temperatura. Pero, el modelo final emplea coeficientes de transferencia de calor por convección para simular la salida de energía del sistema, lo cual no requiere de un dominio de aire a ser mallado.

Con estos resultados se comprueba que la sensibilidad del modelo al mallado es baja, al menos en los *niveles* de mallado utilizados. Sin embargo, deja con una decisión importante, si los resultados son tan cercanos ¿cuál mallado se debe emplear? Para responder esta interrogante existen los otros resultados tabulados en el Cuadro **5.3.1**.

El consumo de memoria RAM no cambia significativamente durante las corridas en estado dinámico, con respecto a las realizadas en estado estacionario, además, cada nodo del clúster de computadoras del CICIMA cuenta con casi 64 GB disponibles, por lo que la memoria empleada no es problema, pero, no se puede decir lo mismo del tiempo de corrida y el peso del archivo final.

El tiempo de ejecución aumenta entre 5 y 10 veces para corridas en estado dinámico, dependiendo de la cantidad de pasos de tiempo (deltas si se desea) tomados por el algoritmo de resolución. De forma similar sucede con el peso del archivo de resultados: aumenta significativamente con la cantidad de pasos de tiempo con resultados almacenados, no todo paso de tiempo es almacenado en la respuesta final.

Teniendo estos resultados en cuenta, se emplea el mallado general en “nivel” *normal* para las simulaciones tanto en estado estacionario así como las posteriores en estado dinámico.

5.4. Validación del modelo en estado estacionario

La simulación del estado dinámico del sistema para el estudio con materiales de cambio de fase parte de un estado inicial estacionario, por esta razón, debe validarse

como cercano a la realidad. Partiendo de una geometría, valores para ciertas variables del sistema y condiciones de frontera se encontró, mediante suposiciones, iteraciones y optimización, una solución con valores cercanos a las condiciones del sistema experimental a potencia TDP. El Cuadro 5.4.1 compara el resultado obtenido para la temperatura de los puntos de control del sistema.

Cuadro 5.4.1. Resultados de los puntos del sistema requeridos para la validación del modelo en estado estacionario.

Variable	Diferencia entre la temperatura experimental y de simulación (°C)	Porcentaje de error (%)
T_SSD	-0.04	0.1 %
T_PCH	-7.70	11.9 %
T_Memory	-2.7	4.9 %
T_MB_Hotspot	-0.23	0.3 %
T_HP_Right-Fan	3.06	5.4 %
T_HP_GPU	3.33	5.8 %
T_HP_CPU	0.79	1.2 %
T_HP_Left-Fan	1.16	1.9 %
T_VR_CPU	-0.06	0.1 %

Las temperaturas más importantes son aquellas más cercanas a la unidad central de procesamiento, es decir, T_{HP_CPU} y $T_{HP_Left-Fan}$. Estas aseguran que el estado final de la temperatura del CPU es cercano a la real que presenta el sistema experimental. El porcentaje de error de 1.2% se considera aceptable para la temperatura de los tubos de calor sobre el sistema debido a que requeriría un muy pequeño ajuste de algún parámetro variable para alcanzar una diferencia nula. Un aumento en la desviación de la temperatura del tubo de calor izquierdo es esperable debido al empleo de parámetros de otros tubos de calor que se pueden comportar de forma distinta a los tubos del sistema.

Las temperaturas de las variables T_{HP_GPU} y $T_{HP_Right-Fan}$ se alejan más de lo experimental, con porcentajes de error de poco más de 5% a causa, probable-

mente, del modelo de los tubos de calor como bloques sólidos con distintas propiedades térmicas. Como explica Zohuri (2011), los tubos de calor contienen una mezcla bifásica de agua y vapor en su interior, para el sistema de estudio, el tubo de calor compartido comienza sobre el GPU y se mueve al disipador de calor izquierdo pasando por el CPU. En la realidad el agua que se condensa en el disipador de calor y vuelve por capilaridad al otro extremo del tubo donde se evapora al llegar al CPU debido a su alta temperatura y esto debería provocar que menos agua llegue al GPU incrementando así su temperatura. El modelo para los tubos de calor no toma esto en cuenta y remueve calor de forma proporcional de ambas fuentes, dependiendo solo de los modelos físicos de conducción.

Dos puntos del sistema con altos porcentajes de error, T_PCH y T_Memory , corresponden a componentes del sistema los cuales no se incluyen en la simulación. Por esta razón se asignan puntos existentes de la geometría cercanos a la posición experimental de la termocupla. Esta selección de los puntos acercan sus valores a la temperatura de la zona caliente y por esto presentan valor mayores. Como son valores lejos de la zona de importancia y de componentes que no se estudian, se puede ignorar su discrepancia. De forma parecida con la variables T_SSD , pero esta corresponde a un punto muy alejado del sistema y se emplea como valor de temperatura ambiente debido a su lejanía de la zona de calor.

La temperatura de los puntos $T_MB_Hotspot$ y T_VR_CPU dependen casi únicamente de la potencia de los VR y como se empleó como indicativo para su determinación son muy cercanos a los valores experimentales y su porcentaje de error es mínimo.

Cabe destacar que existen dos variables que no se toman en cuenta en el Cuadro 5.4.1, la temperatura del aire de salida para cada disipador de calor. Estos se ignoran a razón de que estas temperaturas no se están simulando a causa de la simplificación del modelo para remplazar el modelo de enfriamiento mediante flujo de aire por un coeficiente convectivo de transferencia de calor.

La información en esta sección y anteriores permite aceptar el modelo del sistema en estado estacionario como una válida representación del sistema de estudio en las condiciones de trabajo, potencia de diseño térmico (TDP).

La simulación validada en estado estacionario arroja también información muy útil sobre el sistema. Las temperaturas finales de algunas zonas se muestran en el Cuadro 5.4.2. Estas sirven como base para la selección de los materiales de cambio de fase. Además, brindan información importante acerca de la diferencia entre la temperatura máxima del CPU y la del resto del sistema.

Cuadro 5.4.2. Temperatura obtenida para varias zonas de interés en la simulación en estado estacionario.

Zona	Valor
Temperatura máxima del CPU	80.33 °C
Temperatura promedio del GPU	63.87 °C
Temperatura promedio del soporte del CPU	69.49 °C
Temperatura promedio del substrato del CPU	69.03 °C
Temperatura promedio del propagador de cobre	70.68 °C

5.5. Recapitulación

Las siguientes ideas claves describen el material desarrollado en el capítulo:

- Se detalla la configuración completa del modelo en COMSOL 5.1 para la simulación en estado estable.
- Inicialmente el modelo cuenta con la simulación del flujo de aire de enfriamiento en los disipadores. Esta sección del modelo es remplazada por un coeficiente convectivo de transferencia de calor con el fin de simplificar las simulaciones.

- El efecto de varios parámetros de interés en el modelo final es verificado mediante un análisis de sensibilidad.
- Se estudia la sensibilidad del resultado final de la simulación en estado estacionario con respecto a la fineza del mallado.
- Se valida la simulación en estado estacionario mediante la comparación de los resultados obtenidos y los datos experimentales proporcionados para el sistema en potencia de diseño.

Una vez se valida la simulación en estado estable se puede proceder con la configuración del modelo dinámico para varios ciclos de potencia, seguida por la selección de materiales de cambio de fase de trabajo y depuración de la simulación no-estacionaria. Lo descrito es materia del siguiente capítulo.

Capítulo 6

Simulación del sistema en estado dinámico

El presente capítulo se enfoca en un estudio con varios ciclos de potencia en la unidad central de procesamiento y en el efecto de introducir materiales de cambio de fase en diferentes configuraciones para extender el tiempo de estos ciclos.

Para simular estos fenómenos se parte del modelo en estado estacionario, modificando diferentes secciones, agregando las físicas adecuadas y adicionando un estudio en estado dinámico. Generando así una simulación que parte del resultado en estado estacionario para iniciar el estudio temporal.

El siguiente paso en el estudio es la selección de los materiales de cambio de fase teniendo en cuenta los perfiles de temperatura del sistema, la información disponible y discriminando entre los criterios recomendados.

Con los PCMs elegidos se parte a la simulación dinámica con varios ciclos de potencia. Esto acarrea intervalos de reconocimiento y resolución de errores hasta conseguir una simulación precisa del comportamiento, esperable, del sistema.

Se concluye el capítulo con los resultados preliminares obtenidos de las corridas para las diferentes configuraciones de materiales de cambio de fase y la etapa de resolución de

problemas. Dando paso al cambio en el algoritmo de estudio del proyecto, en el capítulo siguiente.

6.1. Modelado

A continuación se describirán los cambios en el modelo y los módulos extras, con su respectiva configuración, empleados para la construcción de la estructura de simulación para el sistema en estado dinámico. Siguiendo la estructura del programa de simulación.

6.1.1. Definiciones Globales

En esta sección del modelo se agregan los parámetros extras no presentes en el modelo para el estado estacionario. Los parámetros introducidos se presentan en el Cuadro **6.1.1**. A diferencia del Cuadro **5.1.1** no se colocan los valores de los parámetros ya que estos varían en dependencia al estudio a realizar y los materiales en cada simulación.

Para facilitar el cambio entre las diferentes corridas se guardan los parámetros del estado estacionario, junto con los primeros cuatro del Cuadro **6.1.1**, correspondientes a valores del pico de potencia, en un archivo de texto. Y las propiedades de cada material en un archivo específico. Al momento de emplear un material u otro solamente se eliminan las líneas correspondientes y se carga el archivo del material a simular.

6.1.2. Componentes

En la sección de componentes se agregan definiciones, variables, funciones y selecciones; materiales nuevos para los PCM, físicas nuevas para la simulación del cambio de fase y el cambio de potencia. Además, se modifica el mallado para cada tipo de configuración de PCM en el sistema.

Cuadro 6.1.1. Parámetros del modelo en estado dinámico.

Parámetro	Unidades	Descripción
tau	Adim.	Tiempo de duración del pico de potencia
t_cool	Adim.	Tiempo de duración del enfriamiento posterior el pico de potencia
PL2	Adim.	Aumento porcentual máximo de la potencia en el pico
Smo	Adim.	Duración de la zona de transición entre la potencia basal y máxima en el pico
T_fus	°C	Temperatura media de la zona de fusión
DH_fus	kJ/kg	Entalpía de cambio de fase
DT_fus	K	Rango de temperaturas en el cual se da la fusión
rho_PCM_1	kg/m ³	Densidad del PCM en el estado sólido
Cp_PCM_1	J/(kg K)	Calor específico del PCM en el estado sólido
k_PCM_1	W/(m K)	Conductividad térmica del PCM en el estado sólido
rho_PCM_2	kg/m ³	Densidad del PCM en el estado líquido
Cp_PCM_2	J/(kg K)	Calor específico del PCM en el estado líquido
k_PCM_2	W/(m K)	Conductividad térmica del PCM en el estado líquido

Definiciones

Se inicia, nuevamente, por las *Selecciones*. Acá se agregan únicamente una selección explícita de dominios, se le llama *PCM* y se elige el dominio del material de cambio de fase.

En las definiciones del sistema se añaden dos *Acoples de componentes*: *maxop_PCM* y *aveop_PCM*, para obtener el valor máximo y promedio, respectivamente, de alguna variable en el volumen del PCM; ambos con la selección *PCM*. Para cada acople se crea una variable: *T_v_PCM* con expresión “aveop_PCM(T)” para la temperatura promedio del material de cambio de fase y *T_max_PCM* con expresión “maxop_PCM(T)” para su máximo valor de temperatura.

Posteriormente, se emplea una definición nueva, *Funciones*, para crear las ecuaciones que describen los picos de potencia. Para la simulación de varios picos se emplean dos funciones. La primera es una función rectangular, se le llama *rect1*, en la cual se define

el límite inferior con el parámetro t_cool con el fin de dejar un tiempo muerto antes de variar la potencia para poder observar la estabilidad del sistema, el límite superior con la suma $t_cool + tau$ para agregar el tiempo del pico de potencia luego del tiempo muerto inicial y una zona de transición con el parámetro Smo (del inglés *Smoothing*), esto para suavizar la curva y permitir que el sistema calcule las derivadas adecuadamente cuando se emplean pasos de tiempo grandes.

La segunda función deriva de la necesidad de crear una periodicidad en los picos de potencia. Se emplea una función analítica, se le coloca de nombre: *an1*. En esta se agrega como expresión “ $rect1(t[1/s])$ ” para llamar a la función rectangular con dependencia temporal, se elimina la dimensión de la variable con el término “[1/s]”, ya que la función *rect1* no acepta dimensiones. Como argumentos se coloca el tiempo, t , el cual se emplea como parámetro al llamar la función rectangular. Para habilitar la función de periodicidad, se agrega $Smo/2$ como límite inferior y la suma $t_cool + tau + Smo/2$ en el límite superior; esto en el apartado de *Extensión periódica*.

Parecería lógico repetir la sección temporal que va desde $t = 0$ hasta $t = t_cool + tau$. Pero al suavizar la gráfica rectangular la mitad de la caída de la curva va más allá de este límite por lo que debe incluirse en el límite superior. Pero al hacer esto los picos se van corriendo $Smo/2$ hacía la derecha a medida que se repite la función, por esta razón se fija el límite inferior con este valor. Esto genera medio pico inicial que se elimina iniciando la simulación en un tiempo mayor al valor de $Smo/2$ para que esta parte de la función nunca se lleve a cabo.

Materiales

En esta sección se agregan dos nuevos materiales en blanco: uno para las propiedades del material de cambio de fase en estado sólido, se le llama PCM_1 y se agregan las propiedades de conductividad térmica con valor k_PCM_1 , el calor específico con valor Cp_PCM_1 , la densidad con valor rho_PCM_1 y factor “gamma” con un valor de 1. El

factor “gamma” es una razón entre la capacidad calórica a presión y volumen constante, para esta modelo se deja en la unidad por la dificultad para encontrar estos valores en la literatura para los materiales de cambio de fase y la pequeña variación que existe para los valores de estas propiedades en los sólidos y los líquidos.

El segundo material es homólogo al primero debido a su correspondencia con las propiedades del material en estado líquido. Se introducen las mismas propiedades con los respectivos valores para el material *PCM_2*. De igual forma se coloca la razón γ como 1. Para ambos materiales se emplea la selección de PCM, en este caso no importa cual quede arriba debido a que en las físicas se especifica el material para cada fase.

Físicas

En la sección de físicas se agregan dos nuevos módulos. Se añade una segunda fuente de calor volumétrica para el procesador, al cual se le llama *PL2_CPU*, con *tasa de transferencia de calor total* con expresión $P_CPU*(1+PL2*an1(t[1/s]))$. Esta ecuación mantiene la potencia base del CPU y aplica la variación periódica de la función *an1* con una razón de *PL2*.

El segundo módulo a agregar es *Transferencia de calor con cambio de fase* con selección *PCM*. En este se presiona el botón de edición de las entradas del modelo para habilitar la modificación y declaración de las variables en este apartado. La única variable que a editar es el valor de temperatura con un valor de *T_amb_in*. se debe asegurar que el número de cambios de fase sea 1 y colocar los debidos parámetros en el apartado de cambio de fase: *T_fus* para la temperatura de cambio de fase, *DT_fus* para el intervalo de transición y *DH_fus* para la energía latente de cambio de fase. Para las propiedades de las fases se selecciona el debido material en cada fase y se elige la opción de definición de las propiedades de acuerdo al material para cada fase. La conductividad térmica se selecciona de tipo isotrópica ya que no se cuenta con la variación de la misma en cada dimensión espacial para cada material.

Mallado

El mallado de cada sistema depende de la ubicación del bloque del PCM. Como se trata de la zona de estudio se emplea mallado fino para aumentar la confianza en los cálculos de la simulación. A continuación se detalla la configuración del mallado para cada ubicación del material de cambio de fase:

- Para todas las configuraciones:
 - En el mallado de los propagadores de calor, se agrega un submódulo de tamaño para el propagador sobre el CPU con los siguientes parámetros:
 - Tamaño máximo de los elementos = 11.9 mm.
 - Factor de crecimiento máximo de los elementos = 1.35.
 - Resolución de las zonas angostas = 0.85.
 - En el mallado de los soportes, se agrega un submódulo de tamaño para el soporte bajo el CPU con los mismos parámetros del propagador.
- PCM alrededor del procesador central:
 - Copia del mallado de los alrededores del CPU a las fronteras del PCM en contacto.
 - FT PCM: se aplica a la selección *PCM*. Sus parámetros se eligen como extremadamente finos.
 - Tamaño máximo de los elementos = 0.5 mm.
 - Factor de crecimiento máximo de los elementos = 1.3.
 - Resolución de las zonas angostas = 1.
 - Copia del mallado del PCM a las fronteras del substrato y propagadores en contacto. Selección manual.
- PCM bajo la unidad de control térmico:

- FT PCM: posterior al mallado de los procesadores, se aplica a la selección *PCM*. Sus parámetros se eligen como extremadamente finos, al igual que el caso anterior.
- Copia del mallado del PCM a las fronteras del soporte y tarjeta madre en contacto. Selección manual.
- PCM sobre la unidad de control térmico:
 - Copia del mallado de los tubos de calor a las fronteras del PCM en contacto.
 - FT PCM: posterior al mallado de los procesadores, se aplica a la selección *PCM*. Sus parámetros se eligen como extremadamente finos, igual a la configuración anterior.
 - Copia del mallado del PCM a las fronteras de los propagadores de calor en contacto. Selección manual.

6.1.3. Estudio

Paso 1: Estacionario

En el submódulo de estado estacionario se aplica solo un cambio. Se activa la casilla de *Modificar árbol de físicas*, bajo la sección de *Selección de físicas y variables*, se busca el submódulo *PL2_CPU* y se inactiva para evitar problemas debido a sus funciones temporales.

Paso 2: Dependiente del tiempo

Para simular el cambio de las variables con el tiempo en el estado dinámico se agrega un paso de estudio de tipo *Dependiente del tiempo*. En este se coloca el tiempo inicial, el tamaño de la diferencia o paso, el tiempo final y la tolerancia relativa. Esta última se deja por defecto en 0.001, equivalente a un 0.1 %.

Para este paso se inactiva el submódulo *PL1_CPU*, de forma análoga a como se detalla anteriormente. Además, para habilitar que se emplee el resultado del estudio anterior como estado inicial se activa la casilla de *Valores iniciales para las variables a resolver*, en la sección de *Valores de las variables dependientes*, se elige la solución como *Método*, y el estudio 1 estacionario como *Estudio*, las demás opciones se dejan por defecto. Se repite de igual forma para la casilla *Valores iniciales para las variables no a resolver*.

Dentro de las *Configuraciones del solucionador*, solución actual, en el submódulo del solucionador dependiente del tiempo; en la pestaña de *Pasos de tiempo* se elige el método *Generalized- α* . Esta elección se justifica posteriormente.

6.1.4. Presentación de resultados

De igual forma que para el estado estacionario, se agregan los *Valores derivados* de las nuevas variables *T_v_PCM* y *T_max_PCM*. Se deshabilitan los cálculos de las temperaturas de los diferentes puntos del sistema excepto la temperatura máxima del CPU. Por último se agrega un valor derivado de promedio volumétrico para calcular el porcentaje de PCM que cambia de fase. Para esto se elige la selección *PCM* y la expresión *ht.alpha12*. Si se desea obtener el volumen que cambia de fase se multiplica este valor por el volumen del PCM. Para el caso de la masa se multiplica este último por la densidad calculada, *ht.rho*.

De gráficas, se agrega un módulo de gráficos 3D y dentro del mismo un submódulo de iso-superficie con expresión *ht.alpha12* para observar los perfiles en donde el material cambia de fase.

6.2. Selección de materiales de cambio de fase

Existen muchos criterios a tomar en cuenta al elegir un PCM para cualquier aplicación. Dincer y Rosen (2010) y Sharma *et al.* (2009) sugieren tomar los siguientes en consideración:

- Criterios termodinámicos
 - Punto de fusión a la temperatura de operación.
 - Alta entalpía de fusión por unidad de masa.
 - Alta densidad, para requerir menor volumen.
 - Alto calor específico, para aprovechar el almacenamiento sensible.
 - Alta conductividad térmica para no requerir gradientes grandes de temperatura.
 - Fusión congruente y completa.
 - Cambio de volumen pequeño.
- Criterios cinéticos
 - Que no presente sobrefusión o considerar agentes nucleantes para evitarlo.
- Criterios químicos
 - Estabilidad química.
 - Que no se descomponga, para asegurar una larga vida útil.
 - No corrosiva hacía los materiales en contacto.
 - No tóxico, no inflamable y no explosivo.
- Criterios técnicos
 - Simplicidad.

- Aplicabilidad.
- Efectividad.
- Compacidad.
- Compatibilidad.
- Viabilidad.
- Fiabilidad.
- Criterios económicos
 - Disponibilidad.
 - Bajo costo.

El presente trabajo se delimita en un análisis de los criterios termodinámicos, en especial la temperatura de fusión, y técnicos, con énfasis en la efectividad y viabilidad; para la discriminación inicial y posterior determinación del método de selección.

Dentro de los criterios termodinámicos, no se toma en cuenta la fusión congruente debido a que las físicas de COMSOL no poseen un módulo para incorporar este fenómeno. De forma similar, se ignora el cambio de volumen en la transición de fase debido que en algunas configuraciones requeriría de un estudio termo-mecánico para analizar los esfuerzos que puede causar.

A continuación se denota la selección inicial de los materiales de cambio de fase a emplear y sus propiedades. El método de selección de PCM para la aplicación de trabajo se describe al final del siguiente capítulo.

6.2.1. Características de las zonas adecuadas para colocación del PCM

Un punto importante para el material a emplear como PCM es la ubicación del mismo dentro del sistema de control térmico, debido a los distintos gradientes de tem-

peratura dentro del equipo electrónico con respecto a la distancia de la fuente de calor y su sensibilidad a los picos de potencia generados en el “modo turbo” del procesador.

Como se explica anteriormente, el calor de los picos de potencia se ve disipado y absorbido a través del sistema entre los diferentes componentes. Por esta razón se requiere colocar la unidad de control térmico a base de PCMs cerca de la fuente de calor, entiéndase el CPU. La Figura 6.2.1 muestra que la temperatura en zonas alejadas, como lo es la temperatura sobre el disipador del GPU, punto T_{HP_GPU} no se ve afectada significativamente por el pico de 1.5 veces la potencia del CPU.

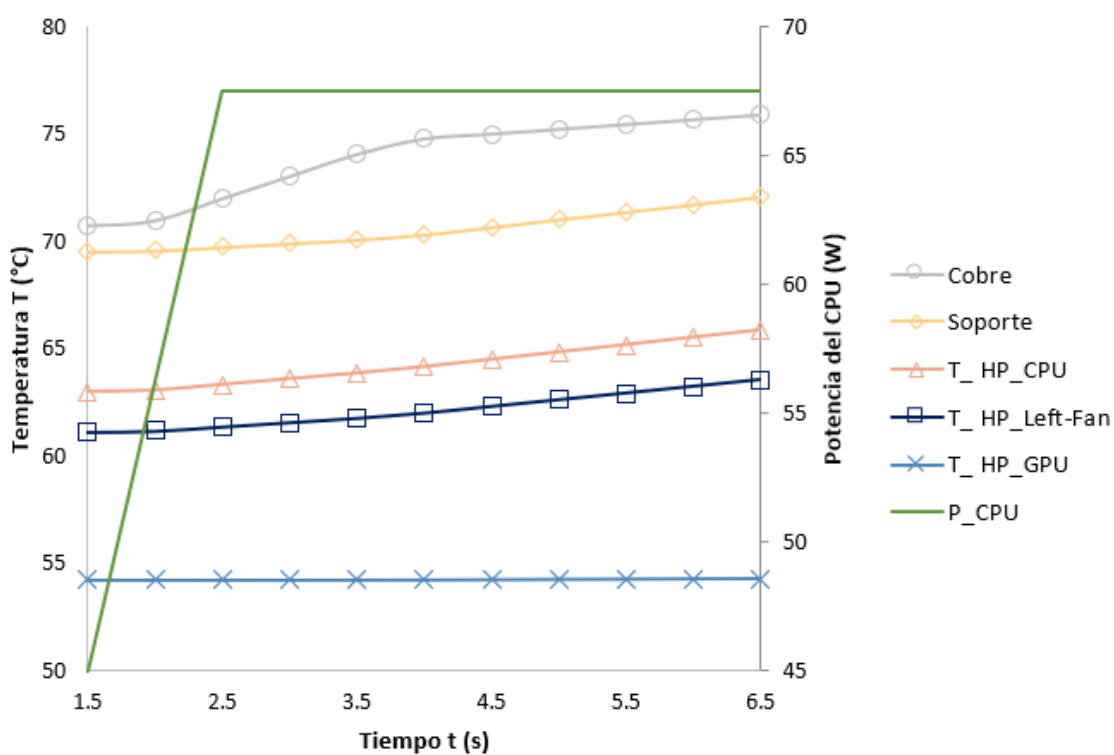


Figura 6.2.1. Curvas de temperatura para varios puntos del sistema en estado dinámico sin PCM (Elaboración propia, 2019).

La Figura 6.2.1 señala, como es esperado, que los mayores aumentos de temperatura se dan en las zonas más cercanas a la fuente, como es el caso con el disipador de cobre, *Cobre*, y en el soporte bajo la TCU, *Soporte*. La siguiente ubicación con un cambio

apreciable corresponde a la región de los tubos de calor sobre el procesador central, punto T_{HP_CPU} , cuyos alrededores deben presentar una mayor variación debido a que no poseen una conductividad tan alta como la de los tubos de calor.

Para la ubicación del PCM se seleccionan estas tres ubicaciones: alrededor del procesador, sobre y bajo la unidad de control térmica. Sus dimensiones ya fueron explicadas en el Capítulo 4. Se decide no colocar el bloque de material de cambio de fase junto a los tubos de calor entre la fuente y el disipador, punto $T_{HP_Left-Fan}$ debido a que puede afectar el funcionamiento de los tubos de calor de formas que el modelo no sería capaz de simular.

Una vez se decide la ubicación de los bloques de PCM se procede a identificar la temperatura de estas zonas para diferentes potencias del CPU. Considerando que durante varios ciclos de aumento de potencia, a PL2, la temperatura del sistema debe ir incrementando hasta llegar a la temperatura en estado estacionario para las tres potencias PL2. El Cuadro 6.2.1 muestra las temperaturas para diferentes puntos y caras del sistema a diferentes potencias: TDP, 1.25 y 1.5 veces esta potencia.

Cuadro 6.2.1. Temperatura de varias zonas y puntos del sistema en el estado estacionario para tres potencias diferentes.

Potencia CPU	100 %	125 %	150 %
Max CPU	80.3	89.4	98.5
Lados CPU	72.7	79.9	87.0
Cobre	70.7	77.3	83.9
Substrato	69.0	75.2	81.3
Soportes 1	76.7	84.8	92.9
Soportes 2	72.7	79.8	86.9
Soportes 3	69.5	75.8	82.1
Arriba 1	70.8	77.5	84.2
Arriba 2	63.0	67.8	72.6

La temperatura máxima de la unidad central de procesamiento permite identificar que, a la potencia de 1.25 veces TDP, este no se encuentra tan cerca de la temperatura límite de seguridad del sistema (100 °C) pero si mantiene una temperatura alta la cual

no se recomienda emplear por tiempos prolongados (Intel de Costa Rica, 2019).

Las zonas elegidas para estudio se identifican a continuación:

- Lados CPU: caras laterales del procesador central.
- Cobre: dominio del propagador de calor de cobre.
- Substrato: dominio del substrato del CPU.
- Soporte 1: dominio del soporte del CPU.
- Soporte 2: promedio de varios puntos del soporte del CPU cerca del centro.
- Soporte 3: promedio de varios puntos correspondientes a la posición *Soporte 2* alejados 1.1 mm en la dimensión z.
- Arriba 1: promedio de puntos sobre el dissipador de calor en el canal de los tubos de calor.
- Arriba 2: promedio de puntos correspondientes a *Arriba 1* sobre los tubos de calor en el CPU.

Como se puede identificar en el Cuadro **6.2.1**, y con respecto al uso a darse a los PCM, explicado con anterioridad, se decide por materiales que funden entre 72 °C y 84 °C para garantizar que el material no se encuentre fundido, significativamente, antes de comenzar con los ciclos de “modo turbo”.

6.2.2. Materiales de cambio de fase seleccionados

El modelado del cambio de fase de un material en COMSOL se rige por un cambio en las ecuaciones de la capacidad calorífica a presión constante para introducir la energía latente del cambio de fase en un intervalo de temperatura especificado de acuerdo a una temperatura media de fusión. Por este motivo se requieren los valores de las siguientes propiedades para la simulación de la fusión de un PCM:

- Temperatura media de fusión.
- Rango de temperaturas de fusión.
- Entalpía de fusión.
- Densidad del material en estado líquido.
- Densidad del material en estado sólido.
- Capacidad calorífica a presión constante del líquido.
- Capacidad calorífica a presión constante del sólido.
- Conductividad térmica del material en estado líquido.
- Conductividad térmica del material en estado sólido.

La selección inicial de materiales de cambio de fase que cumplen con una temperatura dentro del rango especificado según diferentes fuentes cuenta con veintiocho PCMs de todos las categorías. Sobre esta lista se comienza a discriminar según la disponibilidad de información sobre los valores de las propiedades requeridas para la simulación. Este paso dificulta la selección de materiales ya que la literatura se enfoca en la investigación de materiales de cambio de fase en temperaturas “bajas”, entre 50 °C y 100 °C Wang *et al.* (2019).

Este motivo dificulta la búsqueda de materiales que fundan dentro del rango especificado, cuyas propiedades requeridas se encuentren disponibles de fuentes confiables y, además, cumplan con los requisitos de un material de acuerdo a Dincer y Rosen (2010) y Sharma *et al.* (2009).

Como continuación de la selección de materiales, nos enfocamos en materiales de diferentes categorías los cuales cuenten con toda la información necesaria en la literatura. Debido a esto no se toman en cuenta ciertas propiedades o características como la toxicidad, flamabilidad y demás. Se espera que este y otros proyectos en esta línea fomenten la investigación en las propiedades de materiales de cambio de fase con

temperaturas de fusión medias entre 70 °C y 100 °C. En muchas áreas se debe primero demostrar la utilidad de un sistema o de una familia de materiales en una aplicación en específico para ayudar a guiar la investigación hacía esas nuevas ramas de estudio y oportunidades.

En el capítulo posterior se proporciona un método más refinado para la selección de materiales de cambio de fase con base en la características específicas de la aplicación.

Para la simulación dinámica del sistema en sus diferentes configuraciones de material de cambio de fase en la unidad de control térmico se eligen los materiales del Cuadro **6.2.2**, los cuales cuentan con la información suficiente en la literatura y se consideran adecuados para la aplicación, con base en la temperatura de fusión.

La sal hidratada de bario, *BHO*, posee los valores más altos para las propiedades de interés, pero es corrosiva y tóxica. Además presenta sobrefusión y separación de fases en algunos estudios. Wang *et al.* (2019) describe el uso de aditivos para reducir estos fenómenos, afectando también sus propiedades.

El naftaleno, como es común con los PCMs orgánicos, cuenta con bajos valor en las propiedades térmicas de interés, pero es estable a las temperaturas de trabajo. Aunque, al igual que la sal hidratada, posee importantes consideraciones de flamabilidad y toxicidad (Sigma-Aldrich, 2019b).

El eutéctico de urea con bromuro de amonio posee valores intermedios pero como compuesto orgánico nitrogenado es propenso a formar gases tóxico o inflamables al descomponerse (Sigma-Aldrich, 2019a,c).

Ninguno de los materiales finales cumple con todos los criterios adecuados para su empleo en este tipo de sistemas, pero, representan con claridad las propiedades térmicas típicas de cada una de sus categorías. Por esta razón, junto con la escasa información disponible en materiales de cambio de fase en temperaturas intermedias se procede con estos tres materiales a la etapa de simulación siguiente.

Cuadro 6.2.2. Propiedades de los materiales de cambio de fase elegidos.

	Eutéctico Urea	BHO	Naftaleno
Formula	NH ₂ CONH ₂ + NH ₄ Br (66.6+33.4)	Ba(OH) ₂ + 8H ₂ O	C ₁₀ H ₈
Temperatura de fusión (°C)	76*	78 [†]	80 [†]
Entalpía de fusión (kJ/kg)	161 [†]	331.7 [†]	147.7 [†]
Densidad del sólido (kg/m ³)	1548 [†]	2180 [†]	1145 [†]
Densidad del líquido (kg/m ³)	1140 [†]	2070 [†]	976 [†]
Conductividad térmica del sólido (W/(m K))	0.66 [†]	1.255 [†]	0.325 [†]
Conductividad térmica del líquido (W/(m K))	0.325 [†]	0.66 [†]	0.132 [†]
Calor específico del sólido (kJ/(kg K))	1.45 [§]	1.817 [‡]	1.47 [†]
Calor específico del líquido (kJ/(kg K))	2.05 [§]	2.8 [‡]	1.53 [†]
Rango de fusión (K)	15 [§]	12 [‡]	10 [§]
Temperatura media de fusión (°C)	78.5 [§]	84 [‡]	83 [§]

*Obtenido de Sharma *et al.* (2009).

[†]Obtenido de Zalba *et al.* (2003).

[‡]Obtenido de Wang *et al.* (2019).

[§]Obtenido de Lane (1980).

6.3. Simulación del sistema con varios picos de potencia

6.3.1. Algoritmo de resolución

Las primeras simulaciones en estado dinámico arrojaron resultados variantes en los cuales se mostraban alzas en la temperatura del sistema que comenzaban segundos antes de los picos de potencia, algo no aceptable de simulaciones que parten de un estado estacionario. Este problema, junto con algunas otras inconsistencias, indicaban un problema en la configuración. Tras inspeccionar el modelo no se encontraron errores en su configuración y la evidencia apuntaba al método de resolución de la simulación en estado dinámico.

COMSOL cuenta con tres distintos algoritmos de resolución, para estudios dependientes del tiempo: *DMF*, *Dormand-Prince 5* y *Generalized- α* . En la Figura 6.3.2 se muestra la respuesta en la temperatura del CPU para los primeros segundos de una simulación empleando un PCM de prueba y diferentes variaciones en los algoritmos de resolución.

El solucionador por defecto, DMF (*Backwards Differentiation Formula*), es un método muy estable que emplea formulas de diferenciación implícita. Presenta en la gráfica un alza en la temperatura del sistema anterior a darse el pico de potencia. Este incremento, de carácter predictivo, se debe a la naturaleza del método DMF el cual suele presentar efectos de amortiguamiento para altas frecuencias o gradientes pronunciados (COMSOL, 2015a). El método de resolución se considera inadecuado por este motivo. En la Figura 6.3.2 el amortiguamiento no tiende a desaparecer con el aumento del tamaño de paso temporal.

Al seleccionar el algoritmo *Dormand-Prince 5* para la simulación se obtiene un error al iniciar el estudio dependiente del tiempo. Esto se debe a que es un método explícito derivado del Runge-Kutta, el cual es más adecuado para sistemas de ecuaciones

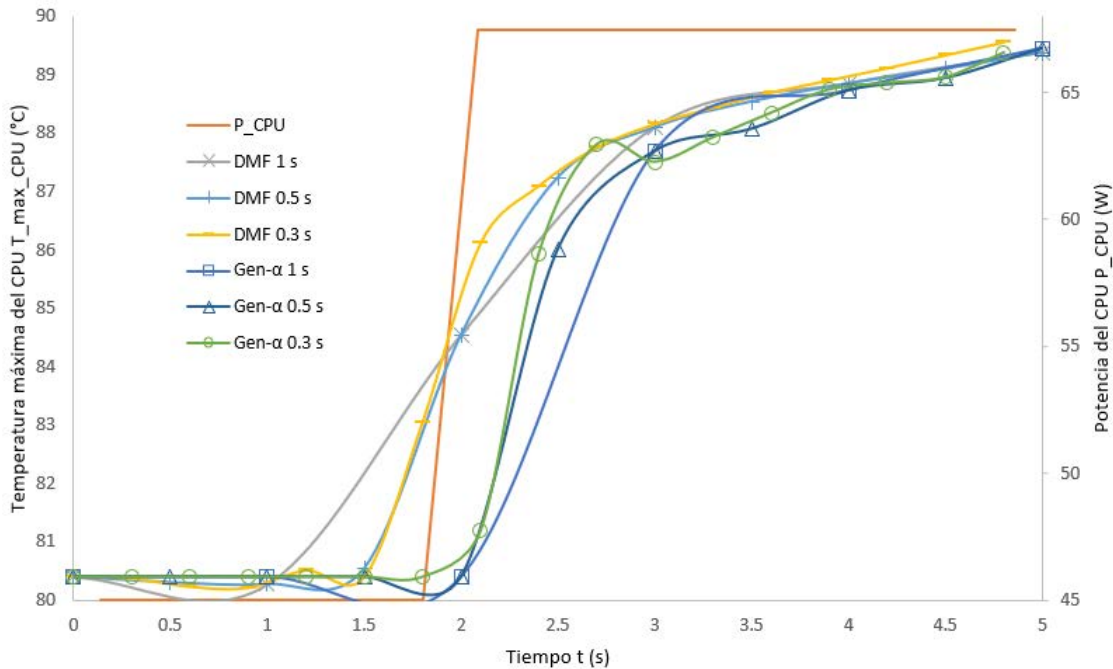


Figura 6.3.2. Curva de prueba de dos distintos algoritmos de resolución con varios diferencias de tiempo para el estado dinámico (Elaboración propia, 2019).

diferenciales ordinarias (COMSOL, 2015a).

El algoritmo seleccionado para el resto de simulaciones en estado dinámico fue *Generalized- α* , ya que, como menciona el manual de referencia de COMSOL 5.1, este es similar al método *BDF* pero posee un parámetro “alpha” que reduce el amortiguamiento de frecuencias altas (COMSOL, 2015a). Por esta razón es más exacto, pero, a la vez, más inestable. En la Figura 6.3.2 se muestra como el alza en temperatura del procesador no se da hasta después del pico de potencia y su precisión tiende a una convergencia entre un tamaño de paso y otro.

6.3.2. Simulación en estado dinámico con tres PCMs

Una vez elegido el algoritmo de resolución adecuado se procede a simular las diferentes configuraciones de unidad de control térmico con materiales de cambio de fase

con distintos volúmenes.

Se generan picos sostenidos de 1.25 veces la potencia nominal por intervalos de 5 s seguidos de 5 s de reposo antes del siguiente pico. La zona de transición de la curva de potencia se establece en 0.5 s. Los resultados obtenidos no varían en gran medida entre los distintos materiales y cada configuración, la Figura 6.3.3 muestra las curvas para los tres materiales en la configuración de mayor volumen alrededor del procesador. La sutil diferencia entre las curvas está asociada al valor de sus propiedades, principalmente la conductividad térmica.

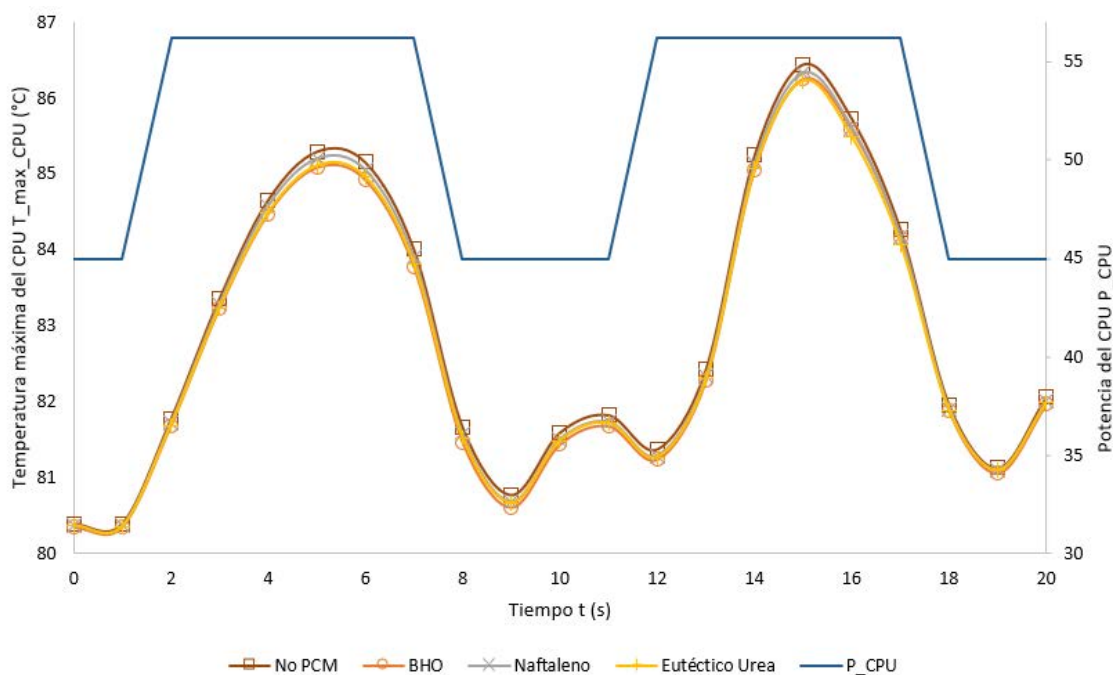


Figura 6.3.3. Curva de calentamiento del CPU con PCM alrededor del CPU para los tres PCMs (Elaboración propia, 2019).

Los Cuadros A.1.8, A.1.9 y A.1.10 muestran los resultados obtenidos para cada material en cada una de las configuraciones de estudio. No se presentan gráficas para cada material debido a la similitud entre ellas.

Realizando una análisis de los resultados se identifica la causa de la similitud entre

todas las curvas: la baja tasa de cambio de fase en el material, con un máximo de 2.26 % del volumen en etapa de transición para la corrida con eutéctico de urea bajo el TCU con mayor volumen. Estos resultados no permiten obtener conclusiones concretas del efecto del proceso latente de cambio de fase, pero, son esperables de los primeros ciclos de calentamiento del sistema. Como se ha detallado, el análisis de este capítulo se enfoca en el uso del PCM durante varios ciclos.

Para todos los materiales en la configuración alrededor del CPU se obtienen temperaturas menores a las del sistema sin PCM, diferencia presente desde $t = 0$. Esto se debe a que el colocar material en esta ubicación se habilita el paso de calor desde las caras laterales del procesador hacia los propagadores de calor. El efecto se acentúa para los materiales con mayor conductividad térmica. Sahoo *et al.* (2016) expone que la reducción en la temperatura basal del sistema es propio de algunos sistemas con PCM. Las unidades de control térmico con bloques de PCM sobre y bajo la misma no presentan una mejoría significativa para los primeros dos ciclos, más bien, generan un aumento en la temperatura del CPU con respecto al sistema sin PCM.

En la Figura **6.3.3** se puede observar una pequeña elevación de la temperatura entre los picos. Se espera cierta respuesta “atrasada” del modelo como reacción al cambio de la potencia mientras se alcanza el equilibrio, como sucede en la Figura **6.3.2** para la curva del solucionador *Generalized- α* y paso de 0.3s justo luego del alza de potencia inicial. Este efecto se hace más visible debido a la utilización de un tamaño de paso temporal de 1 s en las simulaciones de esta sección.

6.3.3. Soluciones y cambios de configuración derivados de los modelos con varios ciclos de potencia

Como se menciona con anterioridad, el estudio del trabajo presentó un cambio de paradigma posterior al análisis de las simulaciones con varios ciclos de potencia. Por este motivo, los resultados mostrados en esta sección no se consideran concluyentes, pero sí sumamente útiles para identificar y solucionar errores para las posteriores simulaciones. A continuación se mencionan diferentes problemas encontrados, en qué simulaciones se generaron y cómo se resolvieron.

Antes de las corridas mostradas para dos ciclos de potencia en 20 s de simulación, la gran mayoría de simulaciones encontraban un error al intentar computar la solución para el estado dinámico para varios de los PCMs y sus configuraciones, aún cuando servía una vez, al repetirse podía arrojar el error.

Luego de varias pruebas se identifica que el problema se genera con la distribución de la energía dentro del PCM al fundirse y se soluciona en algunos casos al aumentar significativamente, cerca de 10 veces, la conductividad térmica del material. Pero la conductividad térmica del material no es algo que se pueda variar con libertad sin considerar potenciadores de conductividad térmica. Con esto en mente se analizan las propiedades de los materiales en uso y se identifica que, por dificultad de búsqueda, en esa etapa del proyecto aún no se tenían los datos de rango de fusión de los materiales de cambio de fase (se empleaba la temperatura de fusión registrada en la literatura y un rango de 3 K). Tras una complicada búsqueda se encuentran fuentes con los datos de temperatura media y rango de fusión, o al menos, gráficas de las cuales se podían aproximar dichos valores. Empleando estos nuevos valores, los cuales, como se observa en el Cuadro **6.2.2** son mayores a los utilizados inicialmente, se soluciona el problema y se procede con las simulaciones.

Al estudiarse el error mencionado, se identifica un factor que puede llegar a generar errores o ser parte del problema: la pendiente de la función del pico de potencia es muy

alta, ejecutando un cambio de 25 W en 0.1 s, en un estudio con pasos de tiempo de 1 s. Un gradiente de esta forma puede causar inestabilidad en la solución del estudio dependiente del tiempo. Para prevenirlo se aumenta el factor de “suavecimiento” de la curva, se crea y modifica el parámetro Smo , a un valor de 0.5. Para las corridas con naftaleno en la configuración sobre el TCU se dan incongruencias en los resultados obteniendo temperaturas en el CPU mucho mayores a las de las demás corridas en puntos específicos. Analizando dicha simulación se identifica el problema, se da una sobre-acumulación de calor en un pequeño cúmulo de elementos en el PCM, lo que causa que la temperatura aumente significativamente y así, igual, la de los elementos del CPU cercanos. Ese error se presenta con mayor frecuencia al aumentar la densidad de los ciclos de potencia en un rango de tiempo, cambiando sus tiempos de duración y enfriamiento. Tras una serie de pruebas se denota que el problema no es dependiente del mallado ni de las propiedades del material de cambio de fase. Se procede a disminuir el paso de tiempo para descartar problemas en el solucionador, al aplicar este cambio los cúmulos de calor desaparecen, pero, los resultados aumentan considerablemente de peso alcanzando valores de hasta 2 GB; esto ralentiza significativamente el proceso de simulación y análisis de resultados.

Reducir el peso de los resultados mientras se emplean pequeños pasos de tiempo se consigue modificando la opción de *Paso máximo* de la configuración del solucionador del estudio dependiente del tiempo. Modificando esta opción se asegura el empleo de pasos intermedios de menor tamaño al indicado pero guardando en solución solo los resultados de los pasos indicados en el estudio.

6.4. Recapitulación

Con el fin de resumir, se puede condensar lo expuesto en este capítulo en los siguientes puntos:

- Se modifica la configuración del modelo en estado estacionario para incluir los picos de potencia, el fenómeno de cambio de fase y el estudio dependiente del tiempo a partir del resultado estacionario.
- Estudiando el comportamiento térmico del sistema se realiza una selección preliminar de materiales según su punto de fusión.
- Las limitadas fuentes confiables para obtener los datos requeridos para cada material de cambio de fase guían la discriminación hasta la selección de tres materiales.
- Un problema en las curvas de los resultados conlleva a determinar el método de resolución adecuado para la simulación dependiente del tiempo.
- El análisis preliminar planteado para el estudio, con varios ciclos de potencia y enfriamiento, arroja resultados inconclusos.
- Se emplea este estudio para resolver errores en la configuración antes de pasar a un estudio enfocado en un solo pico de potencia.

Con la configuración en estado dinámico, los resultados preliminares de las diferentes ubicaciones de los PCM y la resolución de errores se procede con un cambio en el paradigma de estudio.

Capítulo 7

Cambio de paradigma

Al considerar los ciclos de potencia como picos no periódicos de cierta duración, se debe desechar la idea de un estudio del comportamiento del sistema bajo varios ciclos de calentamiento-enfriamiento consecutivos y del efecto de introducir un material de cambio de fase que, pasivamente, absorba el calor durante estos ciclos. Una nueva metodología de estudio debe proponerse.

En el estudio que se presenta en este capítulo, se parte del modelo en estado dinámico con todas las correcciones expuestas con antelación y modificado para el enfoque en una sola etapa de calentamiento prolongada.

Según indica el equipo de Intel de Costa Rica (2019), el tiempo de duración de un ciclo de potencia en el modo turbo es determinado por tres factores:

- La temperatura límite del sistema, para fines prácticos es de 100°C.
- La temperatura de alarma empleada por el sistema de control para terminar el ciclo de potencia antes de que el sistema alcance una temperatura cercana al límite.
- El intervalo de tiempo programado en el sistema entre la detección de la temperatura de alarma y la reducción total del pico de potencia.

La temperatura de alarma y el tiempo de respuesta son valores de propiedad intelectual del fabricante por lo que no se tiene acceso a los mismos. Para efectos del trabajo se propone determinar el efecto de cada corrida, configuración y variación del sistema sobre el tiempo que toma al CPU en los sistemas con material de cambio de fase en llegar a un valor de temperatura dado con respecto al sistema sin PCM. A este valor de comparación se le llamará “temperatura de alarma” y se elige considerando todas las curvas de resultados, con el objetivo en mente de escoger un valor que sea comparable para todas las corridas, el cual no se encuentre muy alejado del inicio del ciclo de potencia y brinde información útil sobre el efecto de interés.

Inicialmente, en la prueba con un solo ciclo de calentamiento, se corrieron simulaciones para todas las configuraciones de PCM descritas en el Capítulo 4 empleando los tres materiales de cambio de fase elegidos en el capítulo anterior y una corrida sin PCM. Pero por razones discutidas con anterioridad, los materiales no se funden significativamente en el primer ciclo, se concluye que los materiales elegidos no son aptos. Por esta razón, el nuevo estudio requiere crear un método para la elección de un material adecuado para el sistema de estudio. Este método parte del estudio de la temperatura de las zonas en contacto con el PCM, según la ubicación y el volumen, la determinación de la temperatura óptima de fusión y el efecto de las propiedades físicas de interés del material.

El objetivo del nuevo estudio es determinar la mejor configuración de material de cambio de fase que permita extender el tiempo de calentamiento en el modo turbo. El mismo incluye un análisis de las propiedades deseadas en un PCM para esta aplicación, así como del efecto en la variación de estas propiedades.

7.1. Cambios en la configuración

Para generar un solo pico sostenido sin afectar demasiado el modelo ya construido, basta con modificar el valor del parámetro τ por un valor bastante grande, se emplea 20 s, que evite que se de la periodicidad durante el intervalo de tiempo de la simulación y se elimina el límite inferior de la periodicidad en la función analítica $an1$ ya que no se requiere y, a la vez, permite iniciar en $t = 0$. Se modifica también el valor de enfriamiento, ya que este se empleaba para el intervalo inicial de estabilidad, es decir, $t_{cool} = 1$.

En la sección de *Estudio*, módulo de *Configuraciones del solucionador*, solución actual, en el submódulo del solucionador dependiente del tiempo se coloca un tamaño máximo de paso de 0.2 s o 0.1 s, según corresponda. Esta elección surge de los problemas identificados en el capítulo anterior.

7.2. Temperatura de fusión y ubicación óptima para el PCM en el sistema de estudio

La selección de materiales del capítulo anterior se considera ineficiente y limitada. Si bien la dificultad para encontrar materiales con todos los valores requeridos para las propiedades térmicas en la literatura es considerable, preseleccionar únicamente tres materiales y probarlos en el sistema se puede traducir en subestimar y malgastar la capacidad de un entorno de simulación.

Este método se puede considerar válido en un ambiente experimental de laboratorio físico debido a las consideraciones de costos, accesibilidad y tiempo de experimentación, pero, en un ambiente de simulación en el cual las propiedades de un material pueden variarse con relativa facilidad en busca de una solución óptima para el problema de estudio, es un enfoque sumamente limitado.

Para este nuevo paradigma se propone aprovechar esta ventaja formulando un método de determinación de las propiedades de un material idóneo para el sistema de trabajo. Dicho método puede adaptarse para su aplicación en sistemas similares u homólogos.

7.2.1. Determinación de la temperatura de fusión óptima

Decidido esto, ¿cómo empezar? De manera lógica, se inicia con un estudio de los perfiles de temperatura en el sistema sin PCM, al igual que la vez anterior, pero, tomando como base la respuesta del sistema en los primeros segundos del pico sostenido de potencia. Se estudia a 125 % de la potencia de diseño, al igual que en la mayoría de simulaciones anteriores. Otro cambio fue el emplear una mayor cantidad de áreas y valores promedio superficiales de temperatura de las zonas en futuro contacto con el PCM en sus diferentes ubicaciones.

Estos perfiles se emplean para aproximar una temperatura de fusión adecuada para el material según la zona de colocación. Para optimizar el valor de temperatura media de fusión se realizan corridas a diferentes valores y se comparan. Las propiedades del PCM “idóneo” se determinan mediante un promedio, redondeado, de las propiedades de los materiales seleccionados en el estudio anterior. Sus propiedades se muestran en el Cuadro 7.2.1.

Cuadro 7.2.1. Propiedades del material de cambio de fase de prueba.

Propiedad	Valor empleado
Entalpía de fusión (kJ/kg)	170
Densidad del sólido (kg/m ³)	1500
Densidad del líquido (kg/m ³)	1275
Conductividad térmica del sólido (W/(m K))	0.6
Conductividad térmica del líquido (W/(m K))	0.36
Calor específico del sólido (kJ/(kg K))	1.4
Calor específico del líquido (kJ/(kg K))	2.1
Rango de fusión (K)	10

Aunque en el Cuadro **7.2.1** se colocan valores diferentes para las propiedades en dependencia a la fase de segregación, se optó, al final, por emplear valores constantes para evitar introducir efectos no cuantificables en la respuesta. Es decir, se emplean los valores de las propiedades en estado sólido antes y después del cambio de fase. En la sección de estudio del efecto en la variación de las propiedades se puede observar que los cambios propuestos en la tabla no deben generar mayor efecto en el resultado final.

PCM en los alrededores del CPU

Las zonas en contacto con el bloque de PCM en esta ubicación son: la cara inferior del propagador de cobre (excepto la sección en contacto con el procesador), la cara inferior del propagador de aluminio y la sección de la cara superior del sustrato que no se encuentra en contacto con el CPU. En la Figura **7.2.1** se observa la temperatura superficial promedio de estas caras, además del promedio de las dos caras de los propagadores. Se emplea el modelo con el mayor volumen de material de cambio de fase en los alrededores del CPU debido a que mostró los mejores resultados intermedios en el capítulo anterior.

Se observa como la cara del sustrato en futuro contacto no experimenta un cambio de temperatura tan rápido como las otras caras. Esto debido a su baja conductividad térmica. La Figura **7.2.1** sugiere un valor de temperatura de fusión entre 68°C y 73°C para el PCM en esta ubicación, mas, se debe tomar en consideración que no se conoce si el valor óptimo será para la temperatura inicial de fusión o la media. Además, como se observó en el capítulo anterior, la temperatura del CPU, y por ende sus alrededores, baja un poco al introducir el PCM en esta ubicación.

Por esta razón, se debe probar mediante corridas cual temperatura de fusión media es la óptima entre el rango ya mencionado. La Figura **7.2.2** muestra estos resultados, cabe recalcar que al momento de realizar estas corridas aún no se aplicaba el cambio en la configuración de 0.1s máximo de paso temporal por lo que esta simulación emplea

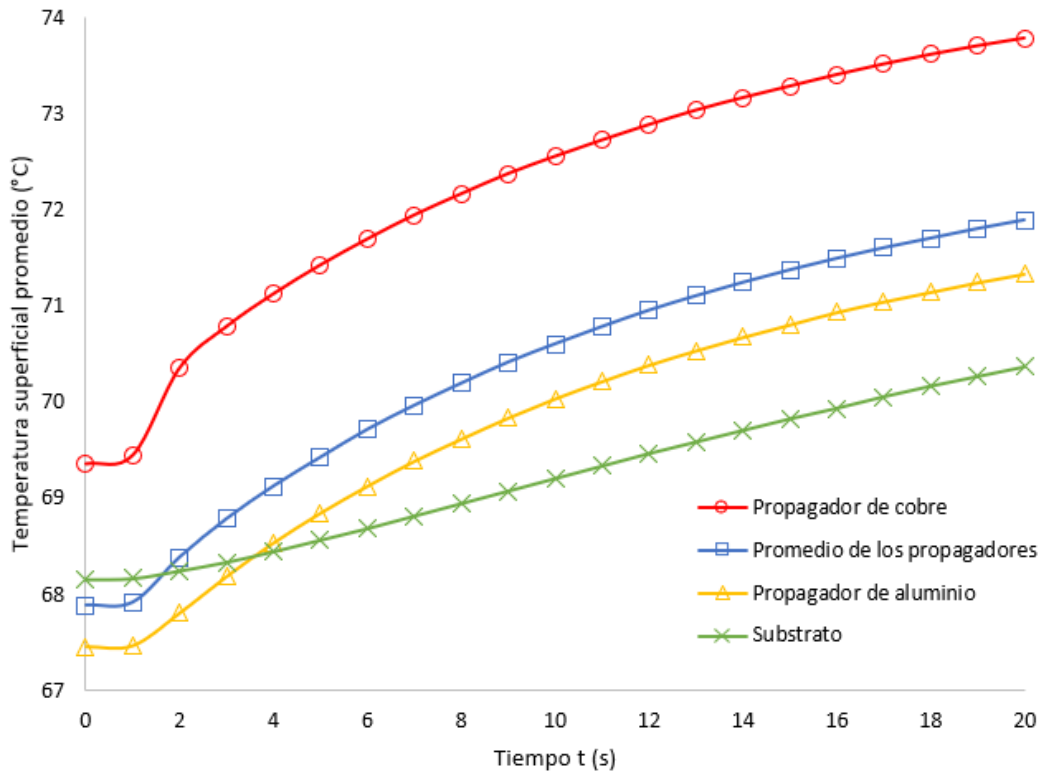


Figura 7.2.1. Perfiles de temperatura para un ciclo de potencia de 125 % sin PCM para las superficies cercanas al CPU (Elaboración propia, 2019).

un máximo de 0.25s, por esta razón no se presenta tan suave como futuras curvas. Además, se empleaban las propiedades con diferentes valores entre fases. Estos son los únicos resultados en los cuales se presentan estos problemas.

La Figura 7.2.2 muestra las curvas para ciertas temperaturas, no se muestran todas con el fin de una visualización más limpia. Se encuentra la temperatura de fusión media óptima como 71 °C. El Cuadro 7.2.2 muestra la ganancia en tiempo para la temperatura de alarma de 85 °C en el CPU para las diferentes corridas en esta ubicación.

Se muestra también, en el Cuadro 7.2.2, la ganancia para la corrida sin PCM y con el material con temperatura de fusión media de 71 °C, con un tamaño de paso máximo de 0.1s, a manera comparativa y para emplear estos datos como referencia. Variando la referencia de esta prueba se obtienen los valores de la derecha: 0s de referencia y 1.63s

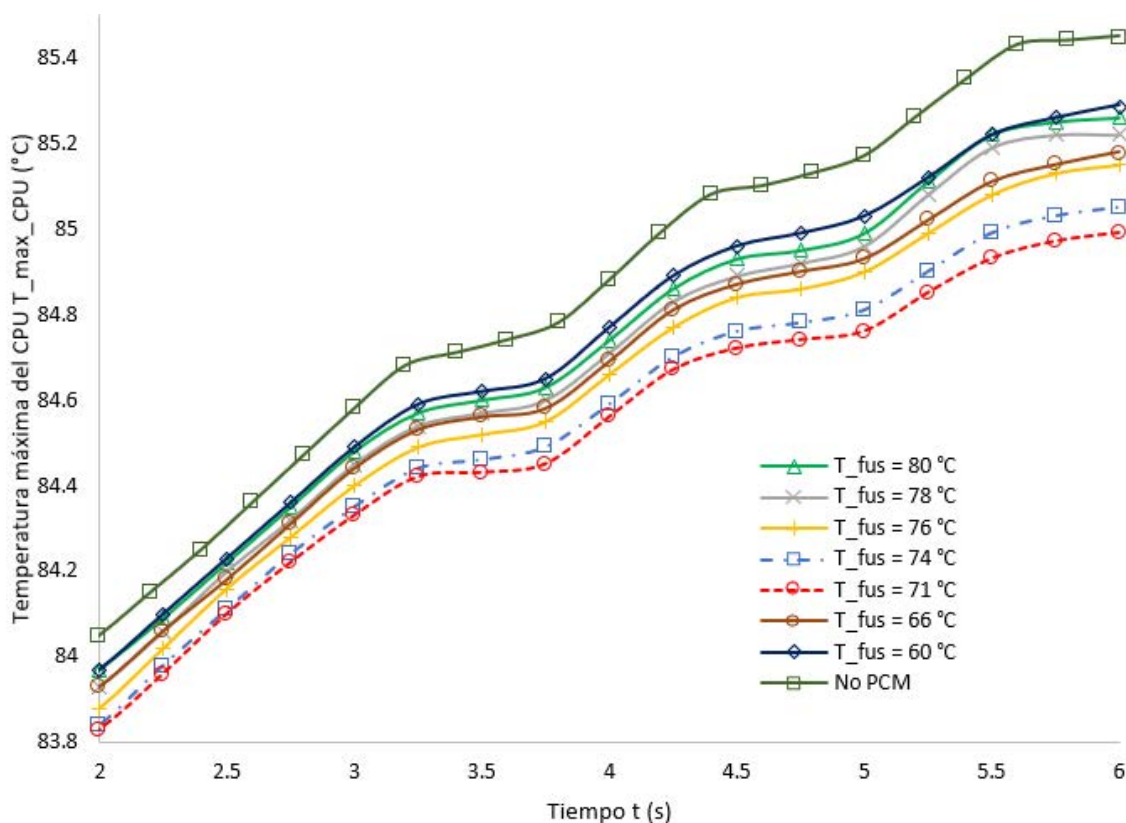


Figura 7.2.2. Perfiles de temperatura del CPU dependientes de la temperatura media de fusión del PCM idóneo en los alrededores del CPU (Elaboración propia, 2019).

para el PCM en los alrededores con temperatura óptima de fusión.

Se emplea la temperatura de 85 °C como alarma ya que es un valor que se alcanza en todas las corridas, para el sistema sin PCM (con un alza de 125 % la potencia nominal) se alcanza cerca de 3.3s luego del inicio del pico y es un valor en el cual las diferencias entre corridas son distinguibles y atribuibles a la variación en los parámetros.

PCM bajo la unidad de control térmica

Es complicado seleccionar la porción de la cara de la placa madre en contacto con el PCM en esta ubicación. Por esta razón, la Figura 7.2.3 muestra el promedio superficial para la cara entre el substrato y la placa madre, así como los lados del soporte del propa-

Cuadro 7.2.2. Ganancia de tiempo con respecto al sistema sin PCM de referencia para diferentes temperaturas de fusión del PCM idóneo en los alrededores del CPU, con una temperatura de alarma de 85 °C.

Corrida	Ganancia (s)
No PCM	Referencia
T_fus = 82 °C	0.78
T_fus = 80 °C	0.80
T_fus = 78 °C	0.86
T_fus = 76 °C	1.06
T_fus = 74 °C	1.34
T_fus = 72 °C	1.78
T_fus = 71 °C	1.78
T_fus = 70 °C	1.78
T_fus = 66 °C	0.97
T_fus = 60 °C	0.59
No PCM, paso máximo = 0.1 s	0.21 / Referencia
T_fus = 71 °C, paso máximo = 0.1 s	1.84 / 1.63

gador de calor del CPU y la cara inferior. Las últimas dos si se encuentran en contacto, al menos parcial, con el bloque de PCM en las simulaciones con esta configuración.

La Figura 7.2.3 muestra como el rango de temperatura es muy parecido al caso anterior, entre 70 °C y 74 °C. Se espera una temperatura media de fusión óptima dentro de este rango. Es debido aclarar, las temperaturas mostradas en estos gráficos son promedios superficiales, esto causa que porciones de las áreas que no se encuentran en contacto directo con el PCM sean incluidas, lo que genera valores menores. Como se puede observar en el caso de la cara entre el substrato y la placa madre. Mas no es una medición errónea, si no que ayuda a distinguir el efecto de focalización y distribución del calor en estos componentes que ofrecen una mayor resistencia térmica.

Antes de las simulaciones para determinar la temperatura de fusión óptima se comparan dos corridas a la misma temperatura de fusión con los diferentes volúmenes para elegir cual utilizar. Se decide emplear el de menor masa debido a que los resultados son muy similares entre ambos con una diferencia en la ganancia a 86 °C de 0.49 s y, en

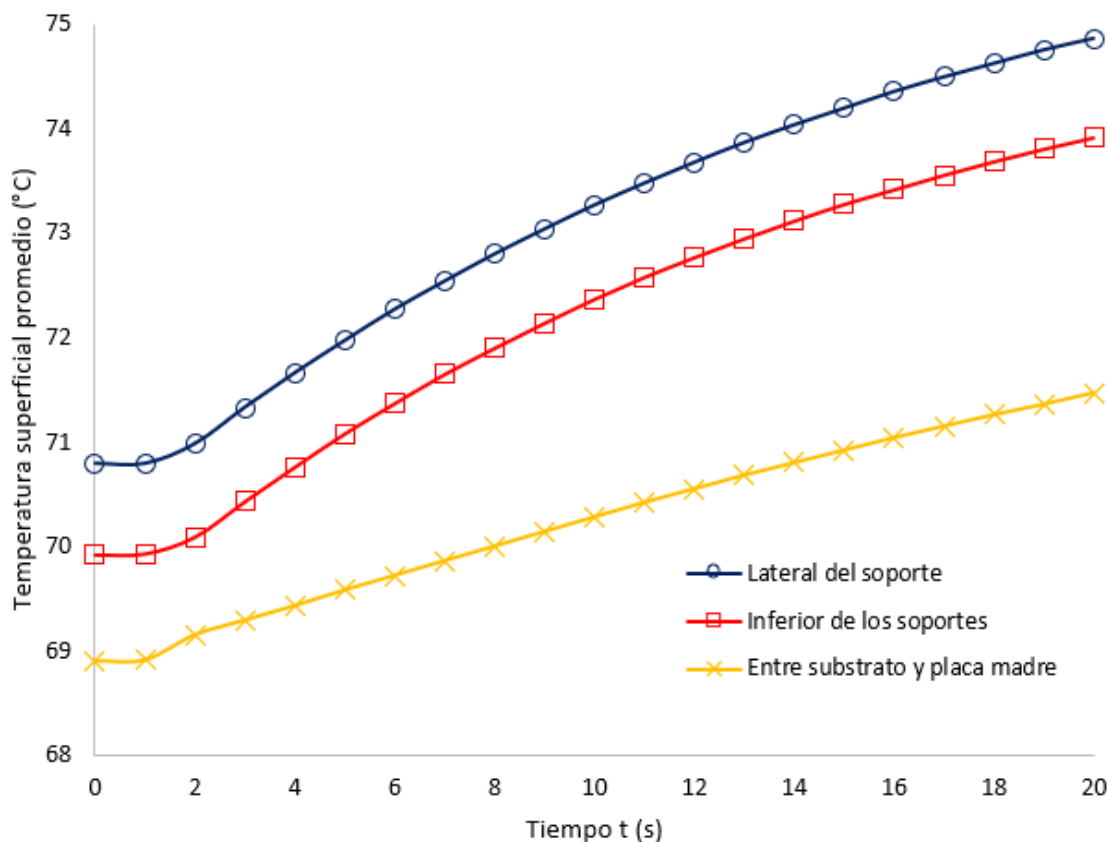


Figura 7.2.3. Perfiles de temperatura para un ciclo de potencia de 125 % sin PCM para las zonas bajo el TCU (Elaboración propia, 2019).

términos prácticos, es más razonable emplear un bloque de menor tamaño.

La elección de una u otra configuración para la determinación de la temperatura de fusión no es relevante debido a la naturaleza del análisis. Además, como se observa en la Figura 7.2.4, al igual que se concluyó en el capítulo anterior, esta posición aumenta la temperatura del CPU. Aunque, en estos resultados con un solo pico de potencia sostenido se observa que al pasar el tiempo el calor absorbido en la fusión comienza a apaciguar esta diferencia entre el sistema con PCM en esta configuración y sin PCM. Desafortunadamente, tiempo de espera es considerable.

La Figura 7.2.4 ayuda a determinar el valor de 73 °C como temperatura media de fusión óptima. Se espera que este valor no dependa significativamente de la masa, aunque

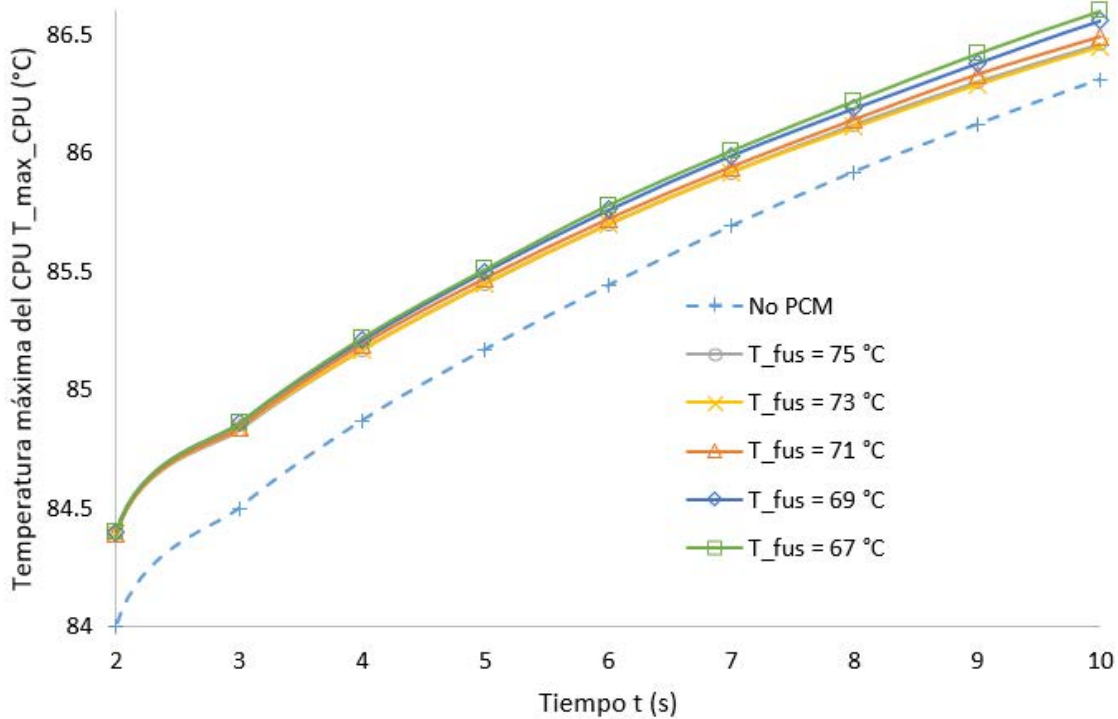


Figura 7.2.4. Perfiles de temperatura del CPU dependientes de la temperatura media de fusión del PCM idóneo bajo la TCU (Elaboración propia, 2019).

puede disminuir al aumentar el volumen debido al gradiente efectivo de temperaturas.

El Cuadro 7.2.3 presenta los valores de ganancia de tiempo para una temperatura de alarma de 86 °C. Para la configuración con PCM bajo la unidad de control térmica, como se espera al observar las curvas de temperatura, se obtienen valores negativos, es decir, el sistema llega más rápido a la temperatura de alarma en comparación con el estado sin PCM. Este comportamiento se le atribuye a la posición del material de cambio de fase con respecto a los flujos de calor. Además, se debe tomar en cuenta la presencia de dos capas resistivas de considerable espesor entre la fuente de calor y el material de cambio de fase: el substrato y la placa madre, con valores de conductividad térmica de 3 W/m/K. Estas capas disminuyen la sensibilidad del PCM a los cambios bruscos de potencia, a la resistencia que presentan al flujo calórico.

Cuadro 7.2.3. Ganancia de tiempo con respecto al sistema sin PCM para tres ubicaciones del PCM y distintas temperaturas de fusión, con una temperatura de alarma de 86 °C.

Corrida	Ganancia (s)
No PCM	Referencia
Alrededor del CPU / T _{fus} = 71 °C	5.15
Bajo el TCU	
T _{fus} = 75 °C	-1.00
T _{fus} = 73 °C	-0.98
T _{fus} = 71 °C	-1.10
T _{fus} = 69 °C	-1.35
T _{fus} = 67 °C	-1.44
Sobre el TCU	
T _{fus} = 73 °C	1.60
T _{fus} = 71 °C	2.73
T _{fus} = 69 °C	3.00
T _{fus} = 67 °C	-0.44
T _{fus} = 65 °C	0.34

Se emplea 86 °C como temperatura de alarma debido a que brinda mejores valores para la corrida con el PCM sobre la unidad de control térmico, y, en el caso del PCM bajo el TCU el efecto que refleja es el mismo en ambas temperaturas, como se observa en la Figura 7.2.3. Además, para estas corridas se extendió el tiempo de análisis lo que permite visualizar las curvas al llegar a estas temperaturas. Lo cual no es posible con los datos de la Figura 7.2.2.

PCM sobre la unidad de control térmica

Al colocar el bloque de PCM sobre el TCU, este entra en contacto con las superficies superiores del propagador de aluminio, parte del propagador de cobre y parte de los tubos de calor. Estas superficies pueden dividirse en dos zonas, aquellas dentro del canal en el propagador para los tubos de calor y fuera de este, en la parte superior.

La Figura 7.2.5 muestra el cambio en la temperatura para estas zonas de interés al introducir un pico de potencia sostenido de 125% en el sistema sin PCM. Como

es lógico, la zona de mayor temperatura es la más cercana a la fuente, y en contacto con ella. Seguida por la zona superior del propagador de calor de aluminio, fuera del canal, esta cara es de especial interés ya que no se encuentra en contacto directo con los tubos de calor por lo que tiende a acumular calor en mayor medida. El PCM en esta zona comienza a fundir antes que en otras zonas de la misma configuración y, al ser una superficie considerable, debe presentar un efecto notable. De manera curiosa, la superficie de los tubos de calor mantiene temperaturas bajas a causa de la rápida extracción de calor a través de los mismos.

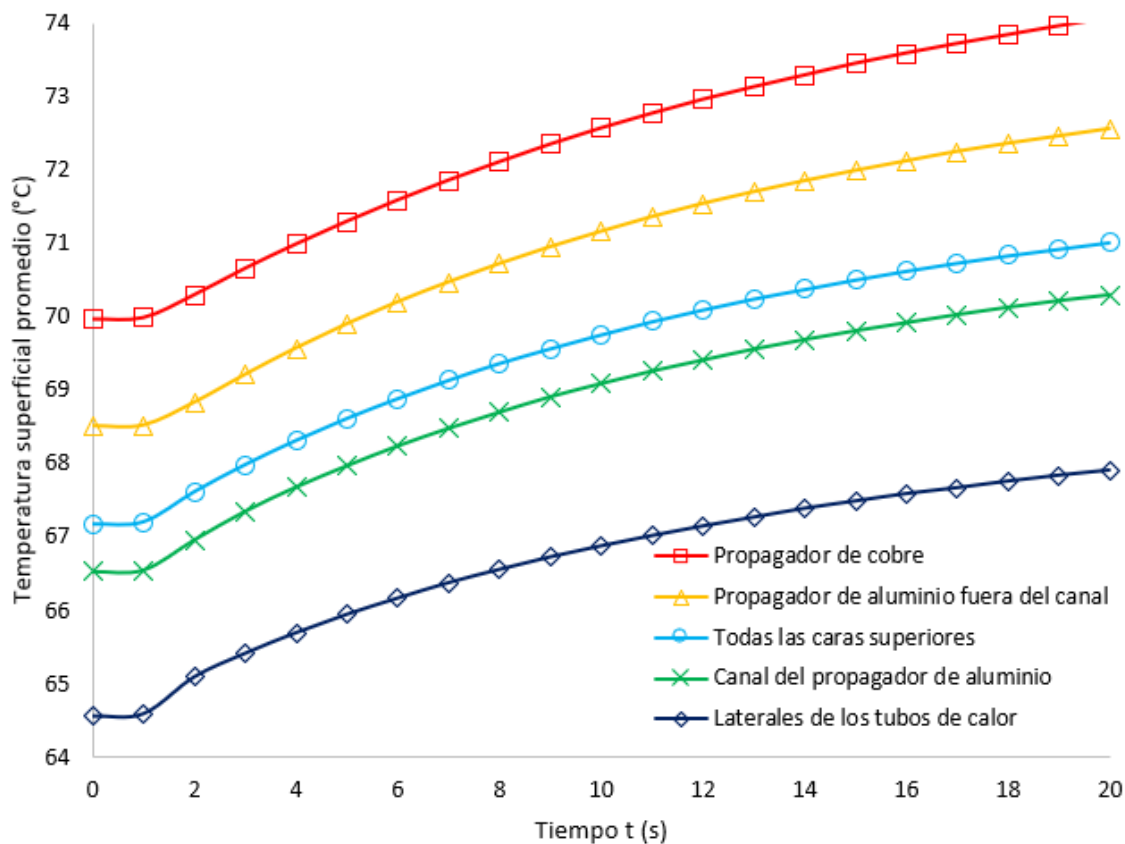


Figura 7.2.5. Perfiles de temperatura para un ciclo de potencia de 125% sin PCM para las zonas sobre el TCU (Elaboración propia, 2019).

De analizar la Figura 7.2.5 se puede esperar una temperatura media de fusión ópti-

ma entre 67 °C y 72 °C. Además, por la diferencia entre la temperatura de las diferentes caras en contacto y la presencia de los tubos de calor se espera un comportamiento diferente a los sistemas anteriores.

Al igual que en el caso anterior, con el PCM bajo el TCU, se decide por la configuración de menor volumen, pero, no por la misma razón. Para estas configuraciones se observa una menor variación en el comportamiento ondulatorio de los resultados cuanto menor sea la masa empleada, lo que permite una mejor determinación y análisis; además de curvas más “limpias”.

La Figura **7.2.6** muestra los resultados para la determinación de la temperatura de fusión óptima. El comportamiento ondulatorio parece indicar un problema en la convergencia el cual se adjudica a la diferencia en las temperaturas superficiales de las caras del TCU en contacto con el PCM, provocando acumulación de calor en ciertos elementos, los cuales entran en fusión, pero, de forma seguida, la energía se ve retirada rápidamente por los tubos de calor. En un sistema real, continuo, estas acumulaciones no ocurren, lo cual apunta a una, posible, solución disminuyendo el tamaño de paso temporal y de los elementos del mallado.

Se observa una disminución en el comportamiento ondulatorio conforme se acerca la temperatura de fusión a la óptima. Al probar con la temperatura de 69 °C con un tamaño de paso menor se obtiene un curva muy parecida, pero, con menor oscilación en los primeros segundos luego del pico de potencia. Estos resultados no permiten concluir con un grado aceptable de confianza sobre la eficiencia de esta configuración. Se esperaría un comportamiento real con una curva dentro del rango de los valores obtenidos, sin embargo, más investigación es requerida.

En el Cuadro **7.2.3** se observa, para la temperatura de alarma, un valor óptimo de temperatura media de fusión de 69 °C, este valor se confirma con las curvas de la Figura **7.2.6**. Los valores negativos, como se observa también en la gráfica, se dan por el comportamiento ondulatorio en las curvas de bajo punto de fusión.

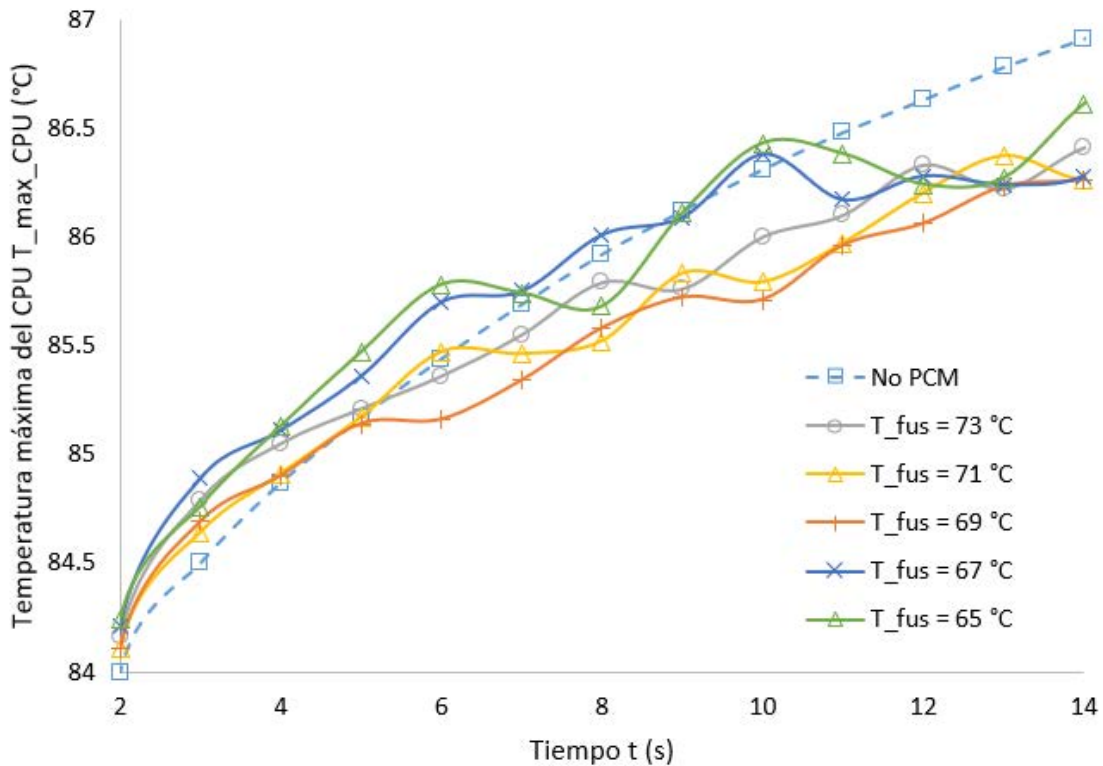


Figura 7.2.6. Perfiles de temperatura del CPU dependientes de la temperatura media de fusión del PCM idóneo sobre el TCU (Elaboración propia, 2019).

La configuración apunta a ser funcional para sistemas con picos de potencia de no tan corta duración. Aumentar la masa se esperaría que arroje mejores resultados, dependiendo de las propiedades, por ejemplo, la conductividad térmica es sumamente importante para asegurar que la energía se distribuya rápidamente a las secciones más alejadas del material de cambio de fase.

Comparación entre las tres configuraciones

Con base en los resultados obtenidos para el bloque de PCM en las tres configuraciones pasadas (ver Cuadro 7.2.3) se puede concluir que el sistema con mejor desempeño es el ubicado en los alrededores del CPU, seguido por el sistema con el bloque de material sobre el TCU y por último el sistema con el PCM bajo la unidad de control térmico.

Al colocar el PCM en los alrededores del CPU se aprovecha la proximidad a la fuente de calor para una rápida respuesta. Además, si el mismo se encuentra en contacto directo con el procesador, amplía el área de transferencia de calor entre la fuente y los propagadores. Esto, como se observa en las curvas y en el capítulo anterior, se traduce en una menor temperatura para el estado estable del sistema.

Como desventajas, este sistema óptimo, presenta dos: la zona donde se coloca es reducida, lo que puede provocar dificultad para su implementación y requerir de un análisis termo-mecánico, ya que una expansión en el volumen del PCM podría ocasionar que se interrumpa el contacto térmico entre el procesador y el propagador de calor de cobre por medio del TIM, causando una acumulación de calor y el posible fallo del componente. La segunda, se basa en un factor no antes mencionado en este estudio, el encapsulado del PCM. Cual sea el material que se emplee en su aplicación, este va a poseer un grosor de pared, una conductividad térmica y un coeficiente de expansión térmico que no se toman en consideración y pueden reducir el desempeño del sistema.

El segundo sistema, PCM sobre el TCU, se considera que acarrea la menor cantidad de posibles problemas de implementación. Debido a su ubicación, no requiere de un estudio termo-mecánico extenso, ya que es libre de expandirse en tres dimensiones en la mayor parte de su volumen. De igual manera, el encapsulado presenta un factor que puede afectar su desempeño pero no imposibilitaría su implementación a causa de factores dimensionales.

Desafortunadamente, los resultados obtenidos en este trabajo no se pueden considerar conclusivos con respecto a esta configuración hasta no determinarse la razón real del comportamiento que presentan las curvas de la Figura 7.2.6. Además, no se recomendaría para ciclos de corta duración debido al incremento en la temperatura del procesador en los primeros segundos del pico de potencia.

La configuración con PCM bajo la unidad de control térmico se presenta como una opción no viable debido a que aumenta la temperatura del procesador para toda

temperatura de fusión del PCM. Un efecto positivo se comienza al acercarse a los 20 s en las curvas de la Figura 7.2.3, pero es poco probable el empleo de ciclos de tan larga duración en modelos convencionales. Este modelo brinda información útil, ya que el aumento que provoca en la temperatura del sistema se debe a su ubicación lejos de la zona de extracción activa de calor, como se discute en capítulos anteriores. Esto refleja la importancia de un estudio de los flujos de calor en el sistema.

Las configuraciones estudiadas presentan ventajas y desventajas ya expuestas, que indican que no es debido su recomendación inmediata para cualquier aplicación, pero, si ayudan a aclarar y tener en mente los desafíos a resolver antes de implementarse en un sistema real.

PCM en los alrededores del CPU con una potencia del 150 %

Como se observa en las figuras anteriores, la temperatura del procesador no se encuentra tan cerca de la temperatura límite de 100 °C. Se debe considerar que se emplea una distribución uniforme de la fuente de calor en el volumen del CPU, los procesadores reales se componen de circuitos eléctricos de diferentes formas, por lo tanto, diferentes resistencias (Intel, 2015). Esto se traduce en una distribución no uniforme de la generación de calor. Para cuestiones de este trabajo se simplifica ya que no se poseen los datos de distribución al ser información confidencial, además, se saldría del enfoque del trabajo.

De igual forma, Intel (2016) indica que la potencia $PL2$ puede variarse. Por esta razón se decide realizar la determinación del punto de fusión óptimo para un sistema con un pico de potencia sostenido de 150 % la potencia TDP. Estas simulaciones permiten observar las variaciones a considerar para ciclos de potencia de diferentes magnitudes en un sistema futuro.

Para esta prueba se emplea la configuración con el PCM alrededor del CPU debido a su buen desempeño en las pruebas anteriores y la poca variación en sus curvas,

lo cual permite una mejor diferenciación de los resultados individuales. Se inicia con una prueba al sistema sin PCM para determinar el rango de fusión inicial de igual manera a lo detallado para las configuraciones al 125%. Las curvas poseen el mismo comportamiento y apuntan a un rango entre 68 °C y 77 °C.

La Figura 7.2.7 muestra que el comportamiento de las curvas de temperatura del CPU con respecto al tiempo para esta configuración es semejante al de las obtenidas con una potencia 0.25 veces mayor a la nominal. Sin embargo, se alcanzan mayores temperaturas en los primeros 10 s, consecuencia esperable por el aumento en la potencia. De esta gráfica se puede determinar el valor óptimo de temperatura media de fusión como 72 °C.

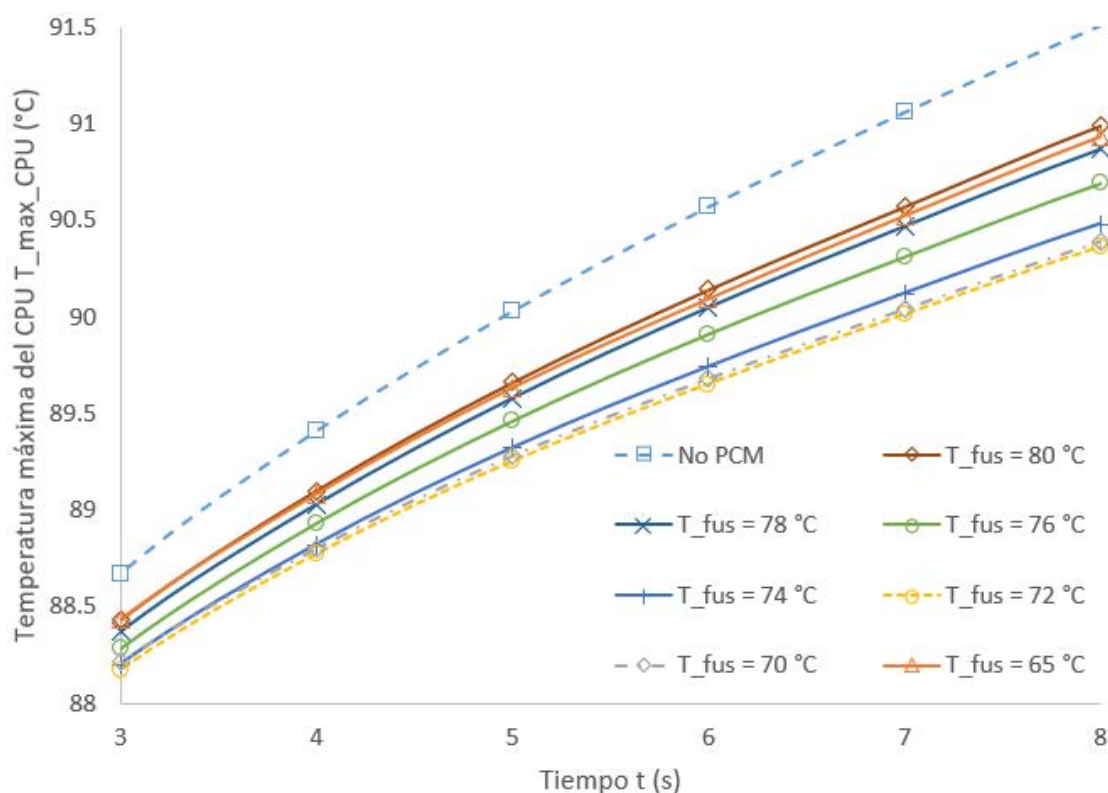


Figura 7.2.7. Perfiles de temperatura del CPU dependientes de la temperatura media de fusión del PCM idóneo en los alrededores del CPU a una potencia de 1.5 veces TDP (Elaboración propia, 2019).

Para estas pruebas no es factible emplear la temperatura de alarma usada con anterioridad, debido a que el alza inicial de temperatura consiguiendo al pico de potencia lleva al sistema hasta más de 88 °C en menos de 2 segundos (el pico de potencia se da en $t = 1$ s). Con finalidad de comparación se emplea una temperatura de alarma de 90 °C. El Cuadro 7.2.4 muestra una ganancia de 2.02 s para una temperatura de alarma de 90 °C.

Cuadro 7.2.4. Ganancia de tiempo con respecto al sistema sin PCM para diferentes temperaturas de fusión del PCM idóneo en los alrededores del CPU a una potencia del 150 % y una temperatura de alarma de 90 °C.

Corrida	Ganancia (s)
No PCM	Referencia
T_fus = 82 °C	0.65
T_fus = 80 °C	0.76
T_fus = 78 °C	0.94
T_fus = 76 °C	1.27
T_fus = 74 °C	1.73
T_fus = 72 °C	2.02
T_fus = 70 °C	1.94
T_fus = 65 °C	0.85

A manera de comparación, el sistema sin PCM con potencia del 125 % alcanza la temperatura de alarma establecida en cerca de 4 s, con una ganancia de 1.63 s, para este sistema en ese tiempo el procesador llega a una temperatura cercana a los 89.5 °C, si se emplea ese valor como alarma se obtiene una ganancia de 1.48 s para el sistema a 150 %. Todos los datos antes descritos, junto con la cercanía en los valores óptimos de temperatura de fusión, apuntan a que, no solo este parámetro es más sensible a la temperatura inicial de los alrededores que al valor del pico de potencia; sino, que además, un mismo material sería utilizable para un amplio rango de potencias de modo turbo.

7.3. Efecto de la variación en las propiedades del PCM

La temperatura de fusión del material de cambio de fase no es la única propiedad de interés para la selección de un material en una aplicación de aprovechamiento de energía latente. Como se concluye de la sección anterior, existe un rango de temperaturas de fusión adecuado para una aplicación específica, pero, muchos materiales deben existir con una temperatura de fusión dentro del intervalo requerido o pueden fabricarse para cumplir este rango. Además, la discriminación entre materiales debe tomar en cuenta varios factores, entre ellos se encuentran las propiedades térmicas del PCM. En esta sección se muestran las pruebas realizadas para los diferentes parámetros de configuración del PCM para la configuración con material de cambio de fase alrededor del CPU.

Se elige esta configuración, a 125 % de la potencia nominal, debido a que muestra los mejores resultados, sus curvas son limpias, fáciles de identificar y de comparar. Al igual que en las pruebas anteriores se mantienen constantes sus propiedades para ambos estados de segregación del material con el fin de identificar mejor el efecto de las variaciones en el parámetro de interés respectivo. Además, se emplea la temperatura de fusión óptima determinada con anterioridad.

7.3.1. Efecto de la conductividad térmica

El parámetro más importante a estudiar es la conductividad térmica debido al creciente campo que se ha ido desarrollando en la investigación y determinación de sistemas potenciadores de conductividad térmica, como se presenta en la revisión literaria de Sahoo *et al.* (2016). Los diferentes tipos de potenciadores, permiten aumentar la conductividad térmica efectiva de una matriz de PCM orgánico (parafina) hasta valores de más de 25 W/(m K) (Luo *et al.*, 2015).

Debido a estos avances y estudios, se emplean valores para las pruebas de diez y

cincuenta veces la conductividad térmica del material idóneo basal, con propiedades según el Cuadro 7.2.1. En la Figura 7.3.8 se muestra el efecto de este cambio en el valor de temperatura del CPU con respecto al tiempo, posterior al pico de potencia ($t = 1$ s).

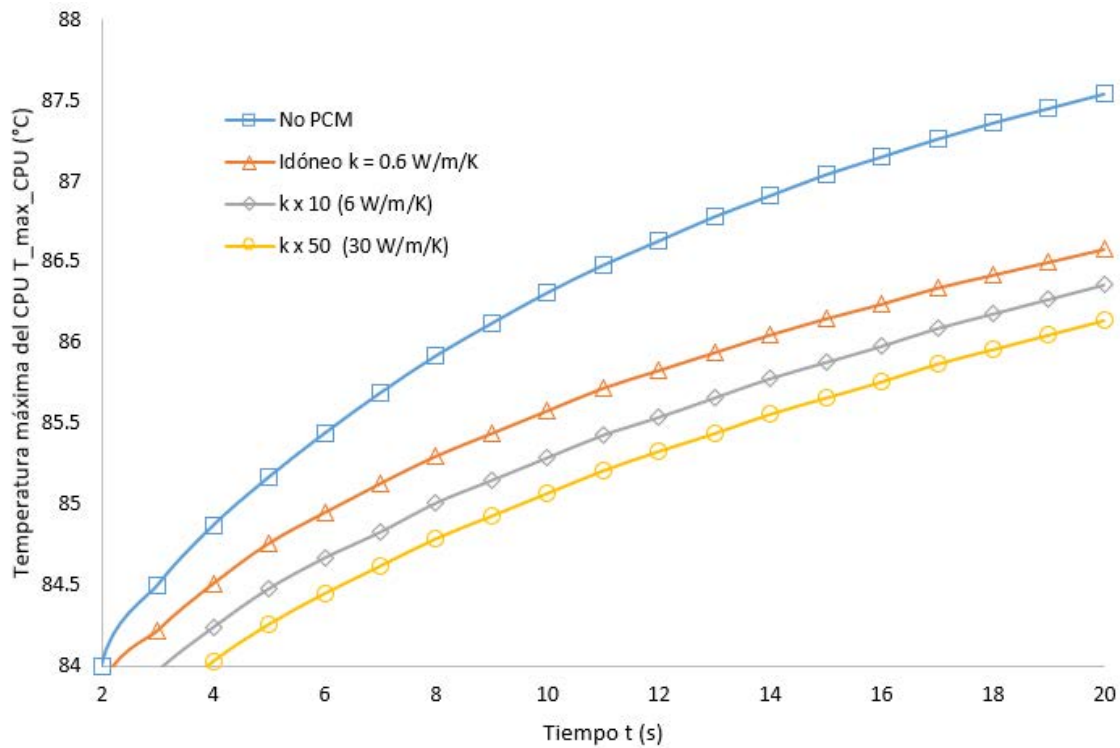


Figura 7.3.8. Perfiles de temperatura del CPU dependientes de la conductividad térmica del PCM idóneo (Elaboración propia, 2019).

Como se detalla en el capítulo anterior, la temperatura basal del sistema disminuye con la introducción del material de cambio de fase, este efecto de traslación vertical de la curva de temperatura contra tiempo se aprecia en la Figura 7.3.8. El efecto es más significativo conforme se aumenta la conductividad térmica, sin parecer a converger en algún valor, a pesar de que se puede esperar que así sea al alcanzar valores cercanos a la conductividad térmica de los elementos en contacto, entiéndase, procesadores y propagadores.

Un aumento en la conductividad térmica del material de cambio de fase disminuye los gradientes de temperatura en el material ayudando a una fusión más uniforme y eficiente. Esto podría solventar los problemas de segregación de fases presentes en algunos materiales de cambio de fase, como en el hidróxido de bario octahidratado (Wang *et al.*, 2019). El Cuadro 7.3.1 muestra los resultados de la ganancia de cada una de las variaciones paramétricas de este estudio para una temperatura de alarma de 86 °C con base de referencia la corrida con el PCM idóneo con parámetros inalterados. Se puede observar que el aumento en la conductividad posee un aumento sumamente significativo, de hasta 4.9 s con respecto al sistema idóneo en la configuración de prueba.

Cuadro 7.3.1. Ganancia de tiempo con respecto al sistema con el material idóneo en los alrededores del CPU a una potencia del 125 % con cambios en sus propiedades térmicas y una temperatura de alarma de 86 °C.

Corrida	Ganancia (s)
No PCM	-5.15
Idóneo, $T_{fus} = 71\text{ °C}$	Referencia
Conductividad térmica $\times 10$	2.64
Conductividad térmica $\times 50$	4.90
Calor específico $\times 1.5$	0.09
Calor específico $\times 2$	0.27
Densidad $\times 1.5$	1.70
Densidad $\times 2$	3.33
Entalpía de fusión $\times 1.5$	1.58
Entalpía de fusión $\times 2$	3.08
Rango de fusión - 4 K, $T_{fus} - 2\text{ K}$	-0.88
Rango de fusión + 4 K, $T_{fus} + 2\text{ K}$	-0.88
Rango de fusión - 4 K	0.27
Rango de fusión + 4 K	-0.38

7.3.2. Efecto de la capacidad calorífica, la densidad y la entalpía de fusión

Cuando se parte a estudiar el efecto de los demás parámetros de interés, no se encuentran razones por las cuales aumentar o disminuir por factores de más de dos veces estos valores. Se decide tomar en cuenta únicamente la variación normal presente entre las diferentes familias de materiales de cambio de fase. Se emplean dos factores: 1.5 y 2. Existen materiales con valores menores, mas el efecto de la variación se puede asumir como constante y proporcional.

En la Figura 7.3.9 se visualiza como el calor específico de la sustancia no parece tener un efecto significativo. Este comportamiento se atribuye a que el PCM en casi su totalidad, en este sistema, se encuentra en estado de transición absorbiendo energía latente, principalmente.

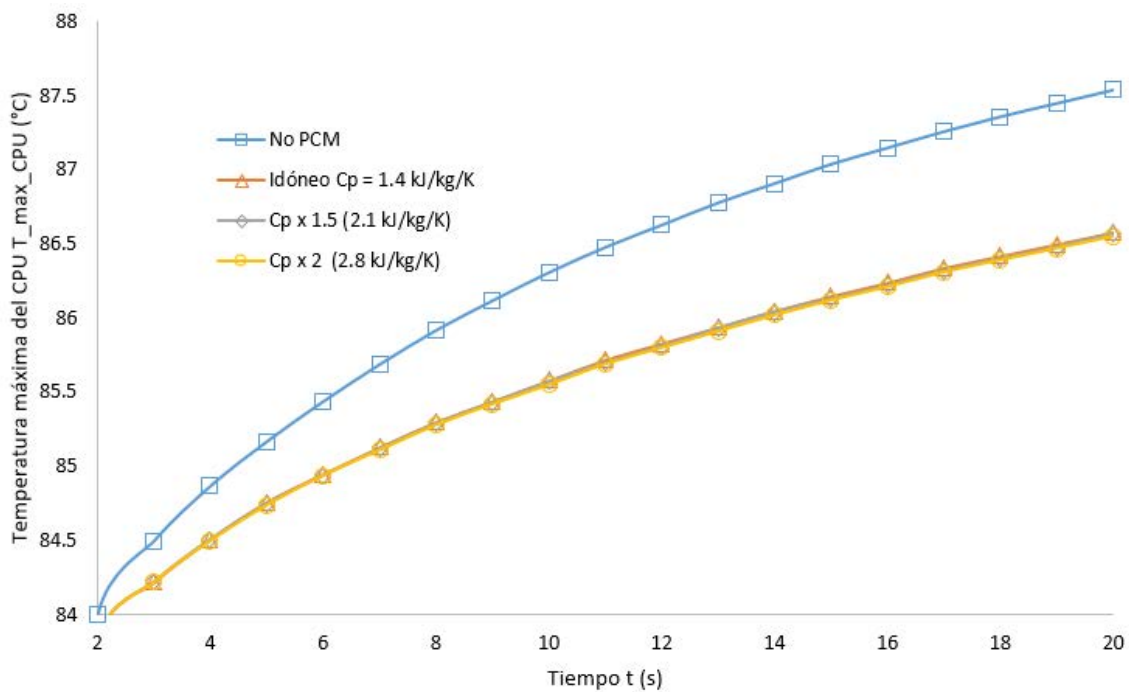


Figura 7.3.9. Perfiles de temperatura del CPU dependientes de la capacidad calorífica del PCM idóneo (Elaboración propia, 2019).

Esta conducta resulta adecuada, debido a que la introducción de un potenciador de conductividad térmica puede afectar el calor específico promedio del bloque de PCM en dependencia con las propiedades del material empleado como potenciador y su configuración, pero, como la dependencia del sistema a este valor no es sumamente significativa, se puede sacrificar hasta cierta medida con el fin de obtener una conductividad térmica mayor. A pesar de presentar una variación mínima, el aumento de 0.27 s mostrado en el Cuadro 7.3.1 para un valor de dos veces el calor específico, aún así, no es insignificante. La elección de un material con un alto calor específico es aconsejable y puede ayudar a apaciguar picos de potencia a temperaturas menores o mayores al intervalo de fusión.

Una variación en la densidad del bloque sin un cambio en el volumen del mismo se traduce en una mayor cantidad de masa que, al entrar en fusión, puede absorber una mayor cantidad de energía. Esta idea es confirmada al comparar las curvas de la Figura 7.3.10. El Cuadro 7.3.1 muestra una ganancia de hasta 3.33 s para una densidad dos veces la de prueba, cerca de 3000 kg/m^3 , la cual es significativa y se puede encontrar principalmente en PCMs metálicos y algunos eutécticos inorgánicos (Lane, 1980; Zalba *et al.*, 2003).

La Figura 7.3.11 muestra como la variación en el valor de la entalpía de fusión posee un efecto similar al aumento en la densidad, debido a que ambos aumentan de forma proporcional la cantidad de energía que el PCM puede absorber de forma latente. El Cuadro 7.3.1 muestra que la ganancia para cada caso es cercana, de forma respectiva. La diferencia puede atribuirse a que al aumentar la entalpía se mantiene constante el efecto por la absorción sensible de calor, lo cual no se da con el cambio en la densidad.

7.3.3. Efecto del intervalo de temperatura de cambio de fase

En COMSOL se configura el cambio de fase, como se detalla en la sección de configuración del estado dinámico, empleando 2 factores para indicar la zona de la transición: la temperatura media de la curva de fusión, en forma de campana (como una distri-

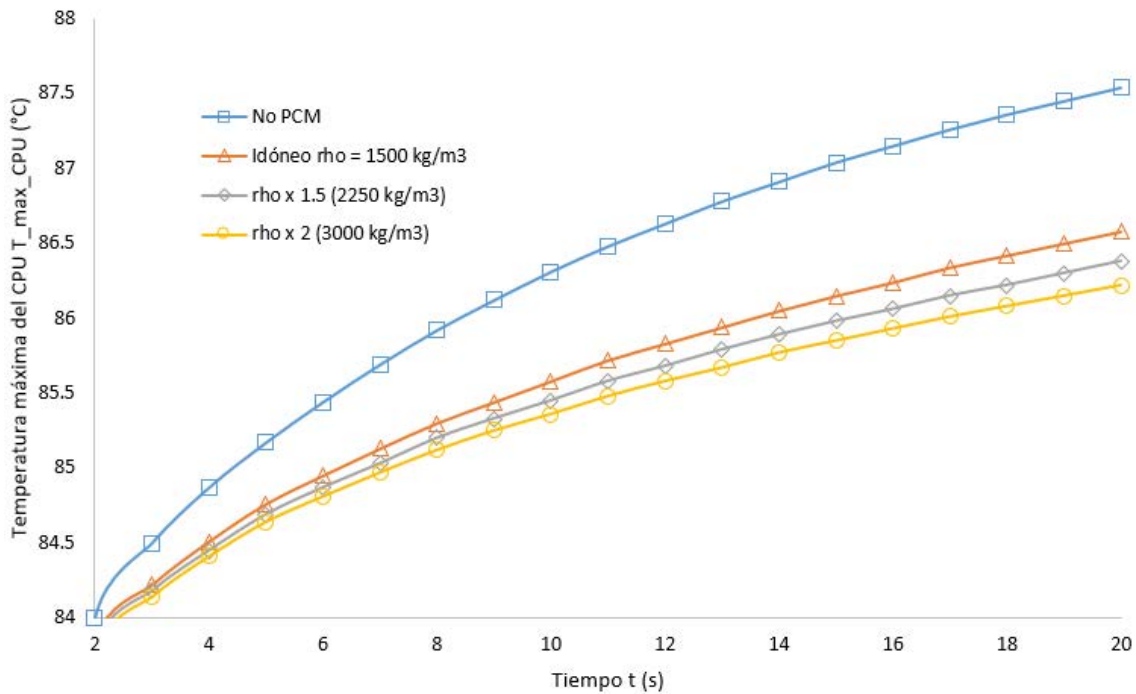


Figura 7.3.10. Perfiles de temperatura del CPU dependientes de la densidad del PCM idóneo (Elaboración propia, 2019).

bución normal), y el rango de la misma. Para efectos de este trabajo también es de interés conocer el efecto de la temperatura inicial de fusión. Se puede decir que esto se determinó con las pruebas de temperatura de fusión media, debido a que al mantener el rango constante se varía de igual forma el valor inicial de la fusión, pero, manteniendo la forma de la campana igual. Se debe probar alterando la forma de la misma.

La Figura 7.3.12 muestra las curvas de temperatura del CPU al disminuir y aumentar el rango del estado de transición manteniendo la temperatura inicial de fusión constante. El efecto es negativo, y, como se puede observar del Cuadro 7.3.1, con resultados similares para ambas variaciones. Esto apunta a que la temperatura inicial de fusión no es un valor de interés a la hora de seleccionar un material para estas aplicaciones y su efecto no puede ser compensado por un amplio intervalo de transición de fase.

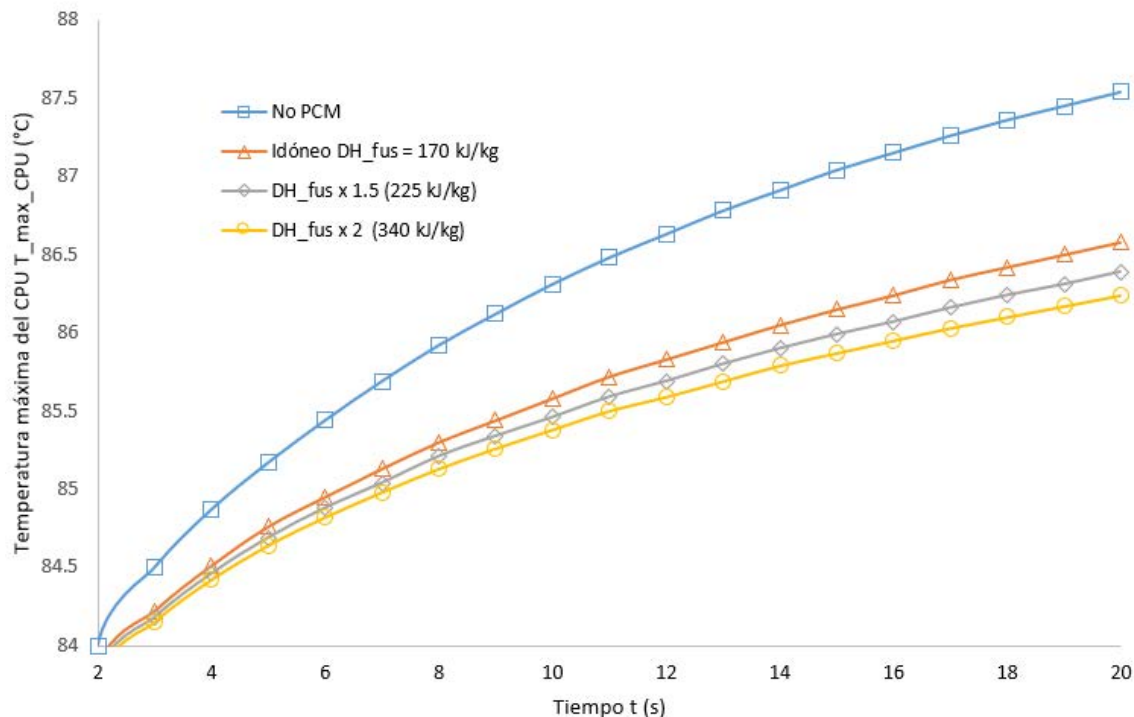


Figura 7.3.11. Perfiles de temperatura del CPU dependientes de la entalpía de fusión del PCM idóneo (Elaboración propia, 2019).

El comportamiento observado en la Figura 7.3.12 es similar al presente en la Figura 7.2.2 para temperaturas de fusión igualmente alejadas, en medida absoluta, de la temperatura de fusión óptima. Estos resultados juntos denotan la importancia de la determinación e identificación de la curva de calentamiento de los materiales de cambio de fase tras varios ciclos de calentamiento y enfriamiento.

A manera de complemento, y a virtud de los resultados anteriores; se propone estudiar el efecto directo del rango de fusión sobre la temperatura del CPU. La Figura 7.3.13 expone como al disminuir el rango de temperatura de la transición se aumenta la ganancia. Lo cual apoya el juicio sobre el efecto de la temperatura inicial de fusión y aporta nueva información: las variables de purezas, conformación, uniformidad y estabilidad del material de cambio de fase que afecten, disminuyendo, la zona de transición son importantes y deben de tenerse en cuenta al elegir el PCM a utilizar.

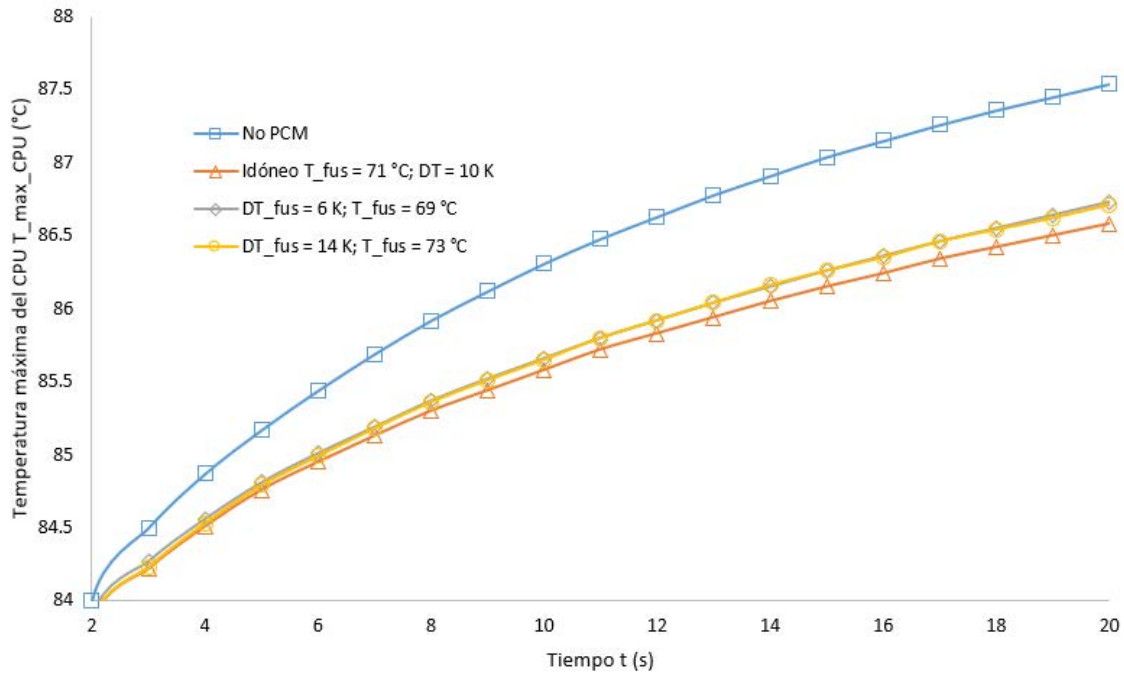


Figura 7.3.12. Perfiles de temperatura del CPU dependientes de la temperatura inicial de fusión del PCM idóneo (Elaboración propia, 2019).

La búsqueda de un material de cambio de fase óptimo para un sistema térmico de estudio, debe tomar en cuenta el efecto de cada una de las propiedades expuestas en esta sección. Las consideraciones propuestas pueden ayudar a discriminar mejor entre diferentes materiales y valores para las propiedades térmicas de interés. En la siguiente sección se condensa la información antes presentada con el fin de proponer un método sistemático para futuras aplicaciones de similar enfoque.

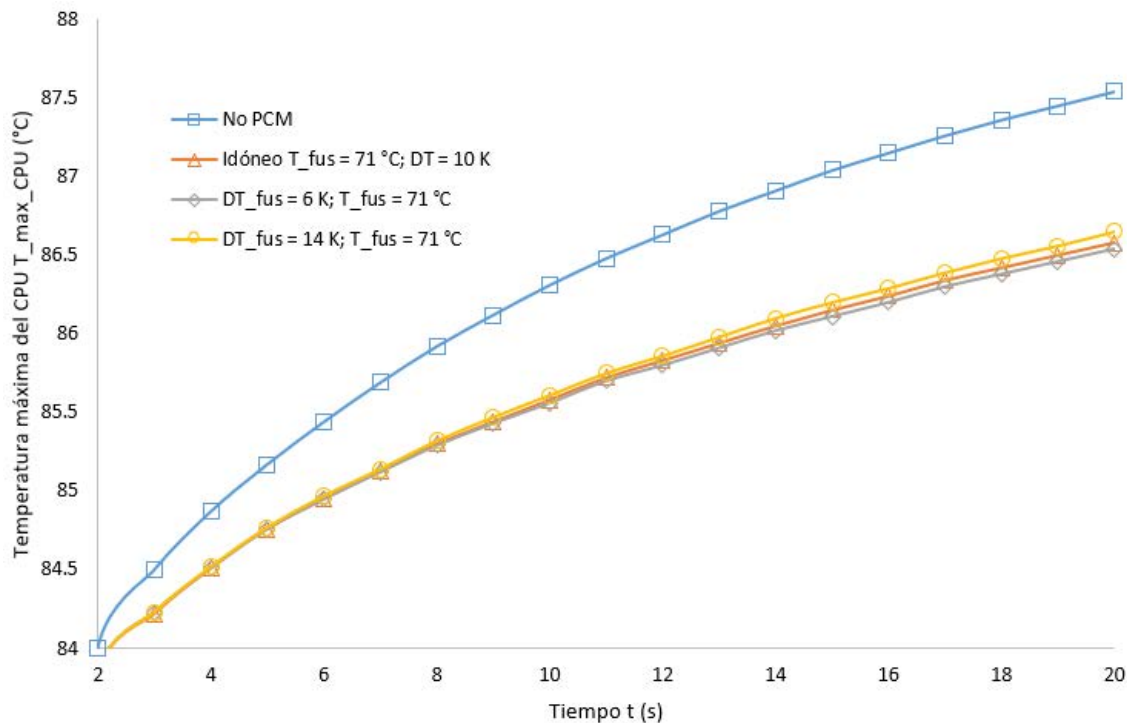


Figura 7.3.13. Perfiles de temperatura del CPU dependientes del rango de fusión del PCM idóneo (Elaboración propia, 2019).

7.4. Método para la selección de un material de cambio de fase en un sistema de control térmico

Lo desarrollado en este y anteriores capítulos puede estructurarse en un algoritmo secuencial para la óptima selección de un PCM en un sistema de control térmico con los siguientes pasos:

- **Paso 1:** alcanzar una simulación válida en estado estable para el sistema de estudio.
- **Paso 2:** estudiar los flujos de calor para eliminar regiones en las cuales se pueda acumular el calor y causar un alza en la temperatura del procesador. Como se da al colocar el PCM bajo el TCU en las pruebas anteriores.

- **Paso 3:** anotar las posibles consideraciones termo-mecánicas a tomar en cuenta según las características de las regiones de estudio.
- **Paso 4:** estudiar el cambio de temperatura para diferentes zonas del sistema con respecto a la distancia con la fuente de calor y las resistencias térmicas involucradas en el sistema en estado dinámico.
- **Paso 5:** estudiar la temperatura superficial de las diferentes zonas en contacto con el PCM y su variación con respecto al aumento de potencia. Para obtener un rango aproximado para el valor de temperatura de fusión óptimo para el PCM.
- **Paso 6:** aplicar simulaciones variando, únicamente, la temperatura de fusión dentro del rango propuesto. Expandir el rango de ser necesario con base en los resultados.
- **Paso 7:** analizar el comportamiento de las curvas y la ganancia con respecto a la temperatura de alarma, especificada o tomada como punto de referencia.
- **Paso 8:** considerar, con gran importancia, el uso de potenciadores de conductividad térmica para promover la eficiencia del sistema de control.
- **Paso 9:** seleccionar el material con mejores propiedades térmicas tomando en cuenta el efecto de cada una de ellas de forma individual.
- **Paso 10:** buscar las curvas calorimétricas para el material elegido. Estas son de primordial importancia debido al efecto del rango y la temperatura de fusión media del PCM.

Como extra, se puede implementar una optimización para el volumen óptimo, fijando una de las dimensiones del bloque a un parámetro y haciendo variar este mediante un barrido paramétrico. Para su determinación se observarían las curvas y la diferencia entre ellas, cuando la diferencia no sea significativa, o no justifique el uso extra de recursos, se puede considerar óptima. De manera funcional, se puede tomar una masa

cercana a la determinada, no necesariamente el mejor valor. Este paso puede resultar complicado dependiendo de la geometría del sistema y no se aplica en este trabajo.

7.4.1. Pruebas con un PCM seleccionado

Con el método de selección desarrollado se opta por una pequeña prueba. Aplicando el algoritmo descrito para el sistema se elige la configuración con PCM en los alrededores del CPU y un pico de potencia sostenido de 125 %.

Empleando los resultados del Cuadro 7.2.2 se realiza una búsqueda de materiales con una temperatura de fusión cercana al rango entre 70 °C y 72 °C. Al igual que se expone en el capítulo anterior la información de PCMs con fusión a estas temperaturas no es amplia, pero resulta más fácil ubicarla, con respecto a la de materiales con puntos de fusión cerca a los 80 °C.

Se elige el ácido esteárico, debido a que su temperatura de fusión es cercana al rango deseado, 69 °C, y se lograron encontrar todos los valores para las propiedades requeridas. Sus propiedades se muestran en el Cuadro 7.4.1.

Cuadro 7.4.1. Propiedades térmicas del ácido esteárico.

Propiedad	Valor
Entalpía de fusión	202.5 kJ/kg *
Densidad del sólido	965 kg/m ³ *
Densidad del líquido	848 kg/m ³ *
Conductividad térmica del sólido	0.3 W/(m K) *
Conductividad térmica del líquido	0.172 W/(m K) *
Calor específico del sólido	2.83 kJ/(kg K) †
Calor específico del líquido	2.38 kJ/(kg K) †
Rango de fusión	8 K ‡
Temperatura media de fusión	69 °C ‡

*Obtenido de Zalba *et al.* (2003).

†Obtenido de Karaipekli *et al.* (2007).

‡Obtenido de Sari *et al.* (2009).

Al ingresar este material a COMSOL y realizar una simulación a 125 % de la potencia nominal se obtiene la curva de la Figura 7.4.14. Se colocan, así mismo, los resultados para el sistema sin PCM y con el material idóneo para esta configuración.

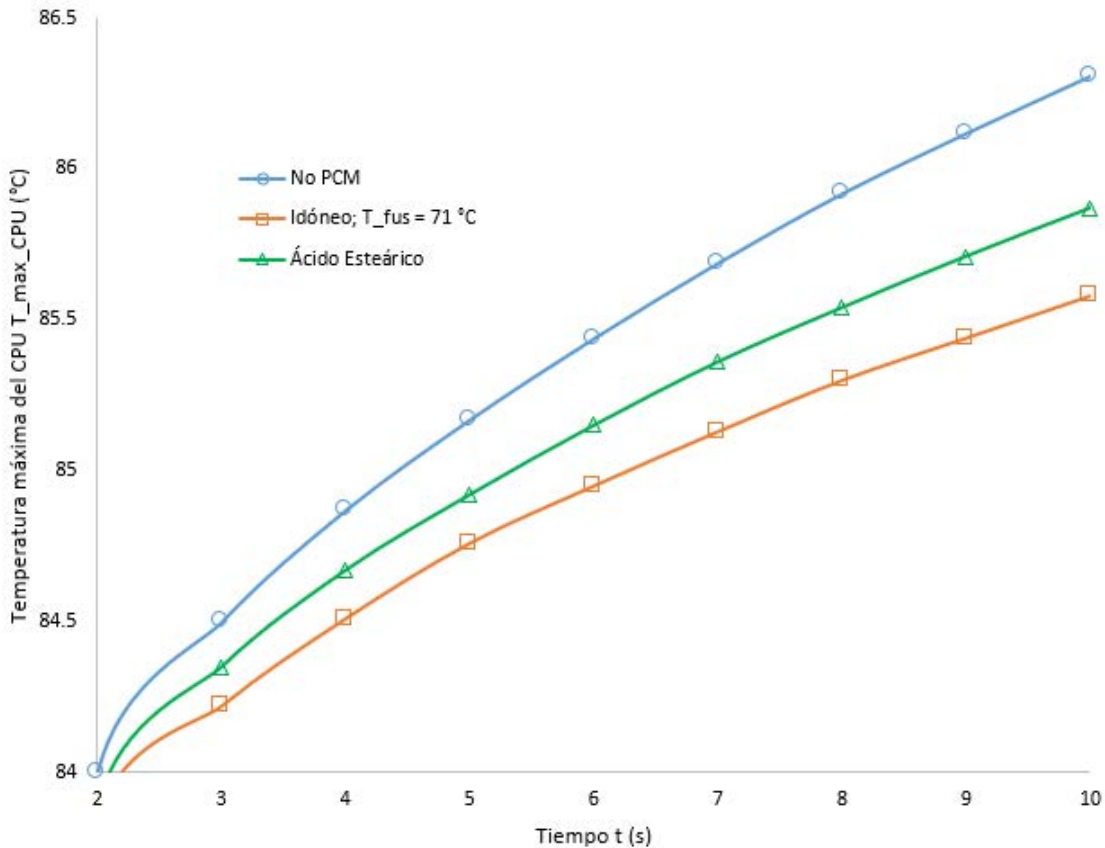


Figura 7.4.14. Perfil de temperatura del CPU para un material con temperatura de fusión cercana a la óptima para el PCM en los alrededores del CPU (Elaboración propia, 2019).

El comportamiento del ácido esteárico es el esperado al tomar en cuenta que sus propiedades no son las mismas que las del material “idóneo”. Aunque su entalpía de fusión es mayor, su densidad es menor y se sabe que su efecto es contrario de manera proporcional. El calor específico del ácido es mayor pero se determinó, anteriormente, que el rol de esta propiedad no es tan significativa. Las propiedades con mayor efecto son la diferencia de temperatura de fusión y la, bastante diferente, conductividad térmica.

Los valores de ganancia para ambas curvas, empleando una temperatura de alarma de 85 °C y un paso máximo de 0.1 s se presentan en el Cuadro 7.4.2. Para un material con la misma temperatura de fusión e incorporando potenciadores de conductividad térmica, se podría recomendar su uso en este sistema; aunque, muchas pruebas más deberían de realizarse, como se explica en secciones anteriores.

Cuadro 7.4.2. Ganancia de tiempo con respecto al sistema sin PCM para un PCM idóneo y el ácido esteárico en los alrededores del CPU a una potencia del 125 % y una temperatura de alarma de 85 °C.

Corrida	Ganancia (s)
No PCM	Referencia
Idóneo, $T_{fus} = 71\text{ °C}$	1.63
Ácido esteárico	0.91

7.5. Recapitulación

A continuación se presentan las ideas y pasos principales expuestos en este capítulo a manera de resumen conceptual:

- Se propone un nuevo estudio para el sistema con un solo pico sostenido de potencia.
- Cada ubicación del PCM en el sistema conlleva un método y simulaciones para la determinación de la temperatura de fusión óptima para el material de cambio de fase.
- Se comparan las diferentes configuraciones de sistema de control térmico empleando materiales de cambio de fase.
- Como la temperatura límite no se alcanza con una potencia de 1.25 veces la nominal, se realizan pruebas a 1.5 veces TDP para estudiar la variación.

- Las propiedades térmicas del material afectan su desempeño de distintas maneras. Esto lleva a realizar distintos estudios comparativos del efecto de cada parámetro.
- Se plantea el efecto de introducir potenciadores de conductividad térmica en el material de cambio de fase.
- Para validar la importancia de la preselección de la temperatura de fusión óptima, se realizan estudios variando distintos parámetros del intervalo de fusión del material.
- Se estructura el método de selección de materiales de cambio de fase para una aplicación de similar enfoque.
- Una pequeña prueba con un material seleccionado de acuerdo al método planteado es estudiada para exponer el efecto en las diferencias entre un material teórico y uno real.

Con esto se alcanza el final del cuerpo del trabajo. Su desarrollo y resultados arrojan una gran cantidad de información útil e ideas de mejora para posteriores investigaciones en el área, las cuales se mencionan en la sección de **Conclusiones y Recomendaciones**.

Capítulo 8

Conclusiones y recomendaciones

8.1. Conclusiones

- Se diseña el sistema de trabajo en AutoCAD 2018 con base en la información proporcionada de un sistema real. Se crean tres permutaciones de la geometría con PCM en diferentes ubicaciones y dos volúmenes diferentes para cada ubicaciones.
- Se modela el sistema en estado estacionario empleando COMSOL Multiphysics 5.1. Se acerca el resultado de la simulación a los datos experimentales para validar esta como estado inicial de la simulación dinámica.
- Se realiza un análisis de sensibilidad de la simulación a diferentes parámetros del modelo y al mallado de la geometría. La sensibilidad a los parámetros se considera adecuada. El resultado final de la simulación no varía significativamente con los niveles de mallado utilizados.
- Con base en resultados para el sistema a TDP, 125 % y 150 %, y la información disponible sobre materiales de cambio de fase para temperaturas intermedias se eligen tres materiales para pruebas en un sistema con múltiples ciclos de potencia: hidróxido de bario octahidratado, naftaleno y eutéctico de urea con bromuro de

amonio.

- Se crea un modelo de simulación del estado dinámico empleando como estado inicial la respuesta final de la simulación estacionaria.
- La simulación de los primeros picos para las seis configuraciones de sistema con PCM arroja resultados insatisfactorios con un porcentaje volumétrico máximo de fusión de 2.26 %. Los resultados indican un método inadecuado para la elección de los materiales de cambio de fase.
- Se cambia el paradigma del estudio a un enfoque para un solo pico de potencia sostenido y un método diferente para la selección del PCM. Se determina la temperatura de fusión óptima para cada configuración de trabajo. Para el sistema con PCM alrededor del CPU la temperatura de fusión óptima es de 71 °C, 73 °C para el PCM bajo el TCU y 69 °C para el sistema con PCM sobre el TCU.
- La ubicación con mejores resultados presenta una ganancia de 5.15 s para el PCM en los alrededores del CPU, 3.00 s para el sistema con PCM sobre el TCU y -0.98 s al colocar el PCM bajo el TCU. Estos resultados se dan a 1.25 veces la potencia basal y una temperatura de alarma de 86 °C. Cada sistema cuenta con sus ventajas, desventajas, limitaciones e incógnitas, por lo que requieren de más pruebas para ser recomendadas.
- La prueba de determinación de temperatura de fusión y ganancia para el sistema con PCM en los alrededores del PCM y 1.5 veces la potencia nominal resulta en una temperatura de fusión óptima de 72 °C. Los resultados indican la posibilidad de emplear un mismo PCM para un rango amplio de potencias de modo turbo.
- Se encuentra una dependencia considerable del sistema a la densidad y la entalpía de fusión, ganancia de hasta 8.15 s para valores de 3000 kg/m³ o 340 kJ/kg. El efecto del calor específico y el rango de fusión del material no es sumamente

significativo con ganancias menores a 5.45s. Se plantea el uso de potenciadores de conductividad térmica para alcanzar una ganancia de hasta 10.1s para una conductividad efectiva de 30 W/m/K. Los valores se reportan para una temperatura de alarma de 86 °C, 1.25 veces la potencia nominal y el sistema con PCM alrededor del CPU.

- Con los resultados obtenidos se plantea un método de selección para materiales de cambio de fase en sistemas de control térmico. Empleando el método se elige el ácido esteárico como material de cambio de fase en la configuración alrededor del CPU y se comparan sus resultados con los obtenidos para el mismo sistema con el material de prueba.

8.2. Recomendaciones

- El modelo empleado para los tubos de calor ve estos como una configuración de diferentes sólidos en contacto y una capa resistiva. Estudiar las limitaciones de este modelo con respecto al comportamiento real es necesario para la simulación de un sistema que incluya este tipo de métodos de extracción de calor.
- El trabajo utiliza una distribución uniforme del calor generado por el procesador en todo su volumen. Los procesadores reales no mantienen tal supuesto, por esta razón, un modelo más exacto debe considerar la distribución en la generación de calor en el volumen del procesador.
- La configuración con el bloque de material de cambio de fase sobre la unidad de control térmica arroja interesantes resultados que exhortan a profundizar en su comportamiento.
- Los materiales de cambio de fase pueden presentar diferencias muy variadas entre sus propiedades en ambos estados. Un estudio del efecto de estas diferencias en un

estado similar al comprendido en el trabajo es necesario para la futura selección de materiales de cambio de fase.

- El emplear potenciadores de conductividad térmica puede expandir la capacidad de rápida distribución de calor en el bloque de material de cambio de fase, llevando a un cambio en la temperatura óptima de fusión para un sistema específico, dependiendo, también, del volumen del bloque. Determinar este posible efecto es de interés.
- Muchos sistemas, a diferencia del elegido, no poseen mecanismos de extracción activa de calor. Un estudio del efecto o utilidad de los materiales de cambio de fase en dichos sistemas, siguiendo la metodología de este trabajo, es un área de interés.
- En el estudio presentado no se toman en cuenta los efectos por la expansión térmica sensible del material y su expansión debido a la transición de fase, y la diferencia de densidad asociada. Se recomienda un estudio termo-mecánico que incluya estos factores y su efecto sobre el desempeño del sistema.
- El material de cambio de fase, por su naturaleza de acción, no permite su aplicación directa sobre el sistema sin ser encapsulado. Un estudio del efecto de distintos tipos de materiales de encapsulamiento sobre el desempeño del PCM en un sistema es de vital importancia para su viable aplicación.

Capítulo 9

Apéndices

A.1. Cuadro de resultados

A continuación se presentan los resultados finales obtenidos en las diferentes etapas de simulación del trabajo.

Cuadro A.1.1. Resultados del estudio del efecto del modelo de turbulencia, capas de frontera y mallado en un modelo de prueba simplificado.

Velocidad del aire (m/s)	Temperatura de referencia (°C)			
	9	7	5	3
$\kappa - \epsilon$; 3 capas; mallado grueso	44.87	46.28	48.74	54.06
$\kappa - \epsilon$; 1 capa; mallado grueso	45.65	47.19	49.74	54.98
$\kappa - \epsilon$; 3 capas; mallado normal	44.90	46.30	48.71	53.89
$\kappa - \epsilon$; sin capas; mallado normal	46.33	47.66	49.85	54.64
$\kappa - \omega$; 3 capas; mallado normal	44.62	45.90	48.06	52.60
$\kappa - \omega$; sin capas; mallado muy grueso	47.11	48.57	51.01	55.94
$\kappa - \omega$; sin capas; mallado grueso	46.70	48.03	50.23	54.78
$\kappa - \omega$; sin capas; mallado normal	45.88	47.08	49.05	53.28

Cuadro A.1.2. Resultados de la optimización final del coeficiente convectivo de transferencia de calor y la potencia del GPU para la simulación en estado estacionario.

Coef. convectivo h_left_fan (W)	Diff. Temp. T_HP_ Left-Fan (°C)	Diff. Temp. T_HP_ CPU (°C)	Factor Potencia x_P_ GPU	Diff. Temp. T_HP_ Right-Fan (°C)	Diff. Temp. T_HP_ GPU (°C)
110	2.06	0.82	0.15	-2.45	-2.9
111	1.89	0.64	0.16	-1.94	-2.38
112	1.72	0.47	0.17	-1.43	-1.85
113	1.56	0.30	0.18	-0.92	-1.33
114	1.39	0.14	0.19	-0.41	-0.81
115	1.24	-0.03	0.20	0.10	-0.29
116	1.08	-0.19	0.21	0.61	0.24
117	0.92	-0.35	0.22	1.12	0.76
118	0.77	-0.50	0.23	1.63	1.28
119	0.62	-0.65	0.24	2.14	1.81
120	0.47	-0.81	0.25	2.65	2.33

Cuadro A.1.3. Resultados de la optimización final de la potencia de las resistencias variables para la simulación en estado estacionario.

Potencia VR punto caliente P_VR_HS (W)	Diff. Temp. T_MB_ Hotspot (°C)	Potencia VR cerca CPU P_VR_CPU (W)	Diff. Temp. T_VR_CPU (°C)
1.05	-1.29	0.330	-1.61
1.06	-1.13	0.335	-1.29
1.07	-0.97	0.340	-0.98
1.08	-0.81	0.345	-0.66
1.09	-0.64	0.350	-0.34
1.10	-0.48	0.355	-0.02
1.11	-0.32	0.360	0.30
1.12	-0.16	0.365	0.62
1.13	0.00	0.370	0.93
1.14	0.16	0.375	1.25
1.15	0.33	0.380	1.57

Cuadro A.1.4. Resultados del análisis de sensibilidad del modelo en estado estacionario con respecto a varios parámetros del sistema.

Parámetro	Temp. máxima del CPU T_max_CPU (°C)				
	0.5	0.75	1	1.25	1.5
Multiplicador					
k_HP	82.03	81.05	80.32	79.75	79.26
k_vapor	82.03	80.91	80.32	79.97	79.73
k_aletas	81.21	80.63	80.32	80.14	80.01
k_evap	85.12	82.22	80.32	78.97	77.93
k_TIM	83.08	81.24	80.32	79.77	79.41
k_FR4_MB	80.69	80.48	80.32	80.19	80.07
h_fan	95.62	85.83	80.32	76.79	74.32
h_conv	81.50	80.87	80.32	79.83	79.38
P_CPU	62.20	71.26	80.32	89.39	98.45
P_GPU	77.99	79.16	80.32	81.49	82.66
P_VR_CPU	80.31	80.32	80.32	80.33	80.34
P_VR_HS	80.16	80.24	80.32	80.40	80.48
P_VR_Chips	80.11	80.22	80.32	80.43	80.54

Cuadro A.1.5. Resultados del análisis de sensibilidad del modelo en estado estacionario con respecto al mallado del sistema.

Variable	Normal (°C)	Fino (°C)	Extremadamente fino (°C)
T_max_CPU	-0.07	-0.12	-0.17
T_v_GPU	-0.07	-0.11	-0.16
T_SSD	0.00	0.00	0.00
T_PCH	-0.03	-0.06	-0.09
T_Memory	0.03	0.04	0.04
T_MB_Hotspot	0.15	-0.11	-0.34
T_HP_Right-Fan	0.00	0.00	0.01
T_HP_GPU	0.01	0.02	0.03
T_HP_CPU	-0.02	-0.04	-0.07
T_HP_Left-Fan	-0.02	-0.03	-0.05
T_VR_CPU	-0.10	-0.17	-0.26

Cuadro A.1.6. Perfiles de temperatura con respecto al tiempo para varios puntos del sistema sin PCM, bajo una potencia 1.25 veces TDP.

Tiempo t (s)	Potencia del CPU P_{CPU} (W)	Temp. tubo de calor sobre GPU T_{HP_GPU} (°C)	Temp. tubo de calor sobre CPU T_{HP_CPU} (°C)	Temp. tubo de calor izquierdo $T_{HP_Left-Fan}$ (°C)	Temp. Soporte del pro- pagador del CPU (°C)	Temp. Propaga- dor de cobre (°C)
0.0	45.0	54.26	63.03	61.16	69.56	70.74
0.5	45.0	54.26	63.03	61.16	69.56	70.74
1.0	45.0	54.26	63.03	61.16	69.56	70.74
1.5	45.0	54.26	63.03	61.16	69.56	70.74
2.0	56.3	54.26	63.08	61.20	69.60	70.97
2.5	67.5	54.26	63.35	61.40	69.77	72.01
3.0	67.5	54.26	63.61	61.59	69.94	73.04
3.5	67.5	54.26	63.88	61.79	70.11	74.08
4.0	67.5	54.27	64.17	62.03	70.34	74.81
4.5	67.5	54.27	64.51	62.34	70.69	75.04
5.0	67.5	54.28	64.85	62.64	71.04	75.26
5.5	67.5	54.28	65.20	62.95	71.39	75.49
6.0	67.5	54.29	65.54	63.26	71.74	75.71
6.5	67.5	54.29	65.88	63.56	72.09	75.94

Cuadro A.1.7. Datos de la simulación dinámica para diferentes algoritmos de solución y pasos de tiempo.

Tiempo t (s)	Potencia CPU P_CPU (W)	Temp. máxima del CPU T_max_CPU (°C)					
		DMF; 1 s	DMF; 0.5 s	DMF; 0.3 s	Gen- α ; 1 s	Gen- α ; 0.5 s	Gen- α ; 0.3 s
0.0	45.0	80.40	80.40	80.40	80.40	80.40	80.40
0.3	45.0	–	–	80.37	–	–	80.40
0.5	45.0	–	80.30	–	–	80.40	–
0.6	45.0	–	–	80.23	–	–	80.40
0.9	45.0	–	–	80.21	–	–	80.40
1.0	45.0	80.27	80.27	–	80.40	80.40	–
1.2	45.0	–	–	80.51	–	–	80.40
1.5	45.0	–	80.54	80.40	–	80.40	80.40
1.8	45.0	–	–	83.05	–	–	80.40
2.0	56.3	84.54	84.54	–	80.40	80.40	–
2.1	67.5	–	–	86.12	–	–	81.20
2.4	67.5	–	–	87.10	–	–	85.94
2.5	67.5	–	87.24	–	–	86.01	–
2.7	67.5	–	–	87.76	–	–	87.81
3.0	67.5	88.10	88.10	88.16	87.69	87.69	87.51
3.3	67.5	–	–	88.44	–	–	87.93
3.5	67.5	–	88.54	–	–	88.07	–
3.6	67.5	–	–	88.70	–	–	88.35
3.9	67.5	–	–	88.91	–	–	88.75
4.0	67.5	88.85	88.85	–	88.73	88.73	–
4.2	67.5	–	–	89.12	–	–	88.86
4.5	67.5	–	89.10	89.34	–	88.94	88.96
4.8	67.5	–	–	89.56	–	–	89.38
5.0	67.5	89.38	89.38	–	89.45	89.45	–

Cuadro A.1.8. Datos de simulación dinámica para las distintas configuraciones de PCM empleando el eutéctico de urea y bromuro de amonio, bajo una potencia 1.25 veces TDP.

Tiempo t (s)	Potencia	Temp. máxima del CPU T _{max} CPU (°C)						
	del CPU P_CPU (W)	No PCM	Abajo; menor volu- men	Abajo; mayor volu- men	CPU; mayor volu- men	CPU; menor volu- men	Arriba; menor volu- men	Arriba; mayor volu- men
0	45.0	80.40	80.67	80.60	80.37	80.41	80.69	80.62
1	45.0	80.40	80.66	80.59	80.36	80.40	80.67	80.61
2	50.6	81.77	82.02	81.96	81.69	81.73	82.04	81.97
3	56.3	83.36	83.62	83.56	83.24	83.29	83.62	83.55
4	56.3	84.66	84.93	84.86	84.49	84.56	84.91	84.84
5	56.3	85.30	85.58	85.50	85.11	85.19	85.54	85.46
6	56.3	85.16	85.42	85.35	84.96	85.06	85.39	85.31
7	50.6	84.01	84.25	84.17	83.82	83.94	84.25	84.16
8	45.0	81.67	81.87	81.79	81.53	81.66	81.93	81.84
9	45.0	80.78	80.97	80.88	80.67	80.79	81.06	80.97
10	45.0	81.60	81.80	81.71	81.49	81.60	81.88	81.77
11	45.0	81.83	82.04	81.95	81.72	81.83	82.11	82.00
12	50.6	81.38	81.58	81.49	81.27	81.36	81.66	81.56
13	56.3	82.43	82.64	82.54	82.30	82.39	82.68	82.59
14	56.3	85.25	85.46	85.37	85.07	85.16	85.44	85.36
15	56.3	86.45	86.65	86.56	86.23	86.33	86.58	86.50
16	56.3	85.73	85.92	85.82	85.49	85.60	85.81	85.73
17	50.6	84.27	84.46	84.36	84.08	84.19	84.36	84.27
18	45.0	81.96	82.14	82.04	81.88	81.99	82.09	82.00
19	45.0	81.13	81.33	81.22	81.10	81.21	81.29	81.19
20	45.0	82.07	82.28	82.17	81.99	82.10	82.20	82.09

Cuadro A.1.9. Datos de simulación dinámica para las distintas configuraciones de PCM empleando hidróxido de bario octahidratado, bajo una potencia 1.25 veces TDP.

Tiempo t (s)	Potencia	Temp. máxima del CPU T_max_CPU (°C)					
	del CPU P_CPU (W)	Abajo; menor volumen	Abajo; mayor volumen	CPU; mayor volumen	CPU; menor volumen	Arriba; menor volumen	Arriba; mayor volumen
0	45.0	80.66	80.58	80.35	80.40	80.66	80.55
1	45.0	80.66	80.57	80.35	80.39	80.64	80.54
2	50.6	82.02	81.94	81.68	81.73	82.00	81.89
3	56.3	83.62	83.54	83.23	83.29	83.58	83.46
4	56.3	84.93	84.84	84.48	84.57	84.85	84.73
5	56.3	85.57	85.48	85.09	85.21	85.47	85.33
6	56.3	85.42	85.32	84.93	85.07	85.29	85.14
7	50.6	84.25	84.14	83.78	83.94	84.12	83.95
8	45.0	81.87	81.76	81.47	81.64	81.79	81.60
9	45.0	80.97	80.85	80.61	80.76	80.91	80.71
10	45.0	81.80	81.68	81.44	81.58	81.75	81.55
11	45.0	82.04	81.92	81.68	81.81	82.00	81.79
12	50.6	81.59	81.46	81.24	81.34	81.55	81.33
13	56.3	82.65	82.52	82.28	82.38	82.58	82.37
14	56.3	85.48	85.34	85.06	85.17	85.36	85.15
15	56.3	86.67	86.53	86.26	86.38	86.53	86.33
16	56.3	85.94	85.79	85.59	85.73	85.84	85.63
17	50.6	84.48	84.33	84.17	84.33	84.39	84.17
18	45.0	82.16	82.01	81.88	82.03	82.04	81.81
19	45.0	81.34	81.19	81.06	81.21	81.21	80.97
20	45.0	82.29	82.12	81.97	82.10	82.14	81.90

Cuadro A.1.10. Datos de simulación dinámica para las distintas configuraciones de PCM empleando naftaleno, bajo una potencia 1.25 veces TDP.

Tiempo t (s)	Potencia del CPU P_CPU (W)	Temp. máxima del CPU T_max_CPU (°C)					
		Abajo; menor volumen	Abajo; mayor volumen	CPU; mayor volumen	CPU; menor volumen	Arriba; menor volumen	Arriba; mayor volumen
0	45.0	80.68	80.62	80.38	80.41	80.73	80.70
1	45.0	80.67	80.62	80.37	80.40	80.71	80.68
2	50.6	82.04	81.99	81.72	81.75	82.11	82.06
3	56.3	83.64	83.59	83.29	83.33	83.73	83.67
4	56.3	84.96	84.90	84.58	84.63	85.05	84.99
5	56.3	85.60	85.54	85.20	85.27	85.70	85.63
6	56.3	85.46	85.39	85.05	85.14	85.55	85.48
7	50.6	84.29	84.22	83.90	83.99	84.39	84.32
8	45.0	81.92	81.85	81.57	81.66	82.03	81.98
9	45.0	81.02	80.95	80.69	80.78	81.13	81.09
10	45.0	81.85	81.77	81.51	81.60	81.96	81.90
11	45.0	82.08	82.01	81.74	81.83	82.18	82.14
12	50.6	81.63	81.55	81.29	81.36	81.71	81.70
13	56.3	82.69	82.61	82.34	82.41	82.74	82.74
14	56.3	85.52	85.44	85.14	85.22	85.53	85.52
15	56.3	86.72	86.64	86.33	86.41	86.69	86.65
16	56.3	85.99	85.91	85.61	85.69	85.92	85.87
17	50.6	84.54	84.45	84.18	84.26	84.45	84.40
18	45.0	82.22	82.14	81.91	82.00	82.12	82.11
19	45.0	81.40	81.32	81.10	81.19	81.29	82.18
20	45.0	82.34	82.25	82.01	82.10	82.22	82.31

Cuadro A.1.11. Perfiles de temperatura de las superficies en contacto con el PCM en la configuración alrededor del CPU para un pico sostenido de 1.25 veces TDP.

Tiempo t (s)	Potencia del CPU P_CPU (W)	Temperatura promedio superficial (°C)			
		Propagador de cobre	Propagador de aluminio	Promedio de los pro- pagadores	Substrato del CPU
0	45.0	69.36	67.46	67.89	68.16
1	50.6	69.45	67.47	67.92	68.17
2	56.3	70.36	67.81	68.39	68.25
3	56.3	70.79	68.19	68.79	68.34
4	56.3	71.13	68.54	69.13	68.45
5	56.3	71.43	68.85	69.43	68.57
6	56.3	71.70	69.13	69.72	68.69
7	56.3	71.95	69.39	69.97	68.82
8	56.3	72.17	69.62	70.20	68.95
9	56.3	72.38	69.84	70.42	69.08
10	56.3	72.56	70.04	70.61	69.21
11	56.3	72.73	70.22	70.79	69.34
12	56.3	72.89	70.39	70.96	69.47
13	56.3	73.04	70.54	71.11	69.59
14	56.3	73.17	70.68	71.25	69.71
15	56.3	73.29	70.81	71.38	69.83
16	56.3	73.41	70.94	71.50	69.94
17	56.3	73.52	71.05	71.61	70.06
18	56.3	73.62	71.15	71.71	70.17
19	56.3	73.71	71.25	71.81	70.27
20	56.3	73.79	71.34	71.90	70.37

Cuadro A.1.12. Perfiles de temperatura de las superficies en contacto con el PCM en la configuración bajo el TCU para un pico sostenido de 1.25 veces TDP.

Tiempo t (s)	Potencia del CPU P_CPU (W)	Temperatura promedio superficial (°C)		
		Entre substrato y placa madre	Laterales del soporte del CPU	Inferior del soporte del CPU
0	45.0	68.90	70.79	69.92
1	50.6	68.91	70.79	69.93
2	56.3	69.15	70.98	70.09
3	56.3	69.29	71.33	70.43
4	56.3	69.43	71.66	70.76
5	56.3	69.58	71.97	71.08
6	56.3	69.72	72.27	71.37
7	56.3	69.86	72.54	71.65
8	56.3	70.00	72.80	71.90
9	56.3	70.14	73.04	72.14
10	56.3	70.28	73.27	72.37
11	56.3	70.42	73.48	72.58
12	56.3	70.55	73.68	72.77
13	56.3	70.68	73.87	72.95
14	56.3	70.80	74.04	73.12
15	56.3	70.92	74.20	73.28
16	56.3	71.04	74.36	73.42
17	56.3	71.15	74.50	73.56
18	56.3	71.26	74.63	73.69
19	56.3	71.36	74.76	73.81
20	56.3	71.47	74.87	73.92

Cuadro A.1.13. Perfiles de temperatura de las superficies en contacto con el PCM en la configuración sobre el TCU para un pico sostenido de 1.25 veces TDP.

Tiempo t (s)	Potencia del CPU P_CPU (W)	Temperatura promedio superficial (°C)				
		Propagador de cobre	Laterales de los tubos de calor	Canal del propaga- dor de aluminio	Propagador aluminio fuera del canal	Todas las caras superiores
0	45.0	69.97	64.57	66.53	68.51	67.18
1	50.6	69.99	64.60	66.55	68.52	67.21
2	56.3	70.30	65.10	66.96	68.83	67.62
3	56.3	70.66	65.42	67.35	69.21	67.99
4	56.3	70.99	65.70	67.68	69.57	68.32
5	56.3	71.30	65.95	67.97	69.90	68.62
6	56.3	71.59	66.17	68.24	70.20	68.89
7	56.3	71.86	66.38	68.48	70.47	69.14
8	56.3	72.11	66.56	68.70	70.72	69.37
9	56.3	72.35	66.73	68.91	70.95	69.57
10	56.3	72.57	66.88	69.09	71.16	69.76
11	56.3	72.77	67.02	69.26	71.36	69.94
12	56.3	72.96	67.15	69.41	71.54	70.10
13	56.3	73.13	67.27	69.56	71.70	70.25
14	56.3	73.29	67.39	69.69	71.85	70.38
15	56.3	73.45	67.49	69.81	71.99	70.51
16	56.3	73.59	67.59	69.92	72.12	70.63
17	56.3	73.72	67.67	70.03	72.25	70.74
18	56.3	73.84	67.76	70.13	72.36	70.84
19	56.3	73.96	67.84	70.22	72.46	70.93
20	56.3	74.07	67.91	70.30	72.56	71.02

Cuadro A.1.14. Perfiles de temperatura de las superficies en contacto con el PCM en la configuración alrededor del CPU para un pico sostenido de 1.5 veces TDP.

Tiempo t (s)	Potencia del CPU P_CPU (W)	Temperatura promedio superficial (°C)			
		Propagador de cobre	Propagador de aluminio	Promedio de los pro- pagadores	Substrato del CPU
0	45.0	69.36	67.46	67.89	68.16
1	56.3	69.53	67.48	67.94	68.18
2	67.5	71.37	68.17	68.90	68.35
3	67.5	72.22	68.93	69.68	68.52
4	67.5	72.91	69.62	70.37	68.74
5	67.5	73.51	70.24	70.98	68.98
6	67.5	74.05	70.81	71.55	69.23
7	67.5	74.54	71.32	72.06	69.49
8	67.5	74.99	71.79	72.52	69.75
9	67.5	75.39	72.22	72.95	70.01
10	67.5	75.77	72.62	73.34	70.27
11	67.5	76.11	72.98	73.69	70.52
12	67.5	76.43	73.32	74.03	70.78
13	67.5	76.72	73.63	74.33	71.02
14	67.5	76.98	73.91	74.61	71.27
15	67.5	77.23	74.17	74.87	71.50
16	67.5	77.46	74.42	75.11	71.73
17	67.5	77.68	74.64	75.33	71.96
18	67.5	77.87	74.85	75.54	72.17
19	67.5	78.06	75.05	75.73	72.39
20	67.5	78.23	75.23	75.91	72.59

Cuadro A.1.15. Perfiles de temperatura de las superficies en contacto con el PCM en la configuración bajo el TCU para un pico sostenido de 1.5 veces TDP.

Tiempo t (s)	Potencia del CPU P_CPU (W)	Temperatura promedio superficial (°C)		
		Entre substrato y placa madre	Laterales del soporte del CPU	Inferior del soporte del CPU
0	45.0	68.90	70.79	69.92
1	56.3	68.92	70.79	69.93
2	67.5	69.39	71.16	70.25
3	67.5	69.68	71.87	70.93
4	67.5	69.96	72.53	71.60
5	67.5	70.25	73.16	72.23
6	67.5	70.54	73.74	72.82
7	67.5	70.82	74.29	73.37
8	67.5	71.11	74.81	73.88
9	67.5	71.39	75.29	74.36
10	67.5	71.66	75.75	74.81
11	67.5	71.93	76.17	75.23
12	67.5	72.19	76.57	75.62
13	67.5	72.45	76.94	75.98
14	67.5	72.70	77.29	76.32
15	67.5	72.94	77.62	76.63
16	67.5	73.17	77.92	76.93
17	67.5	73.40	78.21	77.20
18	67.5	73.61	78.47	77.46
19	67.5	73.83	78.72	77.70
20	67.5	74.03	78.95	77.92

Cuadro A.1.16. Perfiles de temperatura de las superficies en contacto con el PCM en la configuración sobre el TCU para un pico sostenido de 1.5 veces TDP.

Tiempo t (s)	Potencia del CPU P_CPU (W)	Temperatura promedio superficial (°C)				
		Propagador de cobre	Laterales de los tubos de calor	Canal del propaga- dor de aluminio	Propagador aluminio fuera del canal	Todas las caras superiores
0	45.0	70.20	64.57	66.53	68.51	67.18
1	56.3	70.49	64.64	66.57	68.52	67.23
2	67.5	72.79	65.62	67.40	69.15	68.06
3	67.5	73.65	66.28	68.16	69.92	68.80
4	67.5	74.33	66.84	68.83	70.63	69.46
5	67.5	74.91	67.34	69.42	71.28	70.06
6	67.5	75.45	67.78	69.96	71.88	70.60
7	67.5	75.93	68.19	70.44	72.43	71.10
8	67.5	76.36	68.55	70.88	72.93	71.55
9	67.5	76.76	68.89	71.28	73.39	71.97
10	67.5	77.13	69.20	71.65	73.82	72.35
11	67.5	77.46	69.48	71.99	74.21	72.70
12	67.5	77.77	69.74	72.30	74.56	73.02
13	67.5	78.06	69.98	72.58	74.90	73.31
14	67.5	78.32	70.20	72.85	75.20	73.59
15	67.5	78.56	70.41	73.09	75.48	73.84
16	67.5	78.79	70.60	73.32	75.74	74.08
17	67.5	78.99	70.78	73.53	75.98	74.29
18	67.5	79.19	70.95	73.72	76.21	74.50
19	67.5	79.37	71.10	73.90	76.42	74.68
20	67.5	79.54	71.25	74.07	76.61	74.86

Cuadro A.1.17. Variación de la temperatura del CPU para diferentes temperaturas de fusión del PCM idóneo en la configuración de mayor volumen alrededor del CPU, bajo una potencia de 1.25 veces TDP; parte 1.

Tiempo t (s)	Potencia	Temp. máxima del CPU T_max_CPU (°C)					
	P_CPU (W)	No PCM	T_fus = 82 °C	T_fus = 80 °C	T_fus = 78 °C	T_fus = 76 °C	T_fus = 74 °C
0.00	45.0	80.32	80.30	80.30	80.30	80.30	80.30
0.25	45.0	80.32	80.30	80.30	80.30	80.30	80.30
0.50	45.0	80.32	80.30	80.30	80.30	80.30	80.30
0.75	45.0	80.32	80.30	80.30	80.30	80.30	80.30
1.00	50.6	81.70	81.66	81.66	81.64	81.63	81.62
1.25	56.3	82.85	83.09	83.08	83.05	83.03	83.01
1.50	56.3	83.80	83.77	83.77	83.74	83.70	83.67
1.75	56.3	83.97	83.87	83.86	83.83	83.78	83.75
2.00	56.3	84.05	83.97	83.97	83.93	83.88	83.84
2.25	56.3	84.15	84.10	84.09	84.06	84.02	83.98
2.50	56.3	84.25	84.23	84.22	84.20	84.16	84.11
2.75	56.3	84.47	84.36	84.35	84.32	84.28	84.24
3.00	56.3	84.58	84.49	84.48	84.45	84.40	84.35
3.25	56.3	84.68	84.58	84.57	84.54	84.49	84.44
3.50	56.3	84.71	84.61	84.60	84.57	84.52	84.46
3.75	56.3	84.78	84.64	84.63	84.60	84.55	84.49
4.00	56.3	84.88	84.75	84.74	84.71	84.66	84.59
4.25	56.3	84.99	84.87	84.86	84.83	84.77	84.70
4.50	56.3	85.08	84.93	84.93	84.89	84.84	84.76
4.75	56.3	85.13	84.96	84.95	84.92	84.86	84.78
5.00	56.3	85.17	85.00	84.99	84.96	84.90	84.81
5.25	56.3	85.26	85.12	85.11	85.08	84.99	84.90
5.50	56.3	85.35	85.23	85.22	85.19	85.08	84.99
5.75	56.3	85.44	85.27	85.25	85.22	85.13	85.03
6.00	56.3	85.45	85.27	85.26	85.22	85.15	85.05

Cuadro A.1.18. Variación de la temperatura del CPU para diferentes temperaturas de fusión del PCM idóneo en la configuración de mayor volumen alrededor del CPU, bajo una potencia de 1.25 veces TDP; parte 2.

Tiempo t (s)	Potencia P_CPU (W)	Temp. máxima del CPU T_max_CPU (°C)					
		No PCM	T_fus = 72 °C	T_fus = 71 °C	T_fus = 70 °C	T_fus = 66 °C	T_fus = 60 °C
0.00	45.0	80.32	80.30	80.30	80.31	80.31	80.31
0.25	45.0	80.32	80.30	80.30	80.30	80.31	80.31
0.50	45.0	80.32	80.30	80.30	80.31	80.31	80.31
0.75	45.0	80.32	80.31	80.31	80.31	80.32	80.32
1.00	50.6	81.70	81.63	81.64	81.64	81.67	81.67
1.25	56.3	82.85	83.02	83.03	83.04	83.09	83.10
1.50	56.3	83.80	83.68	83.69	83.71	83.77	83.78
1.75	56.3	83.97	83.74	83.75	83.77	83.85	83.87
2.00	56.3	84.05	83.82	83.83	83.85	83.93	83.97
2.25	56.3	84.15	83.96	83.96	83.98	84.06	84.10
2.50	56.3	84.25	84.09	84.10	84.11	84.18	84.23
2.75	56.3	84.47	84.21	84.22	84.23	84.31	84.36
3.00	56.3	84.58	84.33	84.33	84.35	84.44	84.49
3.25	56.3	84.68	84.41	84.42	84.43	84.53	84.59
3.50	56.3	84.71	84.43	84.43	84.45	84.56	84.62
3.75	56.3	84.78	84.45	84.45	84.46	84.58	84.65
4.00	56.3	84.88	84.56	84.56	84.57	84.69	84.77
4.25	56.3	84.99	84.67	84.67	84.68	84.81	84.89
4.50	56.3	85.08	84.72	84.72	84.73	84.87	84.96
4.75	56.3	85.13	84.74	84.74	84.75	84.90	84.99
5.00	56.3	85.17	84.77	84.76	84.78	84.93	85.03
5.25	56.3	85.26	84.85	84.85	84.86	85.02	85.12
5.50	56.3	85.35	84.94	84.93	84.94	85.11	85.22
5.75	56.3	85.44	84.97	84.97	84.98	85.15	85.26
6.00	56.3	85.45	85.00	84.99	85.00	85.18	85.29

Cuadro A.1.19. Variación de la temperatura del CPU para diferentes temperaturas de fusión del PCM idóneo en la configuración de menor volumen bajo el TCU, a una potencia de 1.25 veces TDP.

Tiempo t (s)	Potencia P_CPU (W)	Temp. máxima del CPU T_max_CPU (°C)					
		No PCM	T_fus = 75 °C	T_fus = 73 °C	T_fus = 71 °C	T_fus = 69 °C	T_fus = 67 °C
0	45.0	80.32	80.67	80.67	80.67	80.67	80.67
1	50.6	81.10	81.44	81.44	81.44	81.44	81.44
2	56.3	84.00	84.39	84.39	84.39	84.40	84.40
3	56.3	84.50	84.83	84.84	84.84	84.86	84.86
4	56.3	84.87	85.17	85.17	85.19	85.21	85.22
5	56.3	85.17	85.45	85.45	85.47	85.50	85.51
6	56.3	85.44	85.70	85.70	85.72	85.76	85.78
7	56.3	85.69	85.92	85.92	85.94	85.99	86.01
8	56.3	85.92	86.12	86.11	86.14	86.19	86.22
9	56.3	86.12	86.30	86.29	86.33	86.38	86.42
10	56.3	86.31	86.46	86.45	86.49	86.56	86.60
11	56.3	86.48	86.61	86.60	86.65	86.71	86.76
12	56.3	86.63	86.75	86.74	86.79	86.86	86.92
13	56.3	86.78	86.88	86.86	86.92	86.99	87.06
14	56.3	86.91	86.99	86.98	87.04	87.12	87.19
15	56.3	87.04	87.10	87.08	87.14	87.23	87.31
16	56.3	87.15	87.20	87.18	87.25	87.34	87.42
17	56.3	87.26	87.29	87.27	87.34	87.44	87.52
18	56.3	87.36	87.38	87.36	87.43	87.54	87.62
19	56.3	87.45	87.46	87.44	87.52	87.62	87.71
20	56.3	87.54	87.53	87.51	87.59	87.70	87.79

Cuadro A.1.20. Variación de la temperatura del CPU para diferentes temperaturas de fusión del PCM idóneo en la configuración de menor volumen sobre el TCU, a una potencia de 1.25 veces TDP.

Tiempo t (s)	Potencia P_CPU (W)	Temp. máxima del CPU T_max_CPU (°C)					
		No PCM	T_fus = 73 °C	T_fus = 71 °C	T_fus = 69 °C	T_fus = 67 °C	T_fus = 65 °C
0	45.0	80.32	80.62	80.62	80.62	80.62	80.62
1	50.6	81.10	81.30	81.28	81.32	81.36	81.31
2	56.3	84.00	84.16	84.11	84.11	84.21	84.24
3	56.3	84.50	84.79	84.64	84.69	84.89	84.76
4	56.3	84.87	85.05	84.91	84.90	85.11	85.13
5	56.3	85.17	85.21	85.17	85.14	85.36	85.47
6	56.3	85.44	85.36	85.47	85.16	85.70	85.78
7	56.3	85.69	85.55	85.46	85.34	85.75	85.74
8	56.3	85.92	85.79	85.52	85.58	86.01	85.68
9	56.3	86.12	85.76	85.83	85.72	86.09	86.11
10	56.3	86.31	86.00	85.79	85.71	86.38	86.43
11	56.3	86.48	86.10	85.97	85.96	86.17	86.38
12	56.3	86.63	86.33	86.20	86.06	86.28	86.24
13	56.3	86.78	86.22	86.37	86.23	86.24	86.27
14	56.3	86.91	86.41	86.26	86.26	86.28	86.61
15	56.3	87.04	86.47	86.37	86.35	86.55	86.82
16	56.3	87.15	86.68	86.36	86.36	86.55	86.74
17	56.3	87.26	86.66	86.55	86.54	86.62	86.78
18	56.3	87.36	86.73	86.50	86.63	86.58	86.90
19	56.3	87.45	86.77	86.92	86.56	86.71	87.10
20	56.3	87.54	87.05	86.77	86.72	86.71	87.33

Cuadro A.1.21. Variación de la temperatura del CPU para diferentes temperaturas de fusión del PCM idóneo en la configuración de mayor volumen alrededor del CPU, a una potencia de 1.5 veces TDP.

Tiempo t (s)	P_ CPU (W)	Temp. máxima del CPU T_max_CPU (°C)								
		No PCM	T_fus = 65 °C	T_fus = 70 °C	T_fus = 72 °C	T_fus = 74 °C	T_fus = 76 °C	T_fus = 78 °C	T_fus = 80 °C	T_fus = 82 °C
0	45.0	80.32	80.30	80.30	80.30	80.30	80.30	80.3	80.3	80.3
1	56.3	81.87	81.81	81.80	81.79	81.78	81.78	81.8	81.81	81.81
2	67.5	87.68	87.57	87.41	87.37	87.38	87.43	87.49	87.56	87.59
3	67.5	88.67	88.43	88.21	88.17	88.20	88.28	88.37	88.43	88.47
4	67.5	89.41	89.08	88.80	88.77	88.82	88.93	89.03	89.1	89.15
5	67.5	90.03	89.63	89.28	89.25	89.32	89.46	89.58	89.66	89.71
6	67.5	90.57	90.09	89.68	89.65	89.74	89.91	90.05	90.14	90.19
7	67.5	91.06	90.52	90.04	90.01	90.12	90.31	90.47	90.57	90.63
8	67.5	91.51	90.93	90.39	90.36	90.48	90.69	90.87	90.99	91.05
9	67.5	91.92	91.29	90.69	90.65	90.78	91.01	91.21	91.34	91.41
10	67.5	92.29	91.63	90.97	90.93	91.07	91.32	91.53	91.68	91.76

Cuadro A.1.22. Variación de la temperatura del CPU con respecto a la conductividad térmica y el calor específico del PCM.

Tiempo t (s)	Potencia P_CPU (W)	Temp. máxima del CPU T_max_CPU (°C)					
		No PCM	Idóneo; T_fus = 71 °C	k_PCM × 10	k_PCM × 50	Cp_ PCM × 1.5	Cp_ PCM × 2
0	45.0	80.32	80.30	80.23	80.08	80.30	80.30
1	50.6	81.10	81.06	80.99	80.82	81.06	81.06
2	56.3	84.00	83.84	83.61	83.36	83.83	83.83
3	56.3	84.50	84.22	83.97	83.74	84.22	84.22
4	56.3	84.87	84.51	84.24	84.03	84.51	84.50
5	56.3	85.17	84.76	84.48	84.26	84.75	84.74
6	56.3	85.44	84.95	84.67	84.45	84.94	84.94
7	56.3	85.69	85.13	84.83	84.62	85.12	85.11
8	56.3	85.92	85.30	85.01	84.79	85.29	85.28
9	56.3	86.12	85.44	85.15	84.93	85.43	85.42
10	56.3	86.31	85.58	85.29	85.07	85.57	85.55
11	56.3	86.48	85.72	85.43	85.21	85.70	85.69
12	56.3	86.63	85.83	85.54	85.33	85.81	85.80
13	56.3	86.78	85.94	85.66	85.44	85.93	85.91
14	56.3	86.91	86.05	85.78	85.56	86.04	86.02
15	56.3	87.04	86.15	85.88	85.66	86.13	86.12
16	56.3	87.15	86.24	85.98	85.76	86.22	86.21
17	56.3	87.26	86.34	86.09	85.87	86.32	86.31
18	56.3	87.36	86.42	86.18	85.96	86.40	86.39
19	56.3	87.45	86.50	86.27	86.05	86.48	86.47
20	56.3	87.54	86.58	86.36	86.14	86.57	86.55

Cuadro A.1.23. Variación de la temperatura del CPU con respecto a la densidad y la entalpía de fusión del PCM.

Tiempo t (s)	Potencia	Temp. máxima del CPU T_max_CPU (°C)					
	P_CPU (W)	No PCM	Idóneo; T_fus = 71 °C	rho_ PCM × 1.5	rho_ PCM × 2	DH_fus × 1.5	DH_fus × 2
0	45.0	80.32	80.30	80.30	80.30	80.30	80.30
1	50.6	81.10	81.06	81.06	81.05	81.06	81.06
2	56.3	84.00	83.84	83.80	83.76	83.80	83.77
3	56.3	84.50	84.22	84.18	84.14	84.18	84.15
4	56.3	84.87	84.51	84.45	84.41	84.46	84.42
5	56.3	85.17	84.76	84.69	84.64	84.69	84.64
6	56.3	85.44	84.95	84.87	84.81	84.88	84.82
7	56.3	85.69	85.13	85.03	84.97	85.04	84.98
8	56.3	85.92	85.30	85.20	85.12	85.21	85.13
9	56.3	86.12	85.44	85.33	85.25	85.34	85.26
10	56.3	86.31	85.58	85.45	85.36	85.46	85.38
11	56.3	86.48	85.72	85.58	85.48	85.59	85.50
12	56.3	86.63	85.83	85.68	85.58	85.69	85.59
13	56.3	86.78	85.94	85.79	85.67	85.80	85.69
14	56.3	86.91	86.05	85.89	85.77	85.90	85.79
15	56.3	87.04	86.15	85.98	85.85	85.99	85.87
16	56.3	87.15	86.24	86.06	85.93	86.07	85.95
17	56.3	87.26	86.34	86.15	86.01	86.16	86.03
18	56.3	87.36	86.42	86.22	86.08	86.24	86.10
19	56.3	87.45	86.50	86.30	86.15	86.31	86.17
20	56.3	87.54	86.58	86.38	86.22	86.39	86.24

Cuadro A.1.24. Variación de la temperatura del CPU con respecto a la magnitud del intervalo de transición de fase y la temperatura de fusión media del PCM.

Tiempo t (s)	Potencia P_CPU (W)	Temp. máxima del CPU T_max_CPU (°C)					
		No PCM	Idóneo; T_fus = 71 °C	DT_fus = 6 K; T_fus = 69 °C	DT_fus = 14 K; T_fus = 73 °C	DT_fus = 6 K; T_fus = 71 °C	DT_fus = 14 K; T_fus = 71 °C
0	45.0	80.32	80.30	80.30	80.30	80.30	80.30
1	50.6	81.10	81.06	81.07	81.06	81.06	81.06
2	56.3	84.00	83.84	83.88	83.84	83.84	83.84
3	56.3	84.50	84.22	84.27	84.23	84.23	84.23
4	56.3	84.87	84.51	84.56	84.53	84.51	84.52
5	56.3	85.17	84.76	84.81	84.79	84.76	84.77
6	56.3	85.44	84.95	85.01	84.99	84.95	84.97
7	56.3	85.69	85.13	85.19	85.18	85.12	85.14
8	56.3	85.92	85.30	85.37	85.36	85.29	85.32
9	56.3	86.12	85.44	85.52	85.51	85.43	85.47
10	56.3	86.31	85.58	85.66	85.65	85.56	85.61
11	56.3	86.48	85.72	85.80	85.80	85.70	85.75
12	56.3	86.63	85.83	85.92	85.92	85.80	85.86
13	56.3	86.78	85.94	86.04	86.04	85.91	85.98
14	56.3	86.91	86.05	86.15	86.16	86.02	86.10
15	56.3	87.04	86.15	86.26	86.26	86.11	86.20
16	56.3	87.15	86.24	86.36	86.35	86.20	86.29
17	56.3	87.26	86.34	86.46	86.46	86.30	86.39
18	56.3	87.36	86.42	86.55	86.54	86.38	86.48
19	56.3	87.45	86.50	86.64	86.62	86.46	86.56
20	56.3	87.54	86.58	86.73	86.71	86.54	86.65

Cuadro A.1.25. Temperatura del CPU para el PCM idóneo y el ácido esteárico para la configuración de mayor volumen alrededor del CPU, bajo una potencia de 1.25 veces TDP.

Tiempo t (s)	Potencia P_CPU (W)	Temp. máxima del CPU T_max_CPU (°C)		
		No PCM	Idóneo; T_fus = 71 °C	Ácido Esteárico
0	45.0	80.32	80.30	80.32
1	50.6	81.10	81.06	81.04
2	56.3	84.00	83.84	83.89
3	56.3	84.50	84.22	84.35
4	56.3	84.87	84.51	84.67
5	56.3	85.17	84.76	84.92
6	56.3	85.44	84.95	85.15
7	56.3	85.69	85.13	85.36
8	56.3	85.92	85.30	85.54
9	56.3	86.12	85.44	85.71
10	56.3	86.31	85.58	85.87

A.2. Muestra de cálculo

A.2.1. Cálculo del flujo de aire en los disipadores de calor

$$Q_{left} = Flow_{air} \times 0,056067 \frac{\text{m}^3}{\text{ft}^3} \times \frac{RPM_{left}}{RPM_{left} + RPM_{right}} \quad (\text{C.1})$$

Donde:

Q_{left} : flujo de aire en el disipador izquierdo, m^3/min

$Flow_{air}$: flujo de aire en el sistema, ACFM

RPM_{left} : velocidad del ventilador izquierdo, min^{-1}

RPM_{right} : velocidad del ventilador derecho, min^{-1}

Empleando los datos proporcionado por Intel de Costa Rica (2018):

$$Q_{left} = 1,98 \times 0,056067 \frac{\text{m}^3}{\text{ft}^3} \times \frac{2961,6}{2961,6 + 2490,6} = 0,0305 \text{ m}^3/\text{min}$$

De forma homologa y cambiando el factor de velocidades de los ventiladores se calcula el flujo a través del disipador derecho, $Q_{right} = 0,0256 \text{ m}^3/\text{min}$.

A.2.2. Cálculo de la velocidad del aire en los disipadores de calor

$$V_{left} = \frac{Q_{left}}{A_T} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \quad (\text{C.2})$$

Donde:

V_{left} : velocidad del aire en el disipador izquierdo, m/s

A_T : área transversal del bloque de aire, $4,14 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

Empleando los resultados anteriores:

$$V_{left} = \frac{0,0305}{4,14 \times 10^{-4}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 1,226 \text{ m/s}$$

De forma homologa se calcula la velocidad del aire en el disipador derecho, $V_{right} = 1,031 \text{ m/s}$.

A.2.3. Aproximación del coeficiente convectivo de transferencia de calor

$$h = \frac{q_{out}}{A_{fins} \times (T_{fins} - T_{air})} \quad (C.3)$$

Donde:

h : coeficiente convectivo de transferencia de calor, $\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$

q_{out} : calor que sale a través del disipador, W

A_{fins} : área de contacto entre las aletas y el fluido, m^2

T_{fins} : temperatura promedio del disipador, $^{\circ}\text{C}$

T_{air} : temperatura de entrada del aire, $^{\circ}\text{C}$

Empleando los resultados para el disipador izquierdo del modelo con simulación del flujo de aire con los parámetros del modelo final y un factor de velocidad $x_vel = 21$ que aseguren un estado cercano al válido:

$$h_{left} = \frac{37,35 \text{ W}}{0,0156 \text{ m}^2 \times (60,5 \text{ }^{\circ}\text{C} - 38,4 \text{ }^{\circ}\text{C})} = 108 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$$

De igual forma se calcula para el disipador derecho:

$$h_{right} = \frac{26,25 \text{ W}}{0,0156 \text{ m}^2 \times (53,3 \text{ }^{\circ}\text{C} - 35,8 \text{ }^{\circ}\text{C})} = 96 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$$

Bibliografía

- Alawadhi, E. M. y Amon, C. H. (2003). PCM thermal control unit for portable electronic devices: experimental and numerical studies. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 26(1):116–125.
- Baby, R. y Balaji, C. (2012). Experimental investigations on phase change material based finned heat sinks for electronic equipment cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(5):1642–1649.
- Clements, A. (2006). *Principles of Computer Hardware*. Oxford University Press, Inc., 4 edición.
- COMSOL (2015a). *COMSOL Multiphysics 5.1 Reference Manual*.
- COMSOL (2015b). *Introduction to COMSOL Multiphysics*.
- Dincer, I. y Rosen, M. (2010). *Thermal Energy Storage: Systems and Applications, Second Edition*. John Wiley & Sons, Inc.
- Fok, S. C., Shen, W., y Tan, F. L. (2010). Cooling of portable hand-held electronic devices using phase change materials in finned heat sinks. *International Journal of Thermal Sciences*, 49(1):109–117.
- Fukahori, R., Nomura, T., Zhu, C., Sheng, N., Okinaka, N., y Akiyama, T. (2016). Macro-encapsulation of metallic phase change material using cylindrical-type ceramic

- containers for high-temperature thermal energy storage. *Applied Energy*, 170:324–328.
- Gharbi, S., Harmand, S., y Jabrallah, S. B. (2015). Experimental comparison between different configurations of PCM based heat sinks for cooling electronic components. *Applied Thermal Engineering*, 87:454–462.
- Intel (2015). *From sand to circuits*. Obtenido de: http://download.intel.com/pressroom/kits/45nm/SandToCircuit_FINAL.pdf.
- Intel (2016). *6th Generations Intel Processor Families for H-Platforms*. Obtenido de: <https://www.intel.com/content/www/us/en/design/products-and-solutions/processors-and-chipsets/skylake-h/technical-library.html?grouping=rdc%20Content%20Types&sort=title:asc>.
- Intel de Costa Rica (2018). *Información del sistema de cómputo*.
- Intel de Costa Rica (2019). *Reunión con el departamento de Diseño de Sistemas Termomecánicos*. Fecha: 12/08/2019.
- Kandasamy, R., Wang, X.-Q., y Mujumdar, A. S. (2008). Transient cooling of electronics using phase change material (PCM)-based heat sinks. *Applied Thermal Engineering*, 28(8):1047–1057.
- Karaipekli, A., Sari, A., y Kaygusuz, K. (2007). Thermal conductivity improvement of stearic acid using expanded graphite and carbon fiber for energy storage applications. *Renewable Energy*, 32(13):2201–2210.
- Lane, D. G. A. (1980). Low temperature heat storage with phase change materials. *International Journal of Ambient Energy*, 1(3):155–168.

- Lo, D. y Kozyrakis, C. (2014). Dynamic management of TurboMode in modern multi-core chips. En *2014 IEEE 20th International Symposium on High Performance Computer Architecture (HPCA)*, pp. 603–613.
- Luo, J.-F., Yin, H.-W., Li, W.-Y., Xu, Z.-J., Shao, Z.-Z., Xu, X.-J., y Chang, S.-L. (2015). Numerical and experimental study on the heat transfer properties of the composite paraffin/expanded graphite phase change material. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 84:237–244.
- McGovern, S. M. y Gupta, S. M. (2011). Analytical methodologies. En *Disassembly Line: Balancing and Modeling*. McGraw Hill Professional, Access Engineering.
- Mesalhy, O., Lafdi, K., Elgafy, A., y Bowman, K. (2005). Numerical study for enhancing the thermal conductivity of phase change material (PCM) storage using high thermal conductivity porous matrix. *Energy Conversion and Management*, 46(6):847–867.
- Nvidia (2016). *GeForce GTX 1060 Specifications*. Obtenido de: <https://www.geforce.com/hardware/desktop-gpus/geforce-gtx-1060/specifications>.
- Paksoy, H. O. (2007). *Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption: Fundamentals, Case Studies and Design (NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry)*. Springer, 1 edición.
- Reddy, J. N. (1984a). Background. En *Introduction to the Finite Element Method, Fourth Edition*. McGraw Hill Professional, Access Engineering.
- Reddy, J. N. (1984b). The finite element method. En *Introduction to the Finite Element Method, Fourth Edition*. McGraw Hill Professional, Access Engineering.
- Sahoo, S., Das, M., y Rath, P. (2016). Application of TCE-PCM based heat sinks for cooling of electronic components: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59:550–582.

- Sari, A., Bicer, A., y Karaipekli, A. (2009). Synthesis, characterization, thermal properties of a series of stearic acid esters as novel solid-liquid phase change materials. *Materials Letters - MATER LETT*, 63:1213–1216.
- Sarier, N. y Onder, E. (2012). Organic phase change materials and their textile applications: An overview. *Thermochimica Acta*, 540:7–60.
- Sarvar, F., Poole, N. J., y Witting, P. A. (1990). PCB glass-fibre laminates: Thermal conductivity measurements and their effect on simulation. *Journal of Electronic Materials*, 19(12):1345–1350.
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., y Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2):318–345.
- Shin-Etsu MicroSi (2014). *Thermal Grease X23-7783D*. Obtenido de: <https://www.microsi.com/product/x23-7783d/>.
- Sigma-Aldrich (2019a). *Ammonium bromide Safety Data Sheet*. <https://www.sigmaaldrich.com/MSDS/MSDS/DisplayMSDSPage.do?country=CR&language=en&productNumber=380008&brand=ALDRICH&PageToGoToURL=https%3A%2F%2Fwww.sigmaaldrich.com%2Fcatalog%2Fproduct%2Faldrich%2F380008%3Flang%3Den>.
- Sigma-Aldrich (2019b). *Naphthalene Safety Data Sheet*. <https://www.sigmaaldrich.com/MSDS/MSDS/DisplayMSDSPage.do?country=CR&language=en&productNumber=147141&brand=ALDRICH&PageToGoToURL=https%3A%2F%2Fwww.sigmaaldrich.com%2Fcatalog%2Fproduct%2Faldrich%2F147141%3Flang%3Den>.
- Sigma-Aldrich (2019c). *Urea Safety Data Sheet*. http://www.merckmillipore.com/GT/es/product/msds/MDA_CHEM-108484?Origin=PDP.

- Stockwell Elastomerics (2011). *Gap Pad 1500 Technical Data Sheet*. Obtenido de: <https://www.stockwell.com/data-sheets/thermal-bq-gap-pad-1500.pdf>.
- Tan, F. L. y Tso, C. P. (2004). Cooling of mobile electronic devices using phase change materials. *Applied Thermal Engineering*, 24(2):159–169.
- Tummala, R. R. (2001). FUNDAMENTALS OF THERMAL MANAGEMENT. En *Fundamentals of Microsystems Packaging*. McGraw Hill Professional, Access Engineering.
- Tummala, R. R. (2008). Thermal SOP. En *System on Package: Miniaturization of the Entire System*. McGraw Hill Professional, Access Engineering.
- Wang, Q., Wang, J., Chen, Y., y Zhao, C. Y. (2019). Experimental investigation of barium hydroxide octahydrate as latent heat storage materials. *Solar Energy*, 177:99–107.
- Wang, Y.-H. y Yang, Y.-T. (2011). Three-dimensional transient cooling simulations of a portable electronic device using PCM (phase change materials) in multi-fin heat sink. *Energy*, 36(8):5214–5224.
- Weng, Y.-C., Cho, H.-P., Chang, C.-C., y Chen, S.-L. (2011). Heat pipe with PCM for electronic cooling. *Applied Energy*, 88(5):1825–1833.
- Wilcox, D. (2006). *Turbulence Modeling for CFD*. DCW Industries, 3ra edición.
- Yang, Y.-T. y Wang, Y.-H. (2012). Numerical simulation of three-dimensional transient cooling application on a portable electronic device using phase change material. *International Journal of Thermal Sciences*, 51:155–162.
- Yeh, L. T. (1995). Review of heat transfer technologies in electronic equipment. *Journal of Electronic Packaging*, 117(4):333–339.

- Yoo, D.-w. y Joshi, Y. K. (2004). Energy efficient thermal management of electronic components using solid-liquid phase change materials. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 4(4):641–649.
- Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., y Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23(3):251–283.
- Zohuri, B. (2011). *Heat Pipe Design and Technology: A Practical Approach*. CRC Press, 1ra edición.

Anexos

Información brindada por Intel de Costa Rica

Información estructural

Cuadro 1. Características del sistema elegido (Intel de Costa Rica, 2018).

Fabricante	Razer
Tamaño de la pantalla	14 pulgadas
Sistema Operativo	Windows 10 (64 bit)
CPU	Intel Core i7-6700HQ
Frecuencia Base	2.6 GHz
GPU	NVIDIA GeForce GTX 1060

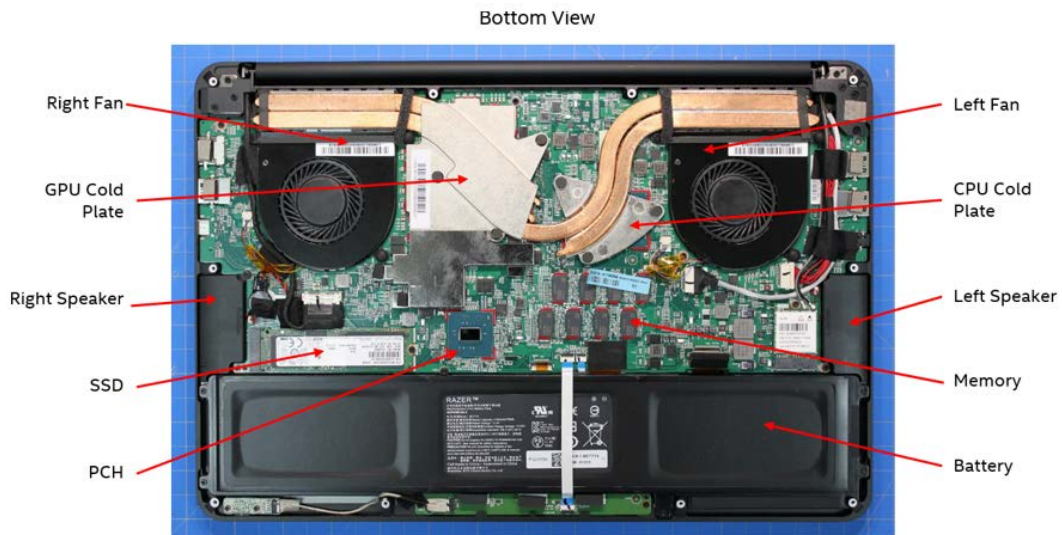


Figura 1. Sección inferior expuesta de la computadora portátil elegida (Intel de Costa Rica, 2018).

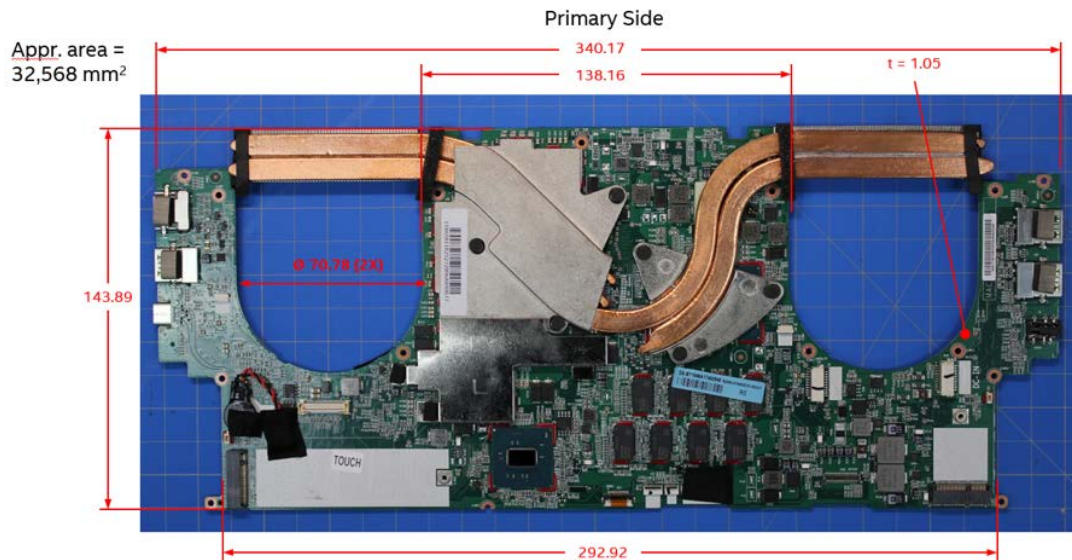
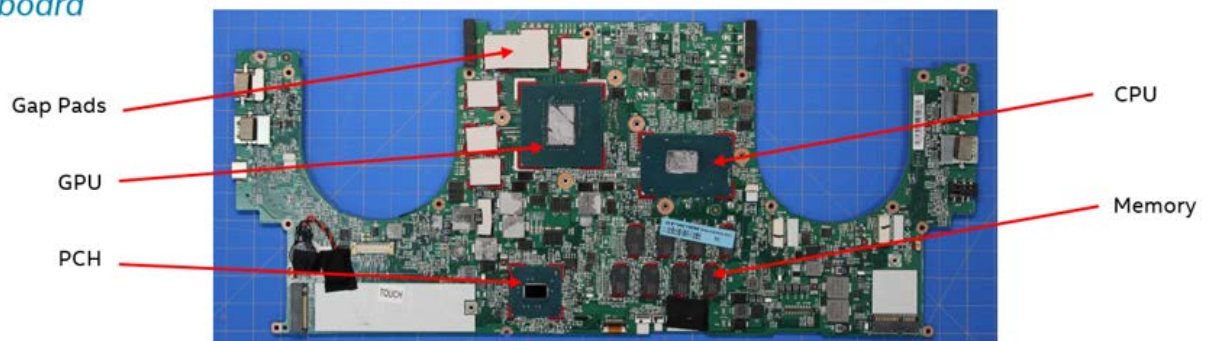


Figura 2. Dimensiones (mm) en los ejes x y y de la tarjeta madre (Intel de Costa Rica, 2018).

doara



Componentes de la tarjeta madre sin la unidad de control térmica (Intel de Costa Rica, 2018).

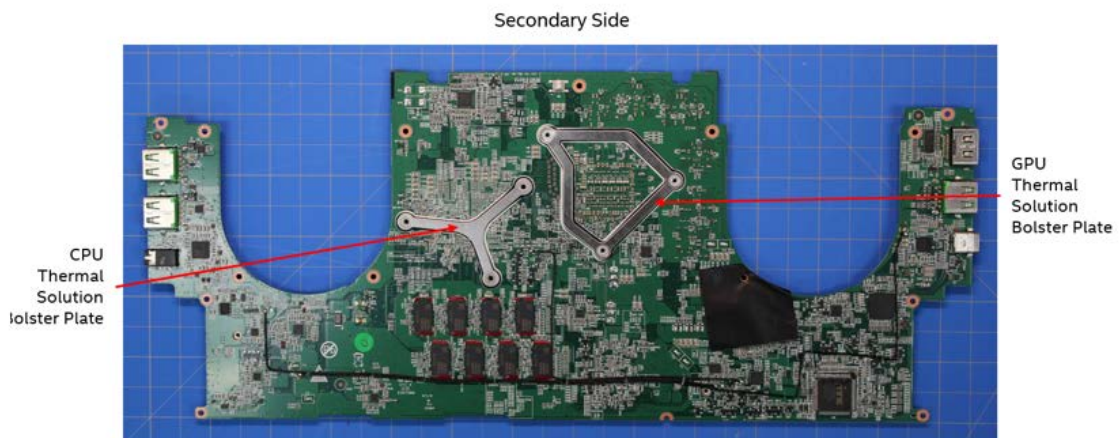


Figura 3. Componentes de la parte superior de la tarjeta madre (Intel de Costa Rica, 2018).

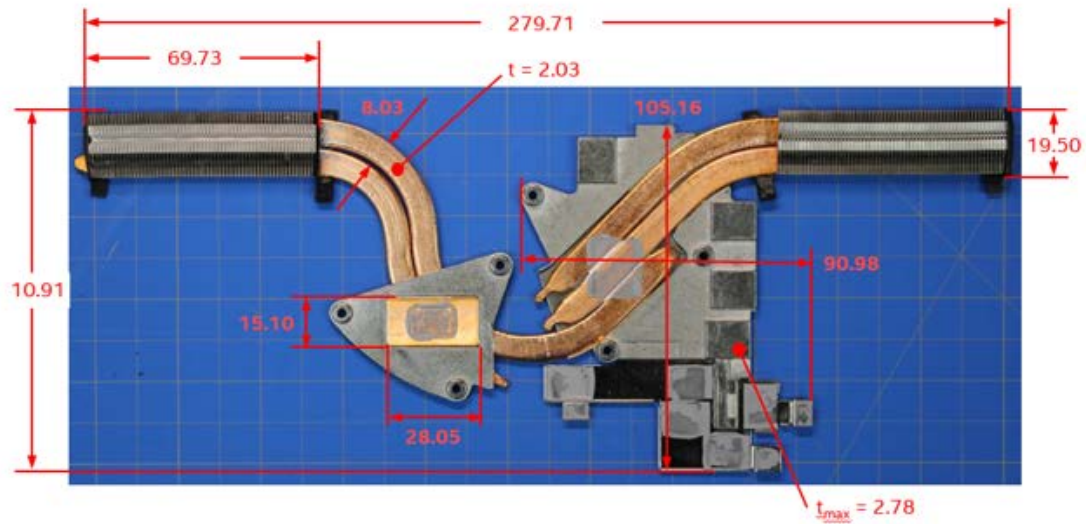


Figura 4. Dimensiones (mm) en los ejes x y y de la unidad de control térmico (Intel de Costa Rica, 2018).

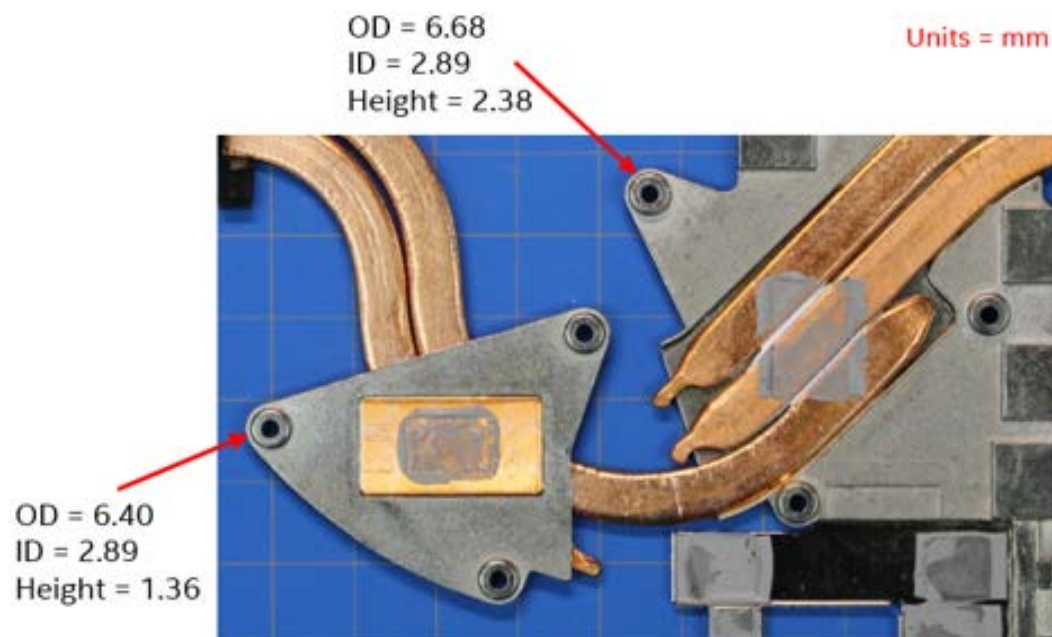


Figura 5. Dimensiones (mm) en los ejes x y y del propagador de calor (Intel de Costa Rica, 2018).



Figura 6. Dimensiones (mm) en los ejes x y z de las aletas (Intel de Costa Rica, 2018).

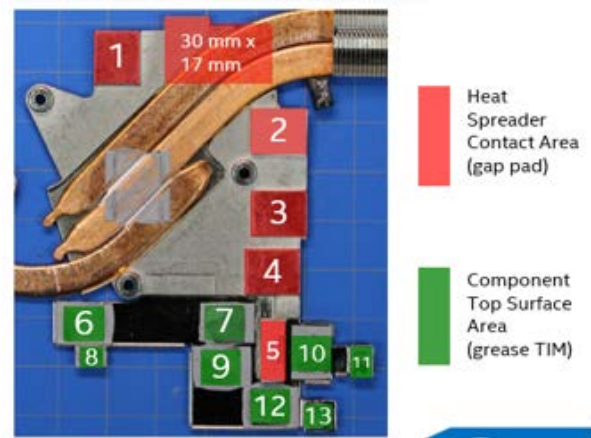


Figura 7. Dimensiones (mm) en los ejes x y y de los chips cerca del GPU (Intel de Costa Rica, 2018).

Cuadro 2. Dimensiones de los chips de la Figura 7 (Intel de Costa Rica, 2018).

Enumerador	Longitud en eje y (mm)	Longitud en eje x (mm)
1	14.09	12.04
2	11.96	14.00
3	12.09	14.02
4	12.00	14.01
5	16.15	6.11
6	10.12	10.12
7	10.12	10.12
8	4.98	5.83
9	10.12	10.12
10	10.12	10.12
11	6.30	5.00
12	10.12	10.12
13	6.08	6.08

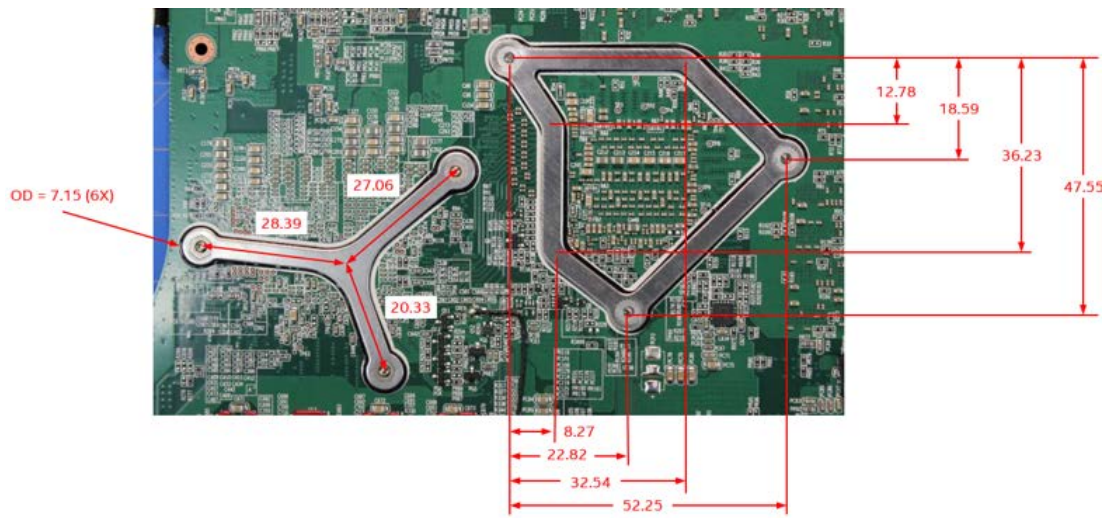


Figura 8. Dimensiones (mm) en los ejes x y y del soporte de los procesadores (Intel de Costa Rica, 2018).

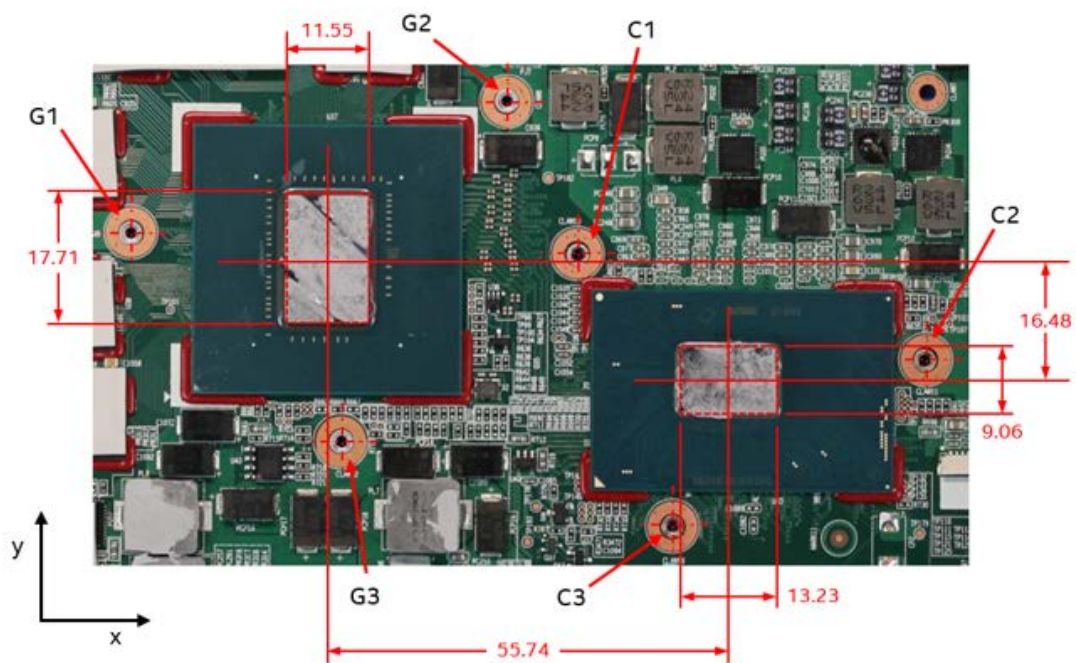


Figura 9. Dimensiones (mm) en los ejes x y y de los procesadores (Intel de Costa Rica, 2018).

Cuadro 3. Coordenadas para los puntos especificados en la Figura 9 (Intel de Costa Rica, 2018).

Punto	Coordenada en el eje x (mm)	Coordenada en el eje y (mm)	Diámetro interno (mm)	Diámetro externo (mm)
G1	-27.34	3.64	1.58	3.23
G2	24.91	22.23	1.60	3.23
G3	2.09	-25.32	1.59	3.24
C1	-20.87	17.32	1.71	3.14
C2	27.45	2.91	1.69	3.08
C3	-7.48	-20.42	1.66	3.30

Nota: El centroide de cada eje coincide con el centroide de área de cada procesador.

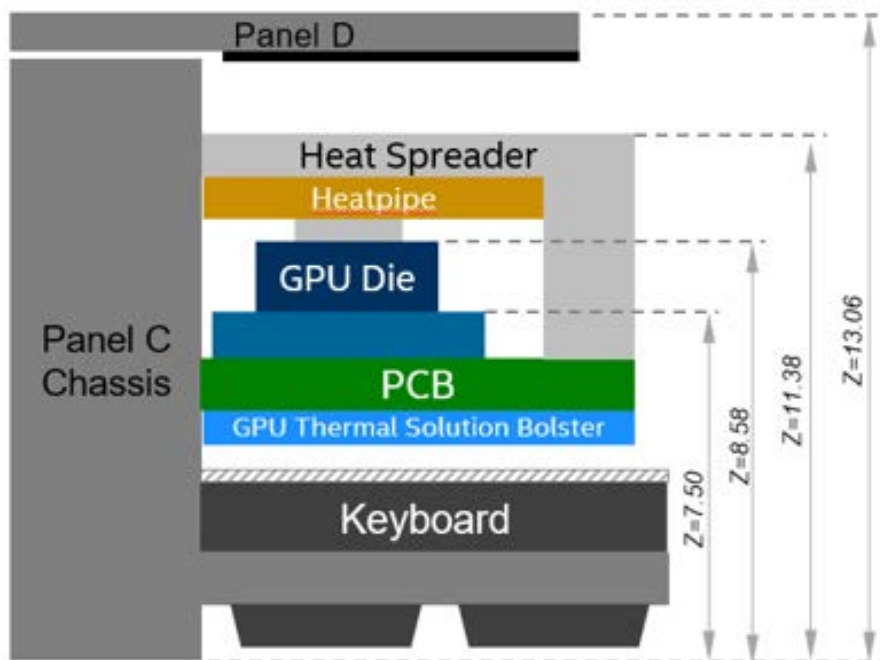


Figura 10. Dimensiones (mm) en el eje z del sistema cerca al GPU (Intel de Costa Rica, 2018).

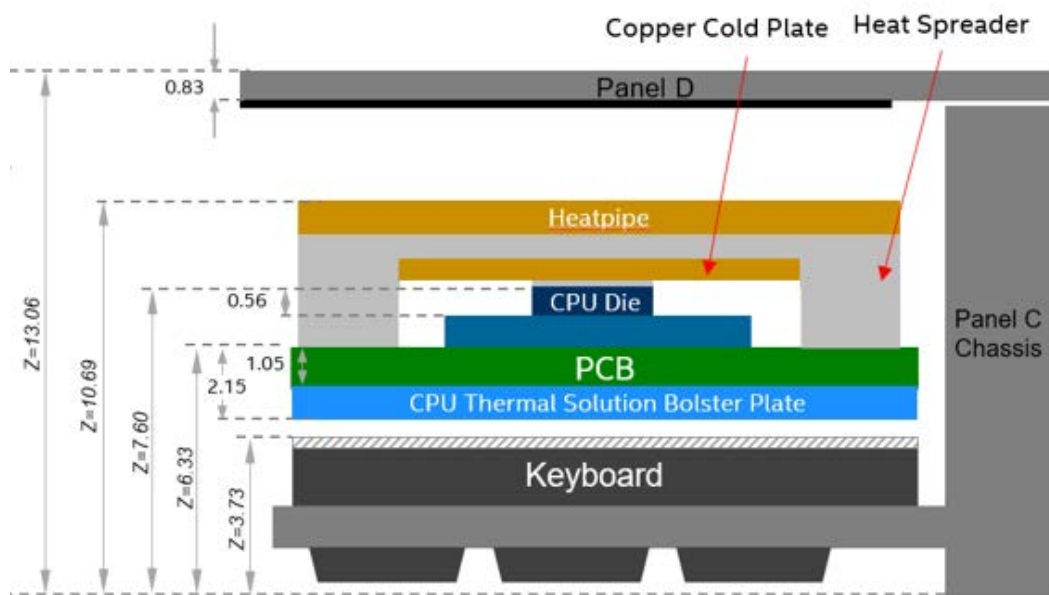


Figura 11. Dimensiones (mm) en el eje z del sistema cerca al CPU (Intel de Costa Rica, 2018).

Información térmica

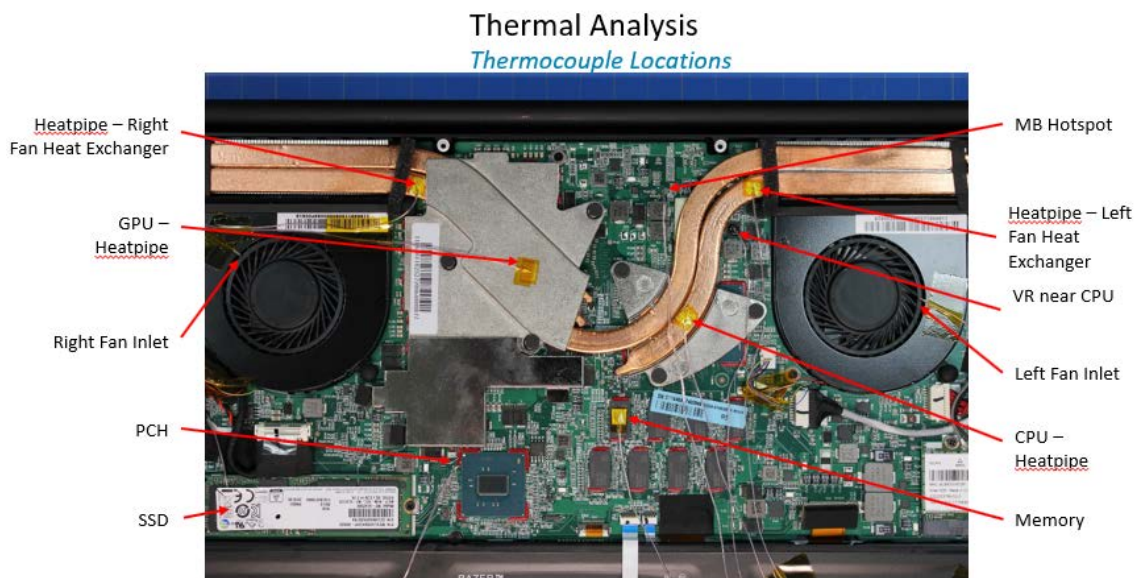


Figura 12. Localización de las termocuplas en la parte inferior interna el sistema (Intel de Costa Rica, 2018).

Cuadro 4. Temperatura de los puntos de interés en estado estacionario en potencia TDP; datos en grados Celsius normalizados con respecto a su media (Intel de Costa Rica, 2018).

Posición de la termocupla	Valor normal
Left Fan Inlet	0.70
Right Fan Inlet	0.65
Left Exhaust	0.90
Right Exhaust	0.91
SSD	0.81
PCH	0.96
MB Hotspot	1.31
Heatpipe - Right Fan Heat Exchanger	1.04
GPU - Heatpipe	1.05
Memory	1.01
Heatpipe - Left Fan Heat Exchanger	1.13
CPU - Heatpipe	1.16
VR near CPU	1.37

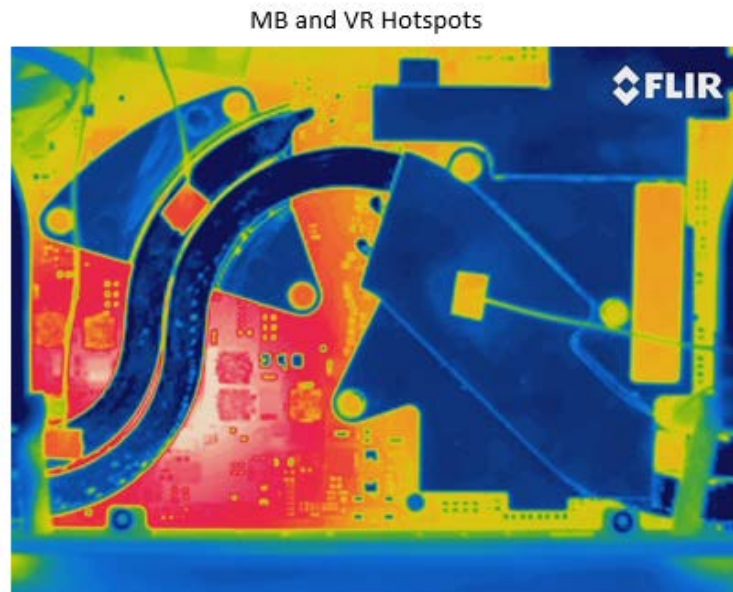


Figura 13. Imagen infrarroja de los puntos calientes en el sistema cerca del ventilador izquierdo (Intel de Costa Rica, 2018).

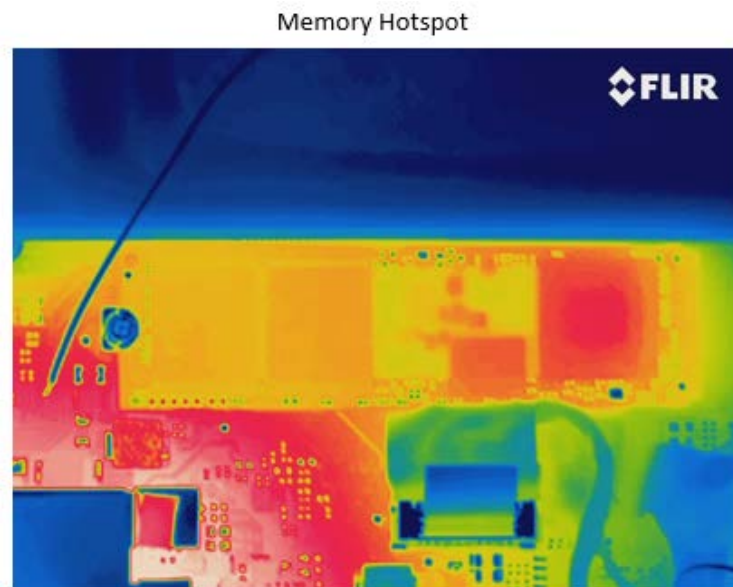


Figura 14. Imagen infrarroja de los puntos calientes en el sistema cerca de la memoria RAM (Intel de Costa Rica, 2018).

Información del sistema de ventiladores

Cuadro 5. Información del sistema de ventiladores para el sistema en condición de TDP (Intel de Costa Rica, 2018).

Variable	Valor
Velocidad del ventilador izquierdo	2961.6 min ⁻¹
Velocidad del ventilador derecho	2490.6 min ⁻¹
Presión diferencial LFE	1.931 IWG
Presión absoluta	29.963 in Hg
Temperatura ambiental	74.0 °F
Presión barométrica	29.89 in Hg
Temperatura de bulbo húmedo	53.0 °F
Temperatura de bulbo seco	73.0 °F
Flujo de aire	1.98 ACFM