MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE TÉRMICA DE UM MICROPROCESSADOR DE ALTA PERFORMANCE VIA MÉTODO NUMÉRICO

por

Marcelo Ordakowski Schuh

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, dezembro de 2017

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE TÉRMICA DE UM MICROPROCESSADOR DE ALTA PERFORMANCE VIA MÉTODO NUMÉRICO

por

Marcelo Ordakowski Schuh

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Profa. Dra. Thamy Cristina Hayashi
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Ciências Térmicas**

Orientador: Profa. Dra. Letícia Jenisch Rodrigues

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Sérgio Luiz Frey

M.Eng. Guilherme Crivelli Fraga

Profa. Dra. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 19 de dezembro de 2017.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus familiares, principalmente meus pais, Mirian Ordakowski e Mauri Inácio Schuh, e às minhas irmãs, Letícia e Luciana, pelo apoio dado ao longo do curso.

Agradeço aos meus professores, em especial à minha orientadora Letícia Jenisch Rodrigues, pelo ensino de excelência.

Agradeço a minha namorada pelo suporte durante a realização desse trabalho, e aos amigos e colegas que me incentivaram no decorrer do curso.

SCHUH, M. O. **Caracterização e Análise Térmica de um Microprocessador de Alta Performance via Método Numérico**. 2017. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

RESUMO

Este trabalho propõe uma análise térmica de um microprocessador de alta performance, a fim de avaliar a eficiência térmica de variadas configurações de construção física através de simulações computacionais em volumes finitos. Devido ao avanço da tecnologia, a quantidade de transistores acomodadas em um microchip dobra a cada 18 meses. Porém, a geração de calor também cresce constantemente, tornando-se um obstáculo a ser superado a fim de suprir a crescente demanda por processamento computacional. O estudo se baseou no microprocessador "Intel i5 3570K" e os modelos foram criados no *software* de desenho 3D SolidWorks da Dassault Systèmes S.A. Foram criados 5 modelos a partir da pesquisa acerca das configurações usuais dos microprocessadores e hipóteses de simplificação foram adotadas a fim de tornar possível a elaboração dos modelos. As simulações numéricas em volumes finitos foram realizadas no *software* Multiphysics da ANSYS, Inc., onde o problema de condução de calor foi aproximado. Para obter resultados mais abrangentes, variou-se os parâmetros para a resistência térmica de dissipador e a potência térmica de projeto (*TDP).* Foram analisadas as temperaturas máximas e mínimas atingidas no *Die* (núcleo), e a temperatura no centro geométrico da superfície superior do Difusor de Calor Integrado *(IHS),* tampa metálica que cobre o *Die.* Verificou-se que a diferença da solda de Índio com 0,2 mm de espessura para a pasta térmica Dow Corning TC-1996 com 0,025 mm de espessura foi de 1,9 e 2,5 ºC para a temperatura máxima no *Die* com *TDP* de 77 e 100 W, respectivamente, para resistências térmicas equivalentes do dissipador. Quantificou-se a importância de garantir uma espessura mínima para a pasta térmica, comparando espessuras de 0,025, 0,05 e 0,075 mm. Quanto à utilização do *Die* exposto, ficou clara a vantagem sobre as outras configurações. A temperatura máxima no *Die* foi de 9,7 a 11,9 ºC menor do que as observadas para a configuração mais usual de pasta térmica, com 0,025 mm de espessura, para a *TDP* de 77 W. Para 100 W, essa diferença aumentou para 12,6 a 15.5 ºC. Também se observou que a diferença entra as temperaturas máximas e mínimas foi menor nessa configuração, resultando em uma distribuição mais homogênea.

PALAVRAS-CHAVE: Microprocessador, Dissipador de Calor, Resistência Térmica, Material de Interface Térmica.

SCHUH, M. O. **Characterization and Thermal Analysis of a High-Performance Microprocessor via Numerical Method**. 2017. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ABSTRACT

This study presents a thermal analysis of a high-performance microprocessor in order to evaluate the thermal efficiency of various physical construction configurations through computational simulations using finite volumes. Due to the advancement of technology, the number of transistors accommodated in a microchip doubles every 18 months. However, the generation of heat also grows constantly, becoming an obstacle to be surpassed in order to supply the growing demand for computational processing. The study was based on the Intel i5 3570K microprocessor and the models were created in the 3D drawing software SolidWorks from Dassault Systèmes S.A. Five models were created from the research of the usual microprocessor configurations and simplification assumptions were adopted to make modeling possible. Numerical simulations in finite volumes were performed using the software Multiphysics from ANSYS, Inc., where the heat problem was approximated. In order to obtain extended results, the parameters for the Thermal Design Power (TDP) and the heat sink's thermal resistance were varied. It was explored the maximum and minimum temperatures reached in the Die (Core), and the temperature on the geometric center of the upper surface of the Integrated Heat Spreader (IHS). The difference for the maximum temperature in the Die between the 0.2 mm thick Indium weld and the 0.025 mm thick Dow Corning TC-1996 thermal compound was found to be, for equivalent heatsink thermal resistors, 1.9 and 2.5 °C for a TDP of 77 and 100 W, respectively. It was quantified the importance of ensuring a minimum thickness for the thermal paste, comparing thicknesses of 0.025, 0.05 and 0.075 mm. As for the use of an exposed Die, the advantage over the other configurations was clear. Die's maximum temperature was found to be from 9.7 to 11.9 °C lower than those observed for the most usual configuration, with a 0.025 mm thick thermal paste layer, for a TDP of 77 W. For 100 W, the difference increased to 12.6 up to 15.5 °C. It was also observed that the difference between the maximum and minimum temperatures was lower in this configuration, resulting in a more homogeneous distribution.

KEYWORDS: Microprocessor, Heat Sink, Thermal Resistance, Thermal Interface Material.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1
2 OBJETIVOS 1
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 1
4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 2
4.1 Método dos Volumes Finitos 2
4.2 Condução de Calor 2
4.3 Resistência Térmica 2
5 ASPECTOS GERAIS DO PROBLEMA 3
5.1 Microprocessador 3
5.2 Dissipador de Calor 4
5.3 Materiais de Interface Térmica 5
6 METODOLOGIA 6
6.1 Hipóteses 6
6.2 Modelos 7
6.3 Análise de Independência de Malha 7
6.4 Parâmetros Variáveis 8
7 RESULTADOS 9
8 CONCLUSÕES 13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 14

LISTA DE FIGURAS

Figura 5.1 – Ilustração detalhando os componentes de um microprocessador [adaptado de Intel Corporation, 2013]. 4
Figura 5.2 – Dissipador Intel RCBF7-1156 DHA-A (a) e AMD FHSA7015B (b) [(a) Tomshardware, 2017 ;(b) Hexus, 2017]. 4
Figura 5.3 – Gráfico de Resistência Térmica por RPM para dissipador Intel RCBF7-1156 DHA-A [adaptado de Intel Corporation, 2013]. 4
Figura 5.4 – Dissipador Noctua NH-D14 (a) e Corsair Hydro Series H100i (b) [(a) Noctua, 2017; (b) Corsair, 2017]. 5
Figura 5.5 – Modelo proposto pelo Sandia National Laboratories [Frostytech, 2017]. 5
Figura 6.1 – Processador Intel i5-3570K [Techradar, 2017]. 6
Figura 6.2 –Modelo referente as configurações 1, 2, 3 e 4 (a), com *IHS* transparente para a visualização (b) e configuração 5 (c). 7
Figura 6.3 – Malha grossa. 8
Figura 6.4 – Malha fina. 8
Figura 6.5 – Orientação para a localização da temperatura de referência T_{case} [adaptado de Intel Corporation, 2013]. 9
Figura 7.1 – Gráfico de T_{max} por resistência térmica para *TDP* de 77 W. 10
Figura 7.2 – Gráfico de T_{max} por resistência térmica para *TDP* de 100 W. 10
Figura 7.3 – Gráfico de T_{min} por resistência térmica para *TDP* de 77 W. 11
Figura 7.4 – Gráfico de T_{min} por resistência térmica para *TDP* de 100 W. 11
Figura 7.5 – Distribuição de temperaturas no Die para a configuração 5. 11
Figura 7.6 – Distribuição de temperaturas no *Die* para a configuração 1. 12
Figura 7.7 – Isotermas para a configuração 1 da Figura 7.3. 12
Figura 7.8 – Gráfico de T_{case} por resistência térmica para *TDP* de 77 W. 12
Figura 7.9 – Gráfico de T_{case} por resistência térmica para *TDP* de 100 W. 13
Figura 7.10 – T_{case} para a configuração 1 (a) e 4 (b), com *TDP* de 77 W e resistência térmica de 0,3 ºC/W. 13

LISTA DE TABELAS

Tabela 6.1 – Malha final para cada configuração. 8
Tabela 6.2 – Parâmetros variáveis utilizados nas simulações. 9
Tabela A.1 – Análise de Malha – Solda 16
Tabela A.2 – Análise de Malha – Pasta 0,025 mm 16
Tabela A.3 – Análise de Malha Pasta 0,05 mm 16
Tabela A.4 – Análise de Malha Pasta 0,05 mm 16
Tabela A.5 – Análise de Malha – Chip Exposto 16
Tabela B.6 – Resultados Solda – 77 W 17
Tabela B.7 – Resultados Pasta 0,025 mm – 77 W 17
Tabela B.8 – Resultados Pasta 0,05 mm – 77 W 17
Tabela B.9 – Resultados Pasta 0,075 mm – 77 W 18
Tabela B.10 – Resultados Chip Exposto – 77 W 18
Tabela C.11 – Resultados Solda – 100 W 18
Tabela C.12 – Resultados Pasta 0,025 mm – 100 W 19
Tabela C.13 – Resultados Pasta 0,05 mm – 100 W 19
Tabela C.14 – Resultados Pasta 0,075 – 100 W 19
Tabela C.15 – Resultados Chip Exposto – 100 W 20

1 INTRODUÇÃO

O microprocessador é um elemento fundamental para o mundo moderno, estando presente na grande maioria dos equipamentos eletrônicos. Os microprocessadores de alta performance, usados em computadores e *laptops*, vêm sendo aprimorados constantemente para suprir a demanda por processamento mais rápido e aplicações mais complexas. Esse avanço, porém, resultou em um crescente aumento da potência térmica, consequentemente aumentando a geração de calor.

A alta temperatura tem um efeito degradante nos componentes eletrônicos, sendo um fator determinante na vida útil do microprocessador. A temperatura também é um fator limitante da performance. Quando não há uma dissipação de calor adequada, ocorre uma medida de proteção chamada *thermal throttling*, que diminui a frequência de trabalho do microprocessador a fim de manter a temperatura abaixo de um limite estabelecido. Por outro lado, quando a dissipação de calor é adequada, pode-se realizar *overclocking*, promovendo um aumento da performance do componente através do aumento da frequência de trabalho, porém aumentando a taxa de geração de calor.

O aumento da taxa de geração de calor nos microprocessadores de alta performance é também um obstáculo para o avanço da tecnologia, visto que ambos tendem a andar lado a lado. Essa é uma questão que deve ser ponderada a fim de garantir a continuidade do desenvolvimento dessa área para as próximas décadas.

Recentemente, a fabricante Intel realizou mudanças no método de construção dos seus microprocessadores, voltando a uma prática mais tradicional, que em teoria prejudica a dissipação de calor [wccftech, 2017]. Isso vai de encontro com a crescente necessidade de buscar maneiras mais eficientes para a remoção de calor de microprocessadores. Por isso, esse trabalho acadêmico busca quantificar o impacto que os métodos de construção têm sobre o desempenho térmico dos microprocessadores.

2 OBJETIVOS

Os objetivos desse trabalham foram:

1. Caracterizar os componentes físicos que formam um microprocessador de alta performance, bem como os fatores que influenciam o seu estado térmico.
2. Definir configurações físicas usuais que influem na eficiência térmica.
3. Criar modelos com base nas configurações definidas, aplicando as hipóteses de simplificações adequadas para que seja possível a realização de um estudo sobre a dissipação de calor.
4. Avaliar o impacto dos métodos de construção do microprocessador na dissipação de calor e compará-los entre si.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Moore, 1965, constatou o aumento contínuo do número de componentes em um microprocessador, dobrando a cada dois anos, devido ao aperfeiçoamento na construção de transistores. Em 1971, a Intel lança no mercado seu primeiro microprocessador comercial, com transistores medindo 10.000 nm. Atualmente, a tecnologia de fabricação permite transistores com até 14 nm.

Sankaranarayanan, 2009, afirma que, contrária à teoria, a densidade de potência térmica tem aumentado com a diminuição do transistor e considera o estado térmico do processador como o principal obstáculo para a evolução da tecnologia. Essa tendência tem aumentado a preocupação na remoção de calor do microprocessador.

Deppisch *et al.*, 2006, estudaram os efeitos da espessura na degradação da solda de Índio através de ciclos térmicos, apontando uma espessura ótima de 0,200 a 0,225 mm.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica consiste na pesquisa de conhecimentos essenciais para o decorrer deste trabalho.

4.1 Método dos Volumes Finitos

O MVF utiliza como ponto de partida a forma integral da equação da conservação. O domínio de solução é dividido num número finito de volumes de controle (VC) contíguos, e a equação da conservação é aplicada a cada VC. No centroide de cada VC localiza-se um nó computacional, no qual são calculados os valores das variáveis, sendo os valores das variáveis nas superfícies dos VC obtidos por interpolação em função dos valores nodais (centro do VC). Os integrais de volume e de superfície são aproximados usando fórmulas de quadratura apropriadas. Como resultado, obtém-se uma equação algébrica para cada VC, na qual aparecem os valores das variáveis no nó em causa e nos nós vizinhos [Gonçalves, 2007].

O MVF pode ser aplicado a qualquer tipo de malha, por isso adapta-se a geometrias complexas. A malha define apenas as fronteiras do volume de controle e não necessita estar relacionada com um sistema de coordenadas. O método é inerentemente conservativo, contando que os integrais de superfície (que representam fluxos convectivos e difusivos) sejam os mesmos em faces partilhadas por VC [Gonçalves, 2007].

4.2 Condução de Calor

A condução pode ser vista como a transferência de energia das partículas mais energéticas para as partículas adjacentes, menos energéticas, de uma substância devido às interações entre essas partículas [Incropera, 2002].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho T) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{k}{c_p}\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{k}{c_p}\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{k}{c_p}\frac{\partial T}{\partial z}\right) + S \qquad [\mathrm{W/m^3}] \tag{4.1}$$

Maliska, 1995, demonstra a obtenção das equações aproximadas para a resolução de problemas tridimensionais através do MVF, integrando a equação na forma conservativa no espaço e no tempo (Equação 4.1), onde *T* é a temperatura, *k* é a condutividade térmica, *S* é o termo fonte e c_p é o calor específico.

A integração da Equação 4.1 no espaço e no tempo, aproximando as derivadas nas interfaces do volume elementar por diferenças centrais e usando uma formulação totalmente implícita, resulta na equação utilizada na solução de problemas de condução de calor pelo MVF.

4.3 Resistência Térmica

Incropera, 2002, apresenta a analogia entre as difusões de calor e de carga elétrica.

$$q_x = -kA\frac{dT}{dx} = \frac{kA}{L}(T_1 - T_2) \qquad [\mathrm{W}] \tag{4.2}$$

$$R_{t,cond} = \frac{T_1 - T_2}{q_x} = \frac{L}{kA} \qquad [^{\circ}\mathrm{C/W}] \tag{4.3}$$

A partir da equação de Fourier para a taxa de transferência de calor por condução (Equação 4.2), é deduzida a equação para a resistência térmica para a condução em uma parede plana (Equação 4.3). Temos que *q* é a taxa de transferência de calor, *k* representa a condutividade térmica, *A* é a área do condutor, *L* é o comprimento do condutor, T_1 e T_2 são as temperaturas nas extremidades.

$$q = hA(T_s - T_\infty) \qquad [\mathrm{W}] \tag{4.4}$$

$$R_{t,conv} = \frac{T_s - T_\infty}{q} = \frac{1}{hA} \quad [^oC/W] \tag{4.5}$$

A partir da Lei de resfriamento de Newton (Equação 4.4), obtém-se a equação para resistência térmica para a convecção (Equação 4.5), na qual *h* é o coeficiente de convecção de calor. Para essas equações *q* é a taxa de transferência de calor, *h* é a coeficiente de convecção, *A* é a área de contato, T_s é a temperatura da superfície e T_∞é a temperatura ambiente.

$$q_x = \mathrm{U}A\,\Delta T \quad [W] \tag{4.6}$$

$$R_{tot} = \sum R_t = \frac{\Delta T}{q} = \frac{1}{UA} \quad [^oC/W] \tag{4.7}$$

Dado um sistema composto, pode ser empregado o coeficiente global de transferência de calor (*U*), definido por uma lei análoga à lei de resfriamento de Newton, como mostrado na Equação 4.6, na qual ΔT é a diferença de temperatura global. Com isso, define-se a Equação 4.7 para resistência térmica total, dependente do coeficiente global de transferência de calor.

5 ASPECTOS GERAIS DO PROBLEMA

Esse capítulo apresenta conhecimentos básicos sobre os microprocessadores e dissipadores, a fim de dar um embasamento para a criação dos modelos, hipóteses de simplificação e determinar parâmetros a serem estudados nas simulações numéricas.

5.1 Microprocessador

Os modelos referentes a esse trabalho são os utilizados em computadores domésticos. Nesse mercado, os principais fabricantes são AMD e Intel, podendo haver pequenas divergências nas técnicas de montagem entre elas e até mesmo nas diferentes gerações de um mesmo produto. Porém, de forma geral, as tecnologias empregadas são correlatas, de forma que esse estudo seja representativo do caso geral.

A composição simplificada de um microprocessador moderno, mostrado na Figura 5.1, segundo documento com as diretrizes termomecânicas disponibilizado pela Intel, 2013, pode ser detalhada como:

- *IHS (Integrated Heat Sreader):* É uma tampa metálica que conduz o calor do núcleo para o dissipador. Tem como principal função proteger o núcleo e também promove o aumento da rigidez do dispositivo como um todo. É construída em cobre devido à sua alta condutividade térmica, com um revestimento de níquel.
- *TIM (Thermal Interface Material):* É o material que favorece a condução térmica entre o *Die* e o *IHS*, fazendo-se necessário devido à resistência de contato causada pelos interstícios resultantes da rugosidade das interfaces. Segundo Incropera , 2002, qualquer substância intersticial que preencha os interstícios entre superfícies em contato e cuja condutividade térmica exceda a do ar irá causar uma redução na resistência de contato.
- *Die* (Núcleo)*:* É onde ocorre o processamento em si. Trata-se de um complexo arranjo de componentes eletrônicos, formado principalmente de silício, um material semicondutor.
- *PCB (Printed Circuit Board)*: É a *PCB* que faz a ligação entre o *Die* e a placa mãe. É feita de uma resina epóxi denominada FR-4, tendo terminais de conexões em ouro e condutores de cobre.

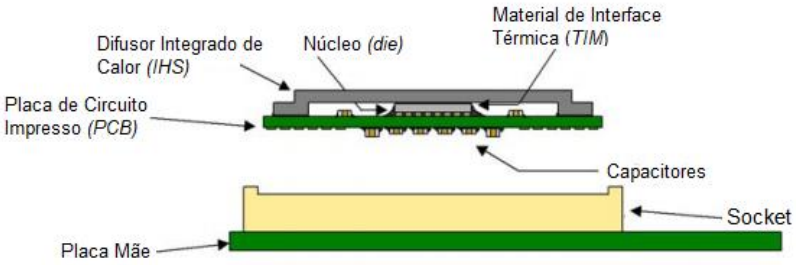


Figura 5.1 – Ilustração detalhando os componentes de um microprocessador [adaptado de Intel Corporation, 2013].

5.2 Dissipador de Calor

Dissipador é o componente responsável por remover o calor do microprocessador. A troca de calor ocorre por condução entre o dissipador e o microprocessador e por convecção forçada entre o dissipador e o ar ambiente. Intel e AMD costumam fornecer dissipadores junto com seus microprocessadores (Figura 5.2), sendo modelos com uma resistência térmica relativamente alta e alto ruído. O gráfico da Figura 5.3 sugere uma resistência térmica entre 0,43 e 0,33 ºC/W para o dissipador Intel RCBF7-1156 DHA-A.

Figura 5.2 – Dissipador Intel RCBF7-1156 DHA-A (a) e AMD FHSA7015B (b) [(a) Tomshardware, 2017 ;(b) Hexus, 2017].

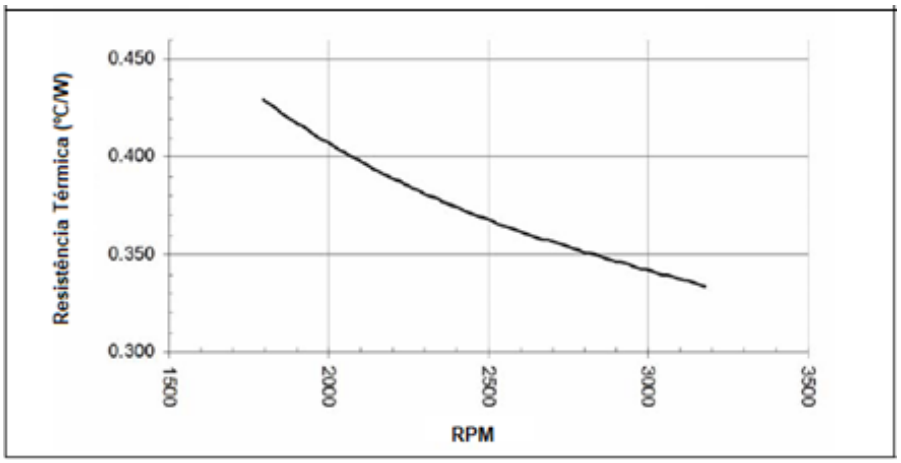


Figura 5.3 – Gráfico de Resistência Térmica por RPM para dissipador Intel RCBF7-1156 DHA-A [adaptado de Intel Corporation, 2013].

Recentemente, a Intel tem deixado de incluir um dissipador para os microprocessadores topo-de-linha, em virtude das elevadas Potências Térmicas de Projeto *(TDP)*, havendo a

necessidade de buscar uma solução mais robusta. Devido a isso, há um grande mercado para dissipadores *aftermarket,* o que propicia o desenvolvimento de tecnologias que proporcionam maiores capacidades de dissipação de calor. As opções variam tanto no formato quanto na tecnologia utilizada, e algumas são ilustradas na Figura 5.4.

Figura 5.4 – Dissipador Noctua NH-D14 (a) e Corsair Hydro Series H100i (b) [(a) Noctua, 2017; (b) Corsair, 2017].

Uma nova tecnologia foi desenvolvida pelo Sandia National Laboratories, que combina o dissipador e a ventoinha em um único componente (Figura 5.5). Esse design tem como ponto fundamental a espessura da lacuna entre a base fixa e a ventoinha metálica, que deve ser aproximadamente 10 μm. Segundo Johnson *et al*, 2013, operando com essa espessura e com uma velocidade de 2500 rpm, o Sandia Cooler apresenta uma resistência térmica de 0.15 ºC/W. O autor indica ainda que a resistência térmica do dissipador Noctua NH-D14 é de cerca de 0.10 ºC/W.

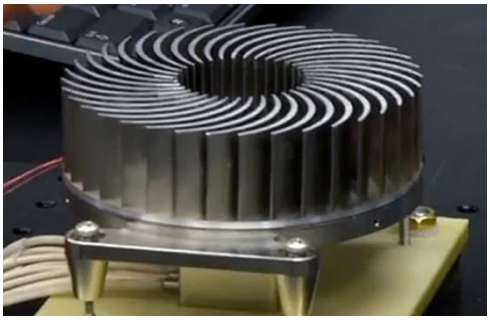


Figura 5.5 – Modelo proposto pelo Sandia National Laboratories [Frostytech, 2017].

5.3 Materiais de Interface Térmica

Materiais de interface térmica, ou *TIM (Thermal Interface Material),* são essenciais para garantir uma condução de calor adequada entre duas faces adjacentes. Existem inúmeras composições para esses materiais, com características diferentes. Para a aplicação em microprocessadores, são necessárias características como: alta condutividade térmica, baixa condutividade elétrica, resistência à degradação. A Intel utilizou nos últimos anos a pasta térmica Dow Corning TC-1996 e, por um curto período de tempo, a solda de Índio.

A solda de Índio tem uma condutividade térmica de 86 W/(mK), superior a pasta térmica Dow Corning TC-1996, com 4 W/(mK) [DowCorning, 2017]. Porém, busca-se minimizar a espessura da camada de pasta térmica, enquanto a espessura da solda é limitada por limitações metalúrgicas advindas dos distintos coeficientes de expansão térmica dos materiais empregados nos microchips. Para a pasta térmica Dow Corning TC-1996, a fabricante recomenda uma espessura de 0,02 mm. Porém, esse valor é variável e depende da pressão exercida sobre a superfície onde está aplicada esse material.

6 METODOLOGIA

O trabalho tem como base o microprocessador Intel i5-3570K ilustrado na Figura 6.1, que foi escolhido devido a disponibilidade de referências quanto às diretrizes de projeto térmico e também por representar adequadamente o padrão moderno de fabricação. A composição e as dimensões que serviram como bases dos modelos foram extraídas das fichas de dados fornecidas pelo fabricante.

Figura 6.1 – Processador Intel i5-3570K [Techradar, 2017].

6.1 Hipóteses

Devido à complexidade da construção, e funcionamento de um processador, hipóteses foram adotadas para que fosse possível a criação de um modelo simplificado para a simulação numérica. As hipóteses são:

1. A transferência de calor para o ambiente se dá somente pela superfície em contato com o dissipador. Segundo diretrizes sugeridas pela Intel para o projeto termomecânico de dissipadores, deve ser considerada que a perda de calor se dá somente pelo dissipador. Isso desconsidera a possibilidade de uma possível perda por convecção na periferia do microprocessador e por condução na interface com a placa mãe, sendo então consideradas isoldadas.

2. A resistência térmica do dissipador é modelada como um coeficiente global de transferência de calor distribuído uniformemente na superfície em que é aplicada, e engloba a resistência térmica associada ao *TIM* utilizado entre as superfícies do dissipador e do *IHS.*

3. A lacuna entre o *Die* e o *IHS* é uniforme, desconsiderando assim desvios geométricos como concavidade ou convexidade da superfície do *Die.*

4. O *IHS* é composto integralmente de cobre. Devido à fina camada de revestimento de níquel, é possível desconsiderar o seu efeito na resistência térmica do componente.

5. O *Die* é composto integralmente de silício monocristalino. Sabe-se que há no núcleo inúmeros tipos de componentes e um número de transistores que podem chegar a bilhões. Os transistores têm a sua composição alterada por um processo que introduz impurezas a fim de alterar a condutividade elétrica. Porém, devido à impossibilidade de reproduzir uma estrutura tão complexa, essa hipótese se faz indispensável.

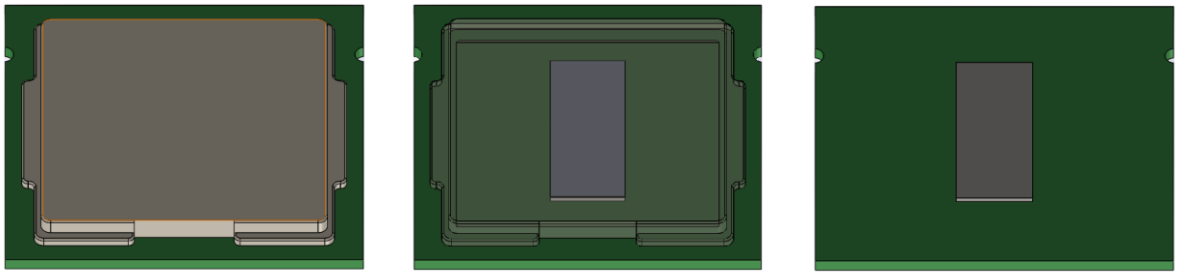
6. A *PCB* é composta integralmente de resina epóxi FR-4. Sabe-se que há material condutor e alguns componentes instalados no substrato. Porém, por motivos de simplicidade, essa hipótese é adotada.

7. A geração de calor ocorre integralmente no *Die*. Sankaranarayanan, 2009, detalha a importância do arranjo dos componentes no núcleo de forma a buscar um arranjo homogêneo na geração de calor. Por isso, considera-se que a geração ocorre homogeneamente. Essa hipótese descarta uma geração de calor *PCB*. Sabe-se que há condutores elétricos na *PCB*, que através da passagem de corrente geram energia térmica pelo efeito Joule. Porém é razoável considerar que essa geração é desprezível frente a geração que ocorre no núcleo.

6.2 Modelos

Foram identificadas três configurações físicas usuais e foram criados 5 modelos no *software* SolidWorks, ilustrados na Figura 6.2, com as seguintes variações:

1. Solda térmica de Índio com 0.20 mm de espessura.
2. Pasta térmica Dow Corning TC-1996 com 0.025 mm de espessura.
3. Pasta térmica Dow Corning TC-1996 com 0.05 mm de espessura.
4. Pasta térmica Dow Corning TC-1996 com 0.075 mm de espessura.
5. *Die* exposto.



(a) (b) (c)

Figura 6.2 –Modelo referente as configurações 1, 2, 3 e 4 (a), com *IHS* transparente para a visualização (b) e configuração 5 (c).

6.3 Análise de Independência de Malha

Os modelos foram exportados para o *software* ANSYS Multiphysics, onde foram geradas as malhas e realizadas as simulações numéricas em regime permanente. A malha gerada apresenta elementos com estrutura adaptativa com elementos tetraédricos e hexaédricos de modo a ajustar-se eficientemente à geometria. Foi realizada uma análise de independência de malha para cada modelo, avaliando a temperatura máxima T_{max} atingida no *Die*, com uma geração de 77 W e resistência térmica do dissipador de 0,3 ºC/W.

O erro foi calculado utilizando a Equação 6.1 e os resultados para a última iteração de cada configuração são mostrados na Tabela 6.1. Os resultados completos encontram-se no Apêndice A. A Figura 6.3 ilustra uma malha grosseira, e a Figura 6.4 mostra o resultado do refinamento.

$$Erro = \left(\frac{T_{n-1} + T_n}{Tn}\right) 100 \quad (6.1)$$

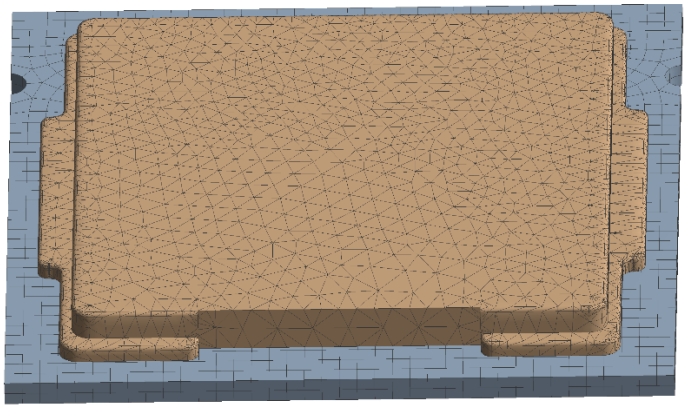


Figura 6.3 – Malha grossa para as configurações 2, 3 e 4.

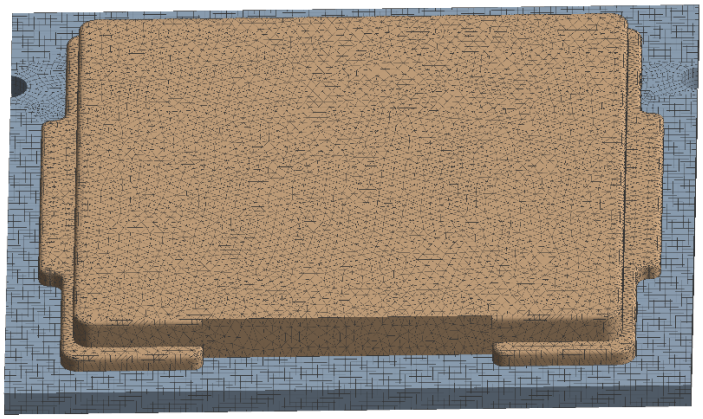


Figura 6.4 – Malha refinada para as configurações 2, 3 e 4.

Tabela 6.1 – Malha final para cada configuração.

Configuração	Número de Elementos	T_{max} [°C]	Erro [%]
1	101165	58,759	0,0017019
2	73654	60,647	0,0016489
3	73654	62,592	0,0031954
4	73654	66,476	0
5	18596	49,053	0

Foi verificado que os resultados mostraram-se independentes das malhas, com todas as iterações finais apresentando um erro inferior a 0,004 %, com as configurações 4 e 5 apresentando um erro igual a 0.

6.4 Parâmetros Variáveis

Para cada configuração foram realizadas 20 simulações através da variação da geração de calor do *Die* e da resistência térmica do dissipador. A temperatura ambiente foi estabelecida em 25 ºC para todos os testes. Os parâmetros variáveis para a potência térmica de projeto (*TDP)* e a resistência térmica, conforme Tabela 6.2.

A resistência térmica do dissipador engloba o material de interface térmica presente na área de interação entre o dissipador e o *IHS.* Foram observadas as temperaturas máximas (T_{max}) e mínimas (T_{min}) atingidas no *Die*, e para as configurações 1, 2, 3 e 4 também foi observada a temperatura no centro geométrico da superfície do IHS (T_{case}), mostrada na Figura 6.5.

Tabela 6.2 – Parâmetros variáveis utilizados nas simulações.

Configuração	TDP [W]	Resistências térmicas [ºC/W]									
1	77	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
	100	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
2	77	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
	100	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
3	77	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
	100	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
4	77	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
	100	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
5	77	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
	100	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50

Figura 6.5 – Orientação para a localização da temperatura de referência T_{case} [adaptado de Intel Corporation, 2013].

7 RESULTADOS

Todas as simulações foram realizadas em regime permanente e convergiram com resíduos inferiores a 10E-3 baseados no método Newton-Raphson, sendo o padrão para a resolução do problema de condução de calor no *software* utilizado. As tabelas completas com os resultados obtidos se encontram nos Apêndices B e C.

Os resultados ilustrados na Figura 7.1 e 7.2 indicam que diferença entre a solda de Índio de 0,20 mm e a pasta térmica com 0,025 mm de espessura foi de 1,9 e 2,5 ºC para T_{max} com *TDP* de 77 e 100 W, respectivamente. A comparação das configurações 2, 3 e 4 mostra o efeito da espessura e a importância de se obter uma camada delgada de pasta térmica. Da configuração 2 para a 3, o acréscimo de T_{max} foi cerca de 2 e 2,5 ºC, para uma *TDP* de 77 e 100 W, respectivamente. Da configuração 3 para a 4, o acréscimo de foi cerca de 3,9 e 5,1 ºC, para uma *TDP* de 77 e 100 W, respectivamente.

Vale ressaltar que a condução térmica da pasta térmica utilizada nas simulações, Dow Corning TC-1996, tem uma condutividade térmica de 4 W/(mK), havendo alternativas mais eficientes no mercado. Por exemplo, a pasta térmica Arctic Silver 5 possui uma condutividade térmica de 8,9 W/(mK) [Arctic Silver, 2017], o que diminuiria consideravelmente a resistência térmica para uma mesma espessura. Finalmente, as simulações da configuração 5 mostram que a utilização do *Die* exposto é superior às demais configurações, porém não é indicado devido ao risco de danificar o substrato frágil.

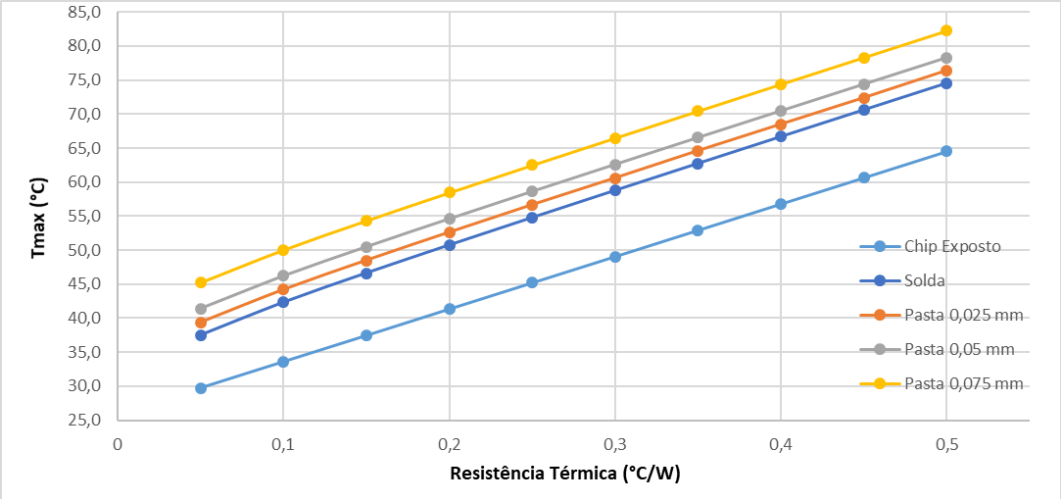


Figura 7.1 – Gráfico de T_{max} por resistência térmica para *TDP* de 77 W.

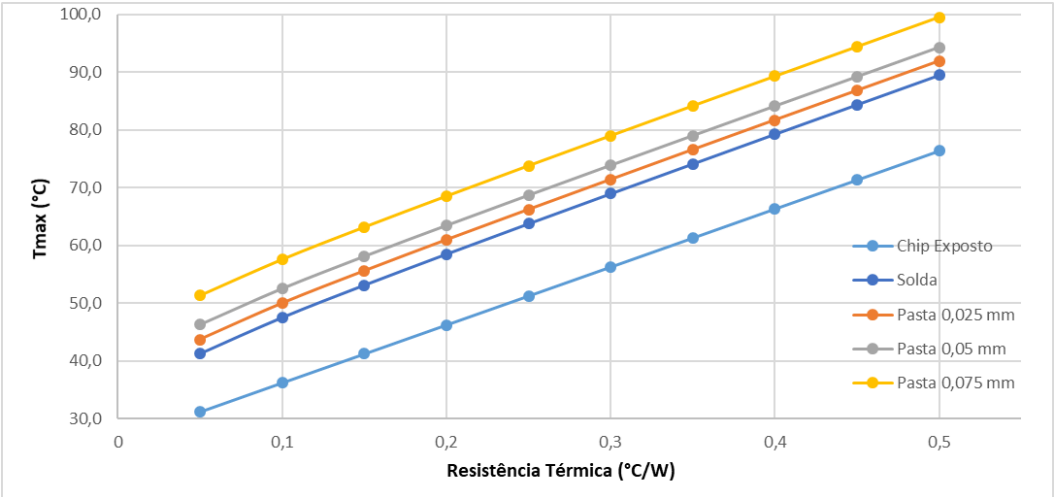


Figura 7.2 – Gráfico de T_{max} por resistência térmica para *TDP* de 100 W.

Analisando os gráficos T_{max} *na Figura 7.1 e 7.2, e* T_{min} na Figura 7.3 e 7.4, percebe-se que as temperaturas T_{max} e T_{min}, tanto para as simulações com 77 W e 100 W, crescem com um padrão quse linear. Isso se dá pelo fato de utilizar valores para condução térmica independente da temperatura (4 W/(mK) para a pasta Dow Corning TC-1996 e 86 W/(mK) para a solda de Índio). Utilizando valores dependentes da temperatura, poder-se-ia esperar comportamentos não lineares para as curvas, resultando em comportamentos diferentes nas temperaturas observadas.

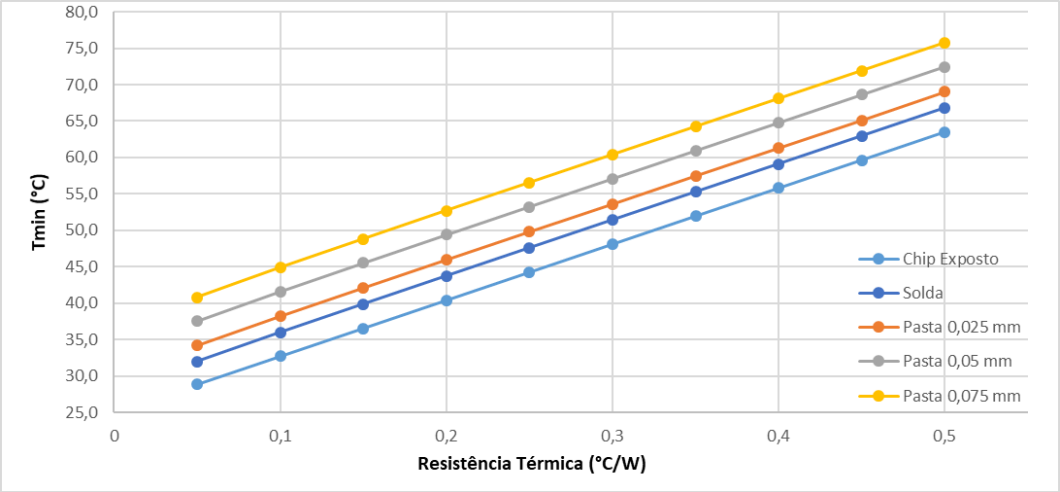


Figura 7.3 – Gráfico de T_{min} por resistência térmica para *TDP* de 77 W.

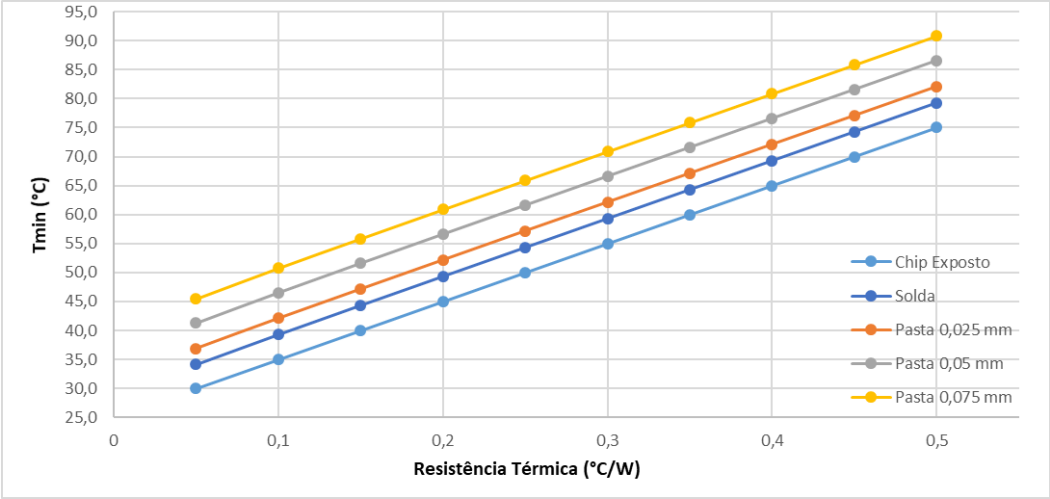


Figura 7.4 – Gráfico de T_{min} por resistência térmica para *TDP* de 100 W.

Para a configuração 5, o dissipador está em contato direto com o *Die*, o que resulta em uma distribuição de temperaturas uniforme na superfície, com isotermas estratificadas ao longo da espessura, ilustrado na Figura 7.5. Isso ocorre devido a hipótese de que a geração de energia térmica e a dissipação de calor são uniformes, resultando em uma condução de calor unidimensional.

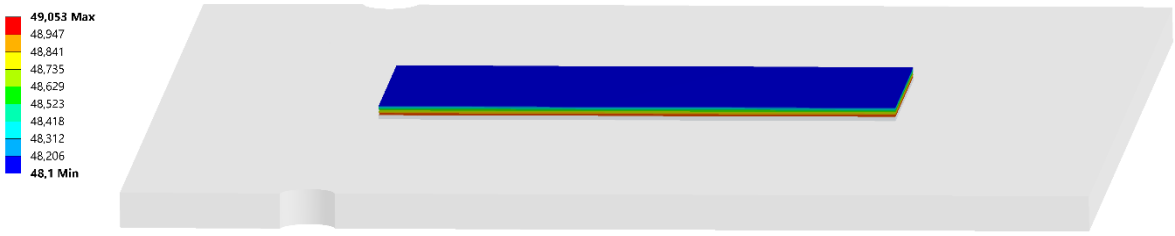


Figura 7.5 – Distribuição de temperaturas no Die para a configuração 5, com *TDP* de 77 W e resistência térmica de 0,3 ºC/W.

Observa-se também que a diferença de T_{max} e T_{min} para o *Die* na configuração 5 é pequena se comparada com as outras configurações. Analisando a Figura 7.5, percebe-se que as isotermas são paralelas com a superfície superior e se distribuem ao longo da espessura. Já para as configurações 1, 2, 3 e 4, as isotermas se arranjam como demonstrado na Figura 7.7, resultando em gradientes mais expressivos nas direções x e y. Isso mostra que embora a geração de calor seja homogênea em todo o *Die*, as distribuições das temperaturas dependem da configuração física do microprocessador.

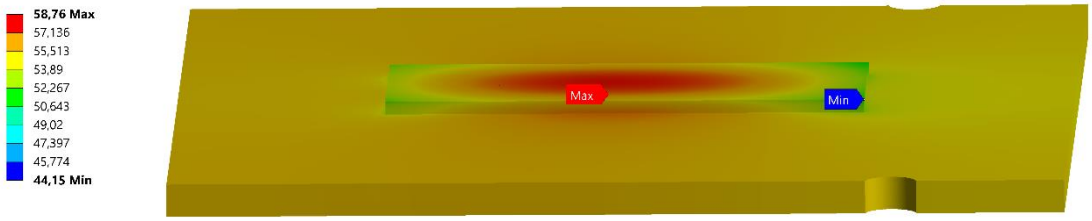


Figura 7.6 – Distribuição de temperaturas no *Die* e na *PCB* para a configuração 1, com *TDP* de 77 W e resistência térmica de 0,3 ºC/W.

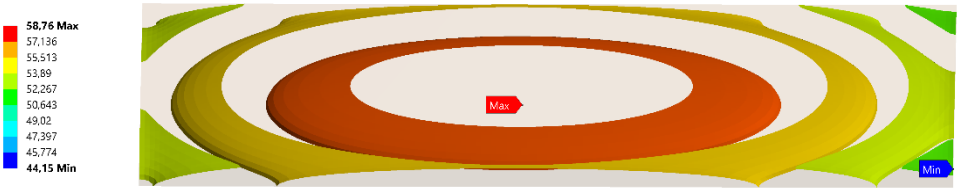


Figura 7.7 – Isotermas no *DIE* para a configuração da Figura 7.6.

A Figura 7.8 e 7.9 ilustram os resultados para as configurações onde está presente o *IHS*, e observa-se que T_{case} depende majoritariamente da resistência térmica do dissipador e da *TDP*. Portanto, é preciso avaliar qualitativamente a distribuição de calor no *IHS* para avaliar as diferenças entre as configurações propostas. A Figura 7.10 mostra a distribuição de temperaturas para as configurações 1 e 4 com *TDP* de 77 W e resistência térmica de 0,3 ºC/W, mostrando que a solda de Índio proporciona uma melhor difusão de calor, resultando em temperaturas inferiores no *Die.*

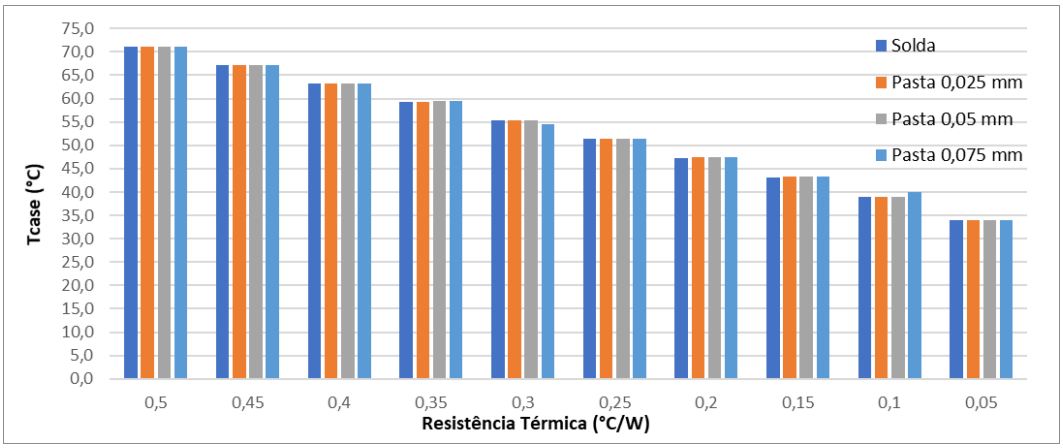


Figura 7.8 – Gráfico de T_{case} por resistência térmica para *TDP* de 77 W.

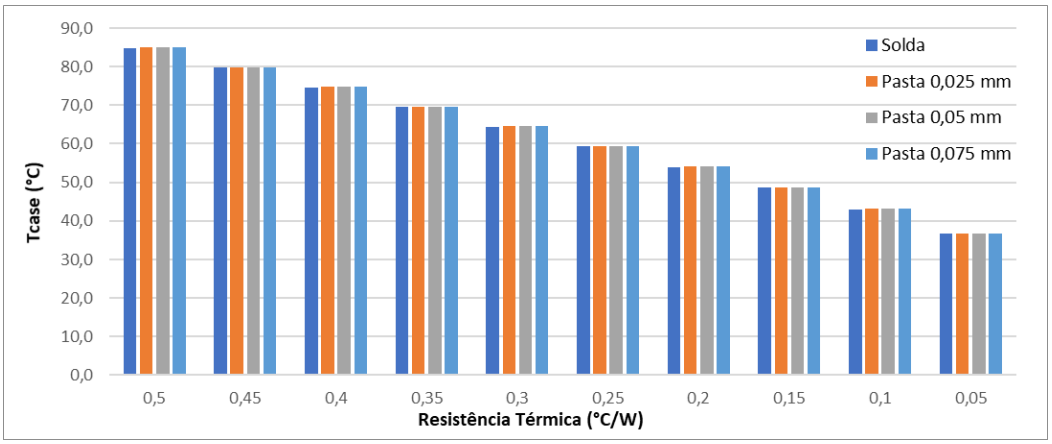


Figura 7.9 – Gráfico de T_{case} por resistência térmica para *TDP* de 100 W.

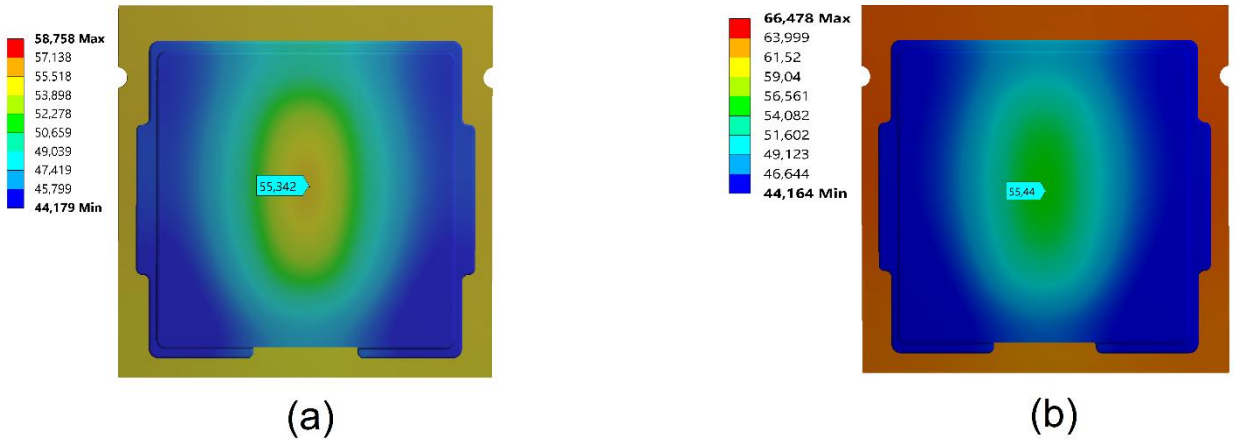


Figura 7.10 – T_{case} para a configuração 1 (a) e 4 (b), com *TDP* de 77 W e resistência térmica de 0,3 ºC/W.

Nas diretrizes para especificações e design termomecânico de dissipadores, a Intel indica uma temperatura T_{case} máxima para uma determinada *TDP*, seguindo a Equação 7.1. A Equação 7.2 é indicada para calcular a resistência térmica do dissipador para temperatura ambiente T_{amb} para uma *TDP* de 77 W.

$$T_{case_máx} = (0{,}29\, TDP) + 45{,}1 \qquad [ºC] \qquad (7.1)$$

$$\Psi ca = 0{,}29 + [(45{,}1 - T_{amb})\, 0{,}0105] \qquad [ºC/W] \qquad (7.2)$$

Através da Equação 7.1, para TDP de 77 e 100 W temos uma temperatura máxima para T_{case} de 67,4 e 74,1 ºC, respectivamente. A resistência térmica calculada pela Equação 7.2. é de de 0,501 ºC/W para uma temperatura ambiente, T_{amb}, de 25 ºC, enquanto que os resultados obtidos nesse trabalho indicam um valor de 0,45 ºC/W.

Porém, as simulações mostram que a referência T_{case} não indica adequadamente a temperatura do *Die.* Para uma *TDP* de 77 W e resistência de 0,450 ºC/W, a diferença de T_{case} da configuração 1 para a configuração 4 é de 0,1 ºC, enquanto T_{max} é de 7,7 ºC.

8 CONCLUSÕES

A pesquisa sobre os aspectos gerais do problema mostrou o complexo design dos microprocessadores e dos componentes associados a eles. Portanto, foi necessário adotar

diversas hipóteses de simplificações a fim de tornar possível a simulação do problema. As configurações dos modelos e os parâmetros foram selecionados de forma a representar condições reais de uso.

Verificou-se que a utilização de uma solda de Índio com 0,2 mm de espessura resulta em menores temperaturas no núcleo quando comparada com a pasta térmica Dow Corning TC-1996 com 0,025 mm de espessura. A diferença, para resistências térmicas equivalentes do dissipador, foi de 1,9 e 2,5 ºC para T_{max} com *TDP* de 77 e 100 W, respectivamente.

Quantificou-se a importância de garantir uma espessura mínima para a pasta térmica, com as simulações para 0,025, 0,05 e 0,075 mm de espessura. Da configuração 2 para a 3, o acréscimo de T_{max} foi cerca de 2 e 2,5 ºC, para uma *TDP* de 77 e 100 W, respectivamente. Da configuração 3 para a 4, o acréscimo de foi cerca de 3,9 e 5,1 ºC, para uma *TDP* de 77 e 100 W, respectivamente. Ao contrário da solda, não há restrições quanto a espessura mínima para a pasta térmica, dependendo da viscosidade do *TIM* e da pressão imposta sobre o microprocessador.

Quanto a utilização do *Die* exposto, a temperatura máxima no *Die* foi de 9,7 a 11,9 ºC menor do que as observadas para a configuração com pasta térmica de 0,025 mm de espessura, para a *TDP* de 77 W. Para 100 W, essa diferença aumentou para 12,6 a 15,5 ºC. Também se observou que a diferença entra as temperaturas máximas e mínimas foi menor nessa configuração, resultando em uma distribuição mais homogênea.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arctic Silver. **“Arctic Silver® 5 High-Density Polysynthetic Silver Thermal Compound”**. Disponível em: http://www.arcticsilver.com/as5.htm. Acesso em 06/12/2017.

Corsair. **Imagem Corsair H100i**. Disponível em: http://www.corsair.com/en-us/hydro-series-h100i-extreme-performance-liquid-cpu-cooler. Acesso em 23/09/2017.

Deppisch, C. et al. **“The Material Optimization and Reliability Characterization of an Indium-Solder Thermal Interface Material for CPU Packaging”** Journal of Metals 58-67, 2006.

Deppisch, C. et al., inventor; INTEL CORPORATION, cessionário**. “Electronic assembly having an indium wetting layer on a thermally conductive body”.** United States patent US 7362580 B2. 2004, Jun 18.

Dow Corning. **“Dow Corning® TC-1996 Thermally Conductive Compound”**. Disponível em: http://www.casmoon.com/upfile/file/20141020/2014102020522923160.pdf. Acesso em 05/12/2017.

Frostyteh. **Imagem Saindia Cooler**. Disponível em: http://www.frostytech.com/articleview.cfm?articleID=2722. Acesso em 20/11/2017.

Gonçalves, N. D. F.; **“Método dos Volumes Finitos em Malhas Não-Estruturadas”**; Departamento de Matemática Aplicada, Universidade do Porto, Portugal, 2007.

Gopalakrishnan, T. R.; Aravindh B. S.; **“Heat Sink Performance Analysis through Numerical Technique”**; IEEE Symposium, Bangalore, India, 2008.

Hexus. **Imagem Dissipador AMD AM2.** Disponível em: http://hexus.net/tech/reviews/cooling/10581-got-pound50-spend-cpu-read-this/?page=2. Acesso em 23/09/2017

Incropera, F. P., DEWITT, D. P. **“Fundamentals of Heat and Mass Transfer”**. New York, J. Wiley, 2002.

Intel Corporation, **“Desktop 3rd Generation Intel® Core™ Processor Family, Desktop Intel® Pentium® Processor Family, Desktop Intel® Celeron® Processor Family, and LGA1155 Socket Thermal Mechanical Specifications and Design Guidelines (TMSDG)”**. 2013. Disponível em: https://www.intel.com/content/www/us/en/processors/core/3rd-gen-core-lga1155-socket-guide.html. Acesso em 04/10/2017.

Johnson, T. A. et al. **“Development of the Sandia Cooler”**. Albuquerque, Novo México. 2013. Disponível em: https://ip.sandia.gov/techpdfs/Development%20of%20Sandia%20Cooler%20SAND2013-10712.pdf. Acesso em 18/09/2017.

Maliska, C. R.; **“Transferência de Calor e Mecânica dos Fluídos Computacional”**. LTC; 1995.

Moore, G. E. “**Cramming more components onto integrated circuits**”. Electronics, pages 114– 17, Apr. 1965.

Noctua. **Imagem Noctua NH-D14**. Disponível em: http://noctua.at/en/nh-d14.html. Acesso em 23/09/2017.

Sankaranarayanan, K. **“Thermal Modeling and Management of Microprocessors***”.* 2009. 173f. Dissertação de Doutorado - University of Virginia, Charlottesville, 2009.

Techradar. **Imagem Processador Intel i5 3570K**. Disponível em: http://www.techradar.com/reviews/pc-mac/pc-components/processors/intel-core-i5-3570k-1077183/review/3. Acesso em 20/11/2017.

Tomshardware. **Imagem Dissipador Intel RCBF7-1156 DHA-A**. Dsponível em: http://www.tomshardware.com/answers/id-2542390/q6600-overclocked-good.html. Acesso em 23/09/2017

Wccftech. **“Intel’s Core-X Series ‘Skylake-X and Kabylake-X’ Will Not Be Using A Soldered Integrated Heat Spreader (IHS)”**. Disponível em: https://wccftech.com/intels-core-x-series-skylake-x-and-kabylake-x-will-not-be-using-soldered-integrated-heat-spreader-ihs/. Acesso em 23/09/2017.

APÊNDICE A – Análise de Malha

Tabela A.1 – Análise de Malha – Solda

Número de Elementos	Tmax [°C]	Erro [%]
23802	58,752	
34461	58,757	0,0085103
64119	58,758	0,0017019

Tabela A.2 – Análise de Malha – Pasta 0,025 mm

Número de Elementos	Tmax [°C]	Erro [%]
18782	60,642	
30400	60,647	0,0082451
73654	60,648	0,0016489

Tabela A.3 – Análise de Malha Pasta 0,05 mm

Número de Elementos	Tmax [°C]	Erro [%]
18782	62,586	
30400	62,59	0,0063912
73654	62,592	0,0031954

Tabela A.4 – Análise de Malha Pasta 0,05 mm

Número de Elementos	Tmax [°C]	Erro [%]
18782	66,472	
30400	66,476	0,0060176
73654	66,476	0

Tabela A.5 – Análise de Malha – Chip Exposto

Número de Elementos	Tmax [°C]	Erro [%)
101	49,053	
734	49,053	0
3138	49,053	0
18596	49,053	0

APÊNDICE B – Resultados para *TDP* de 77 W

Tabela B.6 – Resultados Solda – 77 W

Resistência [°C/W]	Tmax [°C]	Tmin [°C]	Tcase [°C]
0,5	74,5	66,8	**71,0**
0,45	70,6	63,0	**67,1**
0,4	66,7	59,1	**63,2**
0,35	62,7	55,3	**59,3**
0,3	58,8	51,4	**55,3**
0,25	54,8	47,6	**51,4**
0,2	50,7	43,7	**47,3**
0,15	46,6	39,9	**43,2**
0,1	42,3	36,0	**38,9**
0,05	37,5	32,0	**33,9**

Tabela B.7 – Resultados Pasta 0,025 mm – 77 W

Resistência [°C/W]	Tmax [°C]	Tmin [°C]	Tcase [°C]
0,5	76,4	69,0	**71,1**
0,45	72,4	65,1	**67,2**
0,4	68,5	61,3	**63,3**
0,35	64,6	57,5	**59,4**
0,3	60,6	53,6	**55,4**
0,25	56,7	49,8	**51,4**
0,2	52,6	45,9	**47,4**
0,15	48,5	42,1	**43,3**
0,1	44,2	38,2	**38,9**
0,05	39,4	34,2	**34,0**

Tabela B.8 – Resultados Pasta 0,05 mm – 77 W

Resistência [°C/W]	Tmax [°C]	Tmin [°C]	Tcase [°C]
0,5	78,3	72,4	**71,1**
0,45	74,4	68,6	**67,2**
0,4	70,5	64,8	**63,3**
0,35	66,5	60,9	**59,4**
0,3	62,6	57,1	**55,4**
0,25	58,6	53,2	**51,5**
0,2	54,6	49,4	**47,4**
0,15	50,5	45,5	**43,3**
0,1	46,2	41,6	**38,9**
0,05	41,4	37,5	**34,0**

Tabela B.9 – Resultados Pasta 0,075 mm – 77 W

Resistência [°C/W]	Tmax [°C]	Tmin [°C]	Tcase [°C]
0,5	82,2	75,7	**71,1**
0,45	78,3	71,9	**67,2**
0,4	74,4	68,1	**63,3**
0,35	70,4	64,2	**59,4**
0,3	66,5	60,4	**54,4**
0,25	62,5	56,5	**51,5**
0,2	58,4	52,7	**47,4**
0,15	54,3	48,8	**43,3**
0,1	50,0	44,9	**39,9**
0,05	45,2	40,8	**34,0**

Tabela B.10 – Resultados Chip Exposto – 77 W

Resistência [°C/W]	Tmax [°C]	Tmin [°C]
0,5	64,5	63,5
0,45	60,7	59,7
0,4	56,8	55,8
0,35	52,9	52,0
0,3	49,1	48,1
0,25	45,2	44,3
0,2	41,3	40,4
0,15	37,4	36,6
0,1	33,6	32,7
0,05	29,7	28,9

APÊNDICE C – Resultados para *TDP* de 100 W

Tabela C.11 – Resultados Solda – 100 W

Resistência [°C/W]	Tmax [°C]	Tmin [°C]	Tcase [°C]
0,5	89,4	79,3	84,8
0,45	84,4	74,3	79,8
0,4	79,2	69,3	74,7
0,35	74,1	64,3	69,6
0,3	68,9	59,3	64,4
0,25	63,7	54,3	59,3
0,2	58,5	49,3	54,0
0,15	53,1	44,3	48,6
0,1	47,5	39,3	43,0
0,05	41,2	34,1	36,6

Tabela C.12 – Resultados Pasta 0,025 mm – 100 W

Resistência [°C/W]	Tmax [°C]	Tmin [°C]	Tcase [°C]
0,5	91,9	82,1	**84,9**
0,45	86,8	77,1	**79,9**
0,4	81,7	72,1	**74,8**
0,35	76,6	67,1	**69,7**
0,3	71,4	62,2	**64,5**
0,25	66,2	57,2	**59,3**
0,2	60,9	52,2	**54,1**
0,15	55,6	47,2	**48,7**
0,1	50,0	42,1	**43,1**
0,05	43,7	36,9	**36,7**

Tabela C.13 – Resultados Pasta 0,05 mm – 100 W

Resistência [°C/W]	Tmax [°C]	Tmin [°C]	Tcase [°C]
0,5	94,3	86,6	**85,0**
0,45	89,2	81,6	**79,9**
0,4	84,1	76,6	**74,8**
0,35	79,0	71,6	**69,7**
0,3	73,9	66,6	**64,6**
0,25	68,7	61,6	**59,4**
0,2	63,5	56,6	**54,1**
0,15	58,1	51,6	**48,8**
0,1	52,6	46,5	**43,1**
0,05	46,3	41,3	**36,7**

Tabela C.14 – Resultados Pasta 0,075 – 100 W

Resistência [°C/W]	Tmax [°C]	Tmin [°C]	Tcase [°C]
0,5	99,5	90,9	**85,0**
0,45	94,4	85,9	**79,9**
0,4	89,3	80,9	**74,8**
0,35	84,2	75,9	**69,7**
0,3	79,0	70,9	**64,6**
0,25	73,8	65,9	**59,4**
0,2	68,5	60,9	**54,1**
0,15	63,2	55,9	**48,8**
0,1	57,6	50,8	**43,1**
0,05	51,3	45,5	**36,7**

Tabela C.15 – Resultados Chip Exposto – 100 W

Resistência [°C/W]	Tmax [°C]	Tmin [°C]
0,5	76,4	75,0
0,45	71,4	70,0
0,4	66,3	65,0
0,35	61,3	60,0
0,3	56,3	55,0
0,25	51,3	50,0
0,2	46,2	45,0
0,15	41,2	40,0
0,1	36,2	35,0
0,05	31,1	30,0