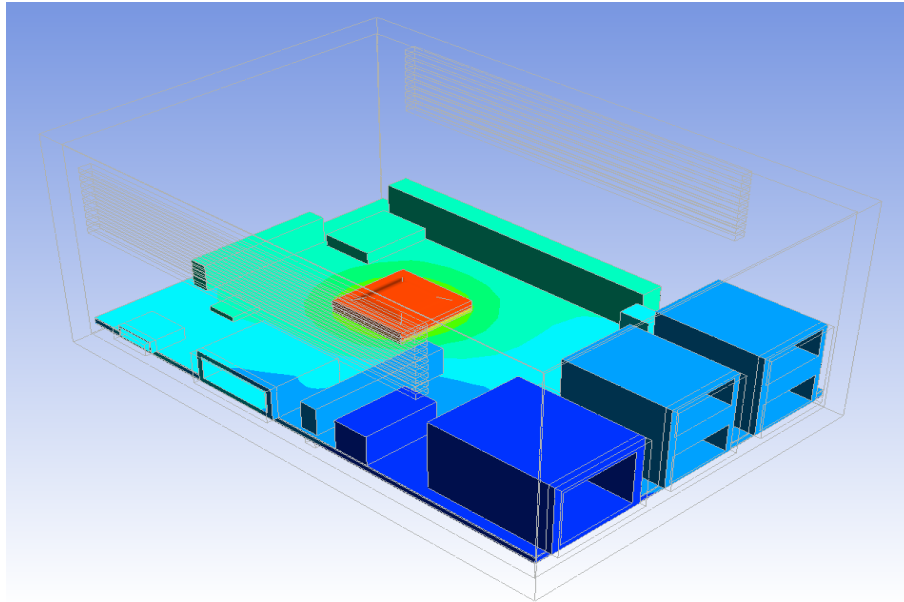




**ISEL**  
INSTITUTO SUPERIOR DE  
ENGENHARIA DE LISBOA

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Departamento de Engenharia Mecânica**



# **Projeto de Caixa Estanque para Gestão de Carga Térmica em Microeletrónica**

**EDUARDO GUIA**

(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Mecânica

Orientador:

Doutor Nelson Pereira Caetano Marques

Júri:

Presidente: Doutora Maria Teresa Oliveira Moura e Silva

Vogais: Doutora Cláudia Sofia Séneca da Luz Casaca

Doutor Nelson Pereira Caetano Marques

**Setembro de 2022**





**ISEL**  
INSTITUTO SUPERIOR DE  
ENGENHARIA DE LISBOA

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Departamento de Engenharia Mecânica**

# **Projeto de Caixa Estanque Para Gestão de Carga Térmica em Microeletrónica**

**EDUARDO GUIA**

(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Mecânica

*(2º Documento Provisório)*

Orientador:

Doutor Nelson Pereira Caetano Marques

Júri:

Presidente: Doutora Maria Teresa Oliveira Moura e Silva

Vogais: Doutora Cláudia Sofia Séneca da Luz Casaca

Doutor Nelson Pereira Caetano Marques

**Setembro de 2022**



# Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Nelson Marques, por propor o tema de trabalho, disponibilizar material e partilhar o seu conhecimento, aspetos estes indispensáveis para a realização deste trabalho.

Agradecer também à empresa *FDS blueCAPE*, pelo espaço e material disponibilizados, bem como a todos os seus colaboradores, pela ajuda prestada e simpatia.

Finalmente, um agradecimento especial à Joana Ferreira, aos meus pais, avós e irmã pelo seu apoio incondicional durante a realização deste trabalho.



# Resumo

A constante evolução da microeletrónica, bem como a tendência de construir equipamentos com cada vez menor volume e maior poder de processamento, faz com que surjam problemas na gestão da carga térmica dos SoC's (*system on a chip*) em situações nas quais que é necessário proteger os equipamentos dentro de uma caixa.

Este trabalho estuda o desempenho térmico de um Raspberry Pi 3b+, em várias situações, tentando criar uma caixa que potencie a transmissão de calor por convecção natural. Primeiramente, o equipamento foi testado sem caixa e foi elaborado um modelo *Computational Fluid Dynamics (CFD)* que represente bem o seu comportamento térmico. Deste modelo, foram deduzidas as potências térmicas dissipadas nos diversos componentes do Raspberry Pi 3b+.

Sabendo as potências térmicas dissipadas, testou-se o Raspberry Pi 3b+ dentro da caixa original, para perceber que problemas térmicos aparecem. No caso, o processador atinge a temperatura limite de 80°C e ativa um processo que limita a sua velocidade (*throttling*).

Para tentar resolver esse problema, desenvolveram-se mais duas caixas, Caixa P1 e Caixa P2. A Caixa P1 tem o mesmo volume que a caixa original, tendo-se apenas criado grelhas para promover a circulação do ar. Segundo as simulações, a Caixa P1, ainda não é capaz de evitar o *throttling* do processador, apesar de as temperaturas atingidas serem inferiores às atingidas com a caixa original. A Caixa P2, tem um volume superior, o que permite aumentar ainda mais a área das grelhas. Analisando os resultados, verifica-se que as temperaturas atingidas com esta caixa já evitam o *throttling* do processador.

Por fim, utilizou-se uma impressora 3D para imprimir a Caixa P2 e testou-se o seu desempenho, confirmando os dados obtidos via *CFD*.

**Palavras-chave** - *Edge Computing*, Raspberry Pi 3b+, desempenho térmico, transmissão de calor, convecção natural, *CFD*, prototipagem rápida, *SoC*.



# Abstract

The evolution of microelectronics and tendency to reduce equipment size while enhancing the processing power, originates problems managing the thermal load of SoC's (System on a Chip) in situations where it is necessary to protect the equipment inside an enclosure.

This work studies the thermal performance of a Raspberry Pi 3b+, in different conditions, trying to project a box that stimulates the heat transfer via natural convection. Firstly, the equipment was tested without a box and a CFD (Computational Fluid Dynamics) model, that accurately represents its thermal behaviour, was developed. The thermal power dissipated in the Raspberry Pi 3b+ components was determined from this model.

Knowing the power dissipated, the Raspberry Pi 3b+ was tested inside its original box, to understand what thermal problems appear. In this case, the processor reaches the limit temperature of 80°C and starts to throttle.

To try and solve that problem, two more boxes were developed, Box P1 and Box P2. Box P1 has the same volume as the original box, only being added to grids to promote air circulation. According to the simulation results, Box P1, still isn't capable of preventing throttling, although, the temperatures reached are lower than those reached using the original box. Box P2, has a bigger volume, which allows for bigger grid areas. Analysing results, it's confirmed that the temperatures reached prevent the processor from throttling.

Finally, Box P2 was 3D printed and tested, thus proving the CFD results.

**Keywords** - Edge Computing, Raspberry Pi 3b+, thermal performance, heat transfer, natural convection, CFD, rapid prototyping, SoC.



# Acrónimos

**BC** - *Boundary Conditions*, Condições de Fronteira

**BGA** - *Ball Grid Array*, Bolas Térmicas

**CFD** - *Computational Fluid Dynamics*, Mecânica de Fluidos Computacional

**CPU** - *Central Processing Unit*

**FEM** - *Finite Element Method*, Método dos Elementos Finitos

**IV** - Infravermelhos

**IdC** - *Internet das Coisas*

**JEDEC** - *Joint Electron Device Engineering Council*

**PCB** - *Printed Circuit Board*, Placa de Circuito Impresso

**PRESTO!** - *PREssure STaggering Option*

**RbP** - *Raspberry Pi*

**S2S** - *Surface to Surface*, Superfície a Superfície

**SoC** - *System on a Chip*, Sistema num Chip

**Ufill** - *Underfill*, Substrato

**VFM** - *Finite Volume Method*, Método dos Volumes Finitos



# Índice

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xv</b>
<b>1. Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2. Estado da Arte</b>	<b>4</b>
<b>3. Metodologia</b>	<b>9</b>
3.1. Equações Fundamentais . . . . .	9
3.1.1. Continuidade . . . . .	9
3.1.2. Momento . . . . .	9
3.1.3. Equação da energia . . . . .	10
3.1.4. Equações de transporte . . . . .	10
3.2. Discretização . . . . .	12
3.2.1. Discretização de Volumes Finitos . . . . .	12
3.2.2. Discretização Espacial . . . . .	14
3.2.3. Avaliação de Gradientes e Derivadas . . . . .	14
3.2.4. Discretização da Equação do Momento . . . . .	16
3.2.5. Esquemas de Interpolação para a Pressão . . . . .	16
3.2.6. Discretização da Equação da Continuidade . . . . .	16
3.2.7. Modelo $k \epsilon$ . . . . .	17
3.2.8. Tratamento do Escoamento nas Paredes . . . . .	18
3.2.9. Radiação . . . . .	21
<b>4. Validação da Metodologia</b>	<b>25</b>
4.1. Recolha de Dados Experimentais . . . . .	25
4.2. Preparação do Modelo . . . . .	27
4.2.1. Geometria Utilizada como Referência . . . . .	27
4.2.2. Geometria Desenvolvida . . . . .	30

4.2.3.	Geração de Malha . . . . .	32
4.2.4.	Testes de Malha . . . . .	34
4.2.5.	Simplificações ao Modelo . . . . .	36
4.3.	Simulação . . . . .	38
4.3.1.	Características do Ar . . . . .	38
4.3.2.	Condições de Fronteira . . . . .	40
4.3.3.	Emissividades . . . . .	42
4.3.4.	Testes de Sanidade . . . . .	43
4.4.	Análise de Resultados . . . . .	44
<b>5.</b>	<b>Desenvolvimento de uma Caixa Estanque para Gestão da Carga Térmica</b>	<b>48</b>
5.1.	Geometria do Raspberry Pi 3b+ . . . . .	48
5.2.	Ensaio do Raspberry Pi . . . . .	50
5.3.	Simulação Sem Caixa e Determinação das Potências Térmicas . . . . .	53
5.3.1.	<i>Setup da Simulação</i> . . . . .	53
5.3.2.	Determinação das Potências Térmicas . . . . .	55
5.3.3.	Validação da distribuição de temperaturas no <i>PCB</i> . . . . .	56
5.3.4.	Caracterização do Escoamento . . . . .	57
5.4.	Caixa Original . . . . .	58
5.4.1.	Simulação da Caixa Original . . . . .	60
5.5.	Proposta de Caixa nº 1 (Caixa P1) . . . . .	63
5.6.	Proposta de Caixa nº 2 (Caixa P2) . . . . .	65
5.7.	Impressão e Teste da Caixa P2 . . . . .	67
<b>6.</b>	<b>Conclusão</b>	<b>70</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>72</b>
·	<b>Anexo 1</b>	<b>74</b>
·	<b>Anexo 2</b>	<b>77</b>

. Anexo 3	79
. Anexo 4	81
. Anexo 5	83

## Lista de Figuras

1	Exemplo de um <i>SoC</i> . . . . .	2
2	Pacote de um <i>chip</i> esquematizado. . . . .	6
3	Diagrama de funcionamento do <i>Pressure-Based Coupled Algorithm</i> . . . . .	12
4	Exemplo de um volume de controlo a discretizar. . . . .	14
5	Esquema de avaliação dos centróides das células. . . . .	15
6	Camadas num escoamento turbulento próximo de uma parede. . . . .	19
7	Vista lateral do ambiente de teste (dimensões em mm). . . . .	26
8	Vista frontal do ambiente de teste (dimensões em mm). . . . .	26
9	Vista isométrica do ambiente de teste. . . . .	26
10	Camadas de um <i>PCB</i> do tipo 2s2p. . . . .	27
11	Representação de vias térmicas num <i>PCB</i> . . . . .	28
12	Geometria gerada pelo software <i>PACK</i> . . . . .	29
13	Dimensões do modelo gerado em <i>Solid Edge</i> . . . . .	31
14	Dimensões da tampa ( <i>Lid</i> ). . . . .	31
15	Geometria gerada no software <i>Solid Edge</i> . . . . .	32
16	Célula tetraédrica. . . . .	32
17	Célula hexaédrica. . . . .	32
18	Célula poliédrica. . . . .	32
19	Exemplo de uma malha hexaédrica distorcida. . . . .	34
20	Exemplo de uma malha poliédrica para o mesmo modelo. . . . .	34
21	Distribuição de temperaturas no <i>chip</i> com diferentes malhas . . . . .	35
22	Modelo de teste com todas as camadas. . . . .	37
23	Modelo de teste com resistência equivalente. . . . .	37
24	Distribuição de temperaturas no modelo de teste com todas as camadas. . . . .	38
25	Distribuição de temperaturas no modelo de teste com resistência equivalente. . . . .	38
26	Aproximação linear dos valores de condutividade térmica do ar para temperaturas entre os 273 K e os 473 K. . . . .	39

27	Viscosidade do ar em função da temperatura segundo a aproximação de Sutherland com três coeficientes. . . . .	40
28	Pluma de velocidades obtida. . . . .	44
29	Distribuição de temperaturas no topo da tampa. . . . .	45
30	Distribuição de temperaturas na junta do chip com a camada de substrato ( <i>underfill</i> ). . .	45
31	Distribuição de temperaturas na camada inferior do <i>PCB</i> . . . . .	45
32	Distribuição de temperaturas no modelo físico. . . . .	47
33	Dimensões, em mm, do Raspberri Pi 3b+. . . . .	49
34	Componentes do Raspberri Pi 3b+. . . . .	49
35	Modelo do Raspberri Pi 3b+ desenvolvido em <i>Solid Edge</i> . . . . .	50
36	Diagrama do ambiente do ensaio. . . . .	51
37	Montagem com cabos para o teste de desempenho sem caixa. . . . .	51
38	Montagem sem cabos para o teste de desempenho sem caixa. . . . .	51
39	Gráfico exportado pelo <i>software Stressberry</i> para o Raspberry Pi sem caixa. . . . .	52
40	Esquema das dimensões do domínio do fluido. . . . .	54
41	Malha utilizada para o Raspberry Pi. . . . .	55
42	Imagem de infravermelhos do Raspberry Pi em funcionamento. . . . .	57
43	Perfil de temperaturas obtido na simulação. . . . .	57
44	Vetores de velocidade na simulação do ensaio sem caixa (vista frontal). . . . .	57
45	Linhas de corrente na simulação do ensaio sem caixa (vista frontal). . . . .	57
46	Vetores de velocidade na simulação do ensaio sem caixa (vista lateral). . . . .	58
47	Linhas de corrente na simulação do ensaio sem caixa (vista lateral). . . . .	58
48	Caixa original disponível em <a href="https://www.filipeflop.com/produto/case-raspberry-pi/">https://www.filipeflop.com/produto/case-raspberry-pi/</a> . . .	59
49	Teste da caixa original com as entradas tapadas. . . . .	59
50	Gráfico exportado pelo <i>software Stressberry</i> para o Raspberry Pi na caixa original com as entradas tapadas. . . . .	60
51	Modelo da caixa original [26,2 mm x 91,1 mm x 61,5 mm]. <b>Anexo 1</b> . . . . .	61
52	Velocidade na zona do processador com a caixa original. . . . .	61
53	Velocidade na zona do processador com a caixa original em vetores. . . . .	61

54	Perfil de temperatura do ar dentro da caixa original na zona do processador. . . . .	62
55	Linhas de escoamento do ar no interior da caixa original. . . . .	62
56	Pluma ao redor da caixa original com o Raspberry Pi em funcionamento. . . . .	62
57	Geometria da caixa P1 [26,2 mm x 91,1 mm x 61,5 mm]. <b>Anexo 1</b> . . . . .	63
58	Velocidade na zona do processador com a caixa P1. . . . .	63
59	Velocidade na zona do processador com a caixa P1 em vetores. . . . .	63
60	Perfil de temperatura do ar dentro da caixa P1 na zona do processador. . . . .	64
61	Linhas de escoamento do ar no interior da caixa P1. . . . .	64
62	Pluma ao redor da caixa P1 com o Raspberry Pi em funcionamento. . . . .	64
63	Geometria da caixa P2 [44 mm x 91,1 mm x 61,5 mm]. <b>Anexo 1</b> . . . . .	65
64	Velocidade na zona do processador com a caixa P2. . . . .	65
65	Velocidade na zona do processador com a caixa P2 em vetores. . . . .	65
66	Perfil de temperatura do ar dentro da caixa P2 na zona do processador. . . . .	66
67	Linhas de escoamento do ar no interior da caixa P2. . . . .	66
68	Pluma ao redor da caixa P2 com o Raspberry Pi em funcionamento. . . . .	66
69	Adaptação para impressão 3D. . . . .	67
70	Caixa P2 impressa. . . . .	68
71	Teste da caixa P2. . . . .	68
72	Gráfico exportado pelo <i>software Stressberry</i> para o Raspberry Pi na caixa P2 com as entradas tapadas. . . . .	69

## Lista de Tabelas

1	Dimensão das vias térmicas em função do passo do <i>BGA</i> [11]. . . . .	28
2	Espessuras e condutividades térmicas dos materiais utilizados no PCB e no módulo. . . .	29
3	Parâmetros da malha utilizada nas simulações. . . . .	35
4	Parâmetros da malha refinada. . . . .	35
5	Propriedades do ar a diferentes temperaturas. . . . .	42
6	Temperaturas máximas atingidas em cada parte do modelo. . . . .	46
7	Erros relativos. . . . .	46
8	Valores de temperaturas nos diferentes elementos do Raspberry Pi recolhidos experi- mentalmente. . . . .	53
9	Resultados da simulação sem caixa. . . . .	55

# 1. Introdução

A evolução tecnológica no ramo da eletrônica, têm havido descobertas e inovações revolucionárias, não só para a indústria, como também para o dia a dia da população. Desde os computadores caseiros que já são quase indispensáveis na rotina de muita gente, aos telemóveis, tem-se notado uma tendência em reduzir as dimensões dos componentes eletrônicos à medida que também se aumenta a sua capacidade, seja ela de processamento ou de armazenamento. Esta tendência dá então origem à microeletrônica. Com a evolução do paradigma da internet das coisas, permite transmitir informação de equipamento para equipamento sem que seja necessário contacto direto entre equipamentos, torna-se interessante o desenvolvimento de microcontroladores, dispositivos que permitem, receber, processar e emitir informação podendo assim controlar outros equipamentos remotamente. Surge também o paradigma do *Edge Computing* que se baseia em processar e tratar dados no local onde estes são recolhidos, reduzindo assim o tempo entre o sinal inicial e uma eventual atuação por parte do microcontrolador.

Em ambientes hostis, esta capacidade de processamento mais elevada juntamente com a redução do volume físico dos equipamentos, pode criar problemas na gestão da carga térmica. Em determinadas atuações, é necessário proteger os microcontroladores, diminuindo assim o seu potencial de troca de calor com o ambiente. Este trabalho surge com o objetivo de desenvolver uma caixa para um *SoC (System on a Chip)*, protegendo-o de eventuais hostilidades no ambiente de trabalho e não comprometendo o seu bom funcionamento.

São já conhecidas várias formas de gerir cargas térmicas em equipamentos eletrônicos [1]. Nos computadores domésticos, é comum utilizar dispositivos de convecção forçada ou até mesmo sistemas de arrefecimento a água [2]. Este tipo de abordagem tem vantagens claras quando se trata de eficiência no arrefecimento, no entanto, ambas requerem um maior consumo energético (para ativar motores elétricos, bombas, etc.) e um maior espaço disponível para colocar os equipamentos junto às fontes de calor onde têm que atuar. Juntando a estes dois fatores o investimento inicial para adquirir estes equipamentos, rapidamente se podem tornar soluções pouco atrativas, ou completamente inviáveis, em certas aplicações de microeletrônica, onde o objetivo de aplicação não justifique tais investimentos. Outra solução, com provas dadas, é a utilização de dissipadores de calor (*heat sink*). Os dissipadores de calor são, normalmente, blocos de um material com elevada condutividade térmica, que se colocam em contacto com as



Figura 1: Exemplo de um *SoC*.

Fonte: <https://www.thebrandofben.com/projects/magic-mirror/> (acedido em 28/09/2022)

fontes térmicas de forma a que o calor possa ser transmitido e não se concentre na fonte térmica. Muitas vezes utilizam-se dissipadores com alhetas que aumentam a superfície de contacto com o ar, permitindo assim um arrefecimento dos componentes ainda mais eficiente. Uma das desvantagens da utilização destes equipamentos é que, normalmente, são mais dispendiosos de adquirir. São geralmente feitos de materiais metálicos e, portanto, em situações mais específicas pode não existir no mercado dissipadores com as dimensões ou características necessárias para um determinado componente.

Com a evolução de tecnologias como a impressão 3D e a sua acessibilidade, cada vez mais elevada, ao público comum, surge uma oportunidade de estudar eventuais soluções para este tipo de problemas térmicos, acessíveis a serem manufaturadas com este tipo de tecnologia.

Este trabalho pretende então estudar e avaliar o desempenho térmico de um Raspberry Pi 3b+, quando inserido no interior de uma caixa estanque e, posteriormente, elaborar uma solução que melhore esse seu desempenho térmico, sem recorrer a dispositivos exteriores à própria caixa para o arrefecimento do dispositivo. Obrigando assim a elaborar uma solução que destaque o arrefecimento por convecção natural.

Foi testado o desempenho térmico do Raspberry Pi, num ambiente a uma temperatura controlada e sem correntes de ar, onde se irá carregar o seu processador e recolher as temperaturas dos seus componentes. Comparando estes valores a um modelo *CFD* do equipamento, serão estimadas as potências

térmicas dissipadas por cada um dos seus componentes.

Após ter os valores de potências dissipadas em cada um dos componentes, será testado o Raspberry Pi no interior da sua caixa original, e verificar que problemas possam existir. De seguida serão então elaboradas duas caixas com o objetivo de melhorar o desempenho térmico da primeira. Estas duas caixas serão primeiro testadas em *CFD* de onde se iram retirar soluções sobre qual das soluções apresenta um melhor desempenho. Por fim, será utilizada uma impressora 3D (Anexo 5) para imprimir a caixa com melhor desempenho térmico. Essa caixa será testada nas mesmas condições em que se testou inicialmente a caixa original, para que se possa verificar a validade da solução obtida com a metodologia de simulação.

## 2. Estado da Arte

Como já abordado na introdução, existem vários desafios, em termos de gestão de carga térmica que surgem à medida que avançam as técnicas de *Edge Computing*. Uma das ferramentas mais utilizadas para realizar análises térmicas, é o *Computational Fluid Dynamics (CFD)*. *CFD*, é uma das vertentes da mecânica de fluidos onde se faz uso de métodos numéricos para resolver problemas de escoamentos de fluidos, incluindo todos os aspetos que afetam estes escoamentos, como por exemplo, a transmissão de calor. Na base da resolução destes problemas estão, normalmente, as equações de *Navier-Stokes*, equações estas que são resolvidas numericamente recorrendo a computadores que realizam os cálculos necessários para descrever o comportamento de fluidos sujeitos às condições de fronteira pretendidas.

Qualquer simulação CFD pode ser dividida em três fases, pré-processamento, cálculo e pós-processamento. No pré-processamento desenvolve-se a geometria e dividem-se tanto os volumes de sólidos como de fluidos em células discretas (malha), estabelece-se ainda quais os modelos físicos a utilizar bem como as condições de fronteira do sistema. Durante o cálculo o computador realiza os cálculos necessários de forma iterativa até se obter uma solução. No pós-processamento, analisam-se os resultados da simulação. Estes resultados podem ser validados através de um método experimental ou recriando casos de teste com resultados já conhecidos.

Em [3], 1991, os autores realizam um estudo no âmbito de desenvolver um método numérico que permita prever a influência das opções de design na temperatura atingida num equipamento de microeletrónica arrefecido por convecção natural. Na altura deste estudo já surgiam preocupações com o aumento da densidade dos circuitos de microeletrónica. Até então, era possível utilizar soluções com base na convecção natural para garantir que os equipamentos funcionam às temperaturas recomendadas, no entanto, o aumento de densidade de circuitos poderia originar problemas térmicos. Para tentar prevenir este problema era importante desenvolver um método para prever o desempenho térmico destes equipamentos sem que fosse necessário recorrer a ensaios experimentais. Os autores utilizaram um método conjugado que utiliza soluções analíticas aproximadas para a camada limite e um método de volumes finitos para o sólido. Foi ainda desprezada a variação de temperatura na direção da espessura da placa tendo o problema sido abordado como um problema 2D. Estas duas soluções foram então conjugadas utilizando um método iterativo permitindo calcular um perfil de temperaturas na interface sólido líquido. Concluiu-se

então que os parâmetros de design possíveis de ser controlados que causam maior impacto no desempenho térmico em equipamentos de microeletrónica são a condutividade térmica do *PCB (Printed Circuit Board)*, impedindo assim que a condução seja desprezada neste tipo de estudos.

Em [4], 1999, os autores analisam os resultados obtidos, através de um modelo CFD comparando-os a um método experimental onde se recolhem os valores de temperatura através de termografia (infravermelhos) [5]. Neste artigo, os autores simplificam os modelos de forma a não exceder as capacidades computacionais da época e resolvem o problema de transmissão de calor, por condução, separadamente da transmissão de calor por convecção natural. Mesmo com as limitações acima descritas, os resultados apontam para diferenças inferiores a 5 °C, quando comparado com ensaios experimentais, nos casos com geometrias mais simples, o que desde logo aponta para o elevado potencial dos métodos computacionais na descrição deste tipo de problemas.

Em [6], 2006, os autores estudam a hipótese de melhorar a transferência de calor em microeletrónica por convecção, colocando placas vibratórias nas redondezas dos componentes. Para este estudo foram feitas simulações numéricas bidimensionais. O modelo era composto por duas fontes térmicas montadas numa placa vertical. Criaram-se quatro casos de estudo com diferentes posições para as placas vibratórias. Adicionalmente, estudou-se também o efeito de ter um espaço entre as duas fontes térmicas que permita cruzar os fluxos de ar na parte superior e inferior da placa. Concluiu-se que estes métodos poderiam causar um aumento da transferência de calor até 70% face a um caso apenas com convecção natural pura.

Em [7], 2007, desenvolveu-se um *software* em *Python (PACK)*, que permite modelar, gerar e exportar uma malha de um *PCB* para o *software Ansys FLUENT*. Este tipo de *software* facilita o processo de modelação de *PCB's*, que geralmente pode gerar problemas devido às várias camadas de diferentes materiais bem como caminhos de cobre que os constituem. Este *software* faz simplificações à geometria que, como comprovado em [8], [9] e [10], servem como boa aproximação da realidade. O *software* modela as diferentes camadas constituintes do *PCB* como camadas homogéneas com uma espessura indicada pelo utilizador. Isto inclui camadas como o *BGA (Ball Grid Array)*, que, na realidade, são pequenas esferas. Este método modela estes componentes como uma camada uniforme de material, com uma resistência térmica equivalente calculada fazendo a soma com as resistências em paralelo dos dois materiais com que está em contacto. Para as pontas de solda (C4) considerou-se o mesmo método para

o cálculo da resistência térmica equivalente.

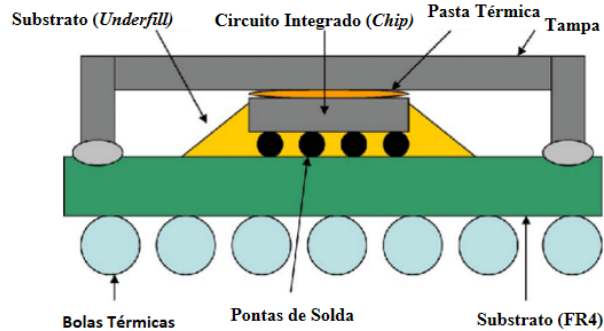


Figura 2: Pacote de um *chip* esquematizado.

Fonte: [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-a-flip-chip-package-with-C4-joint-forming-the-FLI-IHS-or-lid-is-an\\_fig2\\_224208849](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-a-flip-chip-package-with-C4-joint-forming-the-FLI-IHS-or-lid-is-an_fig2_224208849) (acedido em 28/09/2022)

Em [11], 2000, a organização *JEDEC (Joint Electron Device Engineering Council)*, que estabelece várias normas de ensaios para a indústria da microeletrônica, lançou uma norma [11] onde define dimensões para *PCB*'s a serem testados termicamente. O tamanho do *PCB* está diretamente relacionado com as dimensões do *chip*. Adicionalmente, esta norma dá indicações sobre o design do *PCB* (número de camadas), vias de cobre e design do BGA.

A norma JEDEC [12], 2008, vem complementar a anterior. Estabelecendo, desta feita, critérios sobre como deve ser feito um ensaio de carga térmica a um *PCB*. Esta norma dá indicações sobre: a temperatura ambiente a que deve ser feito o ensaio; o dimensionamento da caixa que irá servir como ambiente de teste; o método de fixação do *PCB*; materiais a utilizar; como e onde deverá ser feita a recolha das temperaturas; cuidados a ter em função das potências térmicas dissipadas durante os ensaios e, por fim, testes de verificação de uma boa montagem do ensaio.

Com estas normas como guia, surgem trabalhos com o objetivo de validar modelos CFD utilizando os resultados obtidos experimentalmente. Em [8] e [9], é feito um estudo com o objetivo de validar uma metodologia CFD que consiga prever de forma precisa a distribuição de temperaturas num *PCB*. Foram realizados ensaios experimentais com base nas normas [11] e [12], tendo esses valores, modelou-se um *PCB* e um *chip* utilizando o software *PACK*. A metodologia utilizada resume-se em três passos sendo eles:

Passo 1: Resolver o problema de condução de forma isolada através do *software Ansys APDL* e utilizando para primeira iteração um coeficiente de convecção uniforme.

Passo 2 (Caso a e caso b):

Caso a (CFD): Utilizando o *Ansys FLUENT*, simula-se o escoamento do ar utilizando os resultados do primeiro passo como condição de fronteira nas paredes do *PCB*.

Caso b (Formulas empíricas): Utiliza-se a distribuição de temperaturas obtidas no passo 1 para calcular de forma empírica os valores dos coeficiente de convecção em cada elemento.

Passo 3: Cria-se um ciclo de iterações dos passos anteriores até que a solução convirja. Para uma potência de 10 W, o critério de convergência utilizado foi o seguinte:

$$|T_{max_n} - T_{max_{n-1}}| \leq 0.2K \quad (1)$$

Onde n corresponde ao número de iterações.

Em [8], conclui-se que, com o método CFD obtêm-se valores dos coeficientes de convecção e, consequentemente, valores de temperaturas mais próximos dos obtidos experimentalmente comparativamente aos obtidos com método das fórmulas empíricas. Estes resultados comprovam a eficácia dos métodos CFD na resolução deste tipo de problemas. Com este tipo de aproximação foi possível obter temperaturas com um erro inferior a 1 °C face aos resultados experimentais.

Em [9], uma malha mais refinada permite concluir que o coeficiente de convecção no *PCB* é superior ao da tampa do *chip* uma vez que a superfície de contacto com o ar é significativamente maior no *PCB* que na tampa do *chip*. Este estudo conclui também que a radiação apresenta um papel indispensável na modelação de problemas de aquecimento em microeletrónica. Por fim conclui-se que uma malha refinada tem uma papel importante no grau de precisão dos resultados obtidos em estudos desta natureza, no entanto, para realizar estudos de alta resolução, as exigências computacionais são maiores. Cabe ao utilizador fazer o balanço indicado entre precisão nos resultados e recursos utilizados para o problema em estudo.



## 3. Metodologia

### 3.1. Equações Fundamentais

Este capítulo descreve sucintamente as equações nas quais se baseiam as simulações efetuadas. Este trabalho, à semelhança de todos os trabalhos *CFD*, utiliza como base três equações fundamentais: continuidade, momento e conservação de energia. Este capítulo, descreve essas equações e ainda os modelos complementares necessários para uma descrição apurada do sistema a estudar (por ex. turbulência).

#### 3.1.1. Continuidade

A equação da continuidade, ou conservação de massa, é a seguinte [13] :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (2)$$

Onde  $\rho$  é a massa volúmica do fluido e  $\vec{v}$  é o vetor da velocidade. A equação (2) é a forma geral da equação da continuidade e é válida para escoamentos incompressíveis e compressíveis. O termo  $S_m$  é a massa adicionada à fase continua através de outra fase ou de uma fonte definida pelo utilizador.

#### 3.1.2. Momento

A equação do momento é a seguinte [13]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\bar{\tau}}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3)$$

Onde  $p$  é a pressão estática,  $\bar{\bar{\tau}}$  é o tensor das tensões e  $\rho \vec{g}$  e  $\vec{F}$  são as forças gravitacionais e externas, respetivamente, aplicadas ao fluido.  $\vec{F}$  tem em conta termos fonte referentes ao modelo, bem como fontes definidas pelo utilizador.

O tensor tensão é definido por:

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} \bar{\bar{I}}] \quad (4)$$

Onde  $\mu$  é a viscosidade molecular,  $\bar{\bar{I}}$  é o tensor unitário e o segundo termo do lato direito é o efeito da dilatação do volume.

### 3.1.3. Equação da energia

A equação da energia na sua forma geral, é a seguinte [13]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + \rho)) = \nabla \cdot (k \nabla T + (\bar{\tau} \cdot \vec{v})) + S_h \quad (5)$$

Onde  $k$  é condutividade térmica. Os dois primeiros termos do lado direito da equação representam a energia transferida por condução e dissipação viscosa, respetivamente.  $S_h$  inclui o calor de reações químicas e outras fontes de calor volumétricas definidas pelo utilizador.

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (6)$$

Onde  $p$  é a pressão e, para gases perfeitos, a entalpia sensível é definida por

$$h = \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (7)$$

O valor de referência utilizado para  $T_{ref}$  depende dos modelos e algoritmos escolhidos. Utilizando um algoritmo do tipo *pressure based*  $T_{ref} = 298,15$  K.

### 3.1.4. Equações de transporte

As equações de transporte para este modelo são as seguintes [13]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j}] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (8)$$

e

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}] + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon \quad (9)$$

Onde:

$$C_1 = \max[0, 4.3; \frac{\eta}{\eta+5}], \eta = S_\epsilon^k, S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$$

Nestas equações  $G_k$  representa a geração de energia cinética turbulenta devido aos gradientes de velocidade e pode ser definido por:

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (10)$$

$G_b$  é a geração de energia cinética turbulenta devido à impulsão e é definido por:

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (11)$$

Onde  $Pr_t$  é o número de Prandtl turbulento e  $g_i$  é a componente gravitacional em forma de vetor na direção  $i$ . O coeficiente de expansão térmica  $\beta$  é definido por:

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P \quad (12)$$

Para gases ideais é possível reduzir a equação (11) à seguinte forma:

$$G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho Pr_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (13)$$

A constante  $C_{3\epsilon}$  determina o efeito das forças de impulsão em  $\epsilon$  e é dada por:

$$C_{3\epsilon} = \tanh \left| \frac{\nu}{u} \right| \quad (14)$$

Onde  $\mu$  é a componente de velocidade paralela ao vetor gravitacional e  $u$  é a componente de velocidade perpendicular ao vetor gravitacional.  $C_{3\epsilon}$  toma o valor de 1 se a principal direção do escoamento estiver alinhada com a direção da gravidade e, toma o valor de 0 caso a principal direção do escoamento seja perpendicular ao vetor da gravidade.

$Y_M$  representa a contribuição da variação de volume em escoamentos compressíveis. Esta variável é muitas vezes desprezada em escoamentos incompressíveis. Este valor pode ser incluído na equação  $k$  [3.2.7] sendo calculado da seguinte forma:

$$Y_M = 2\rho\epsilon M_t^2 \quad (15)$$

Onde  $M_t$  é o número de Mach em regime turbulento dado por:

$$M_t = \sqrt{\frac{k}{a^2}} \quad (16)$$

Onde  $a$  ( $= \sqrt{\gamma RT}$ ) é a velocidade do som.

$C_2$  e  $C_1$  são constantes.  $\sigma_k$  e  $\sigma_\epsilon$  são os números de Prandtl turbulentos para  $k$  e  $\epsilon$ , respetivamente.  $S_k$  e  $S_\epsilon$  são termos de fonte definidos pelo utilizador.

## 3.2. Discretização

Para obter uma solução será utilizado o algoritmo *Pressure-Based Coupled Solver*. Este algoritmo resolve, em forma de sistema de equações, as equações de momento e continuidade, de onde irá extrair um valor de caudal mássico. Com esse valor resolve agora as equações da energia, espécies turbulência e outras equações escalares. Após estes cálculos verifica-se se os critérios de convergência já se encontram cumpridos, caso contrário, repete-se o processo. Este processo pode então ser esquematizado da seguinte maneira [13].

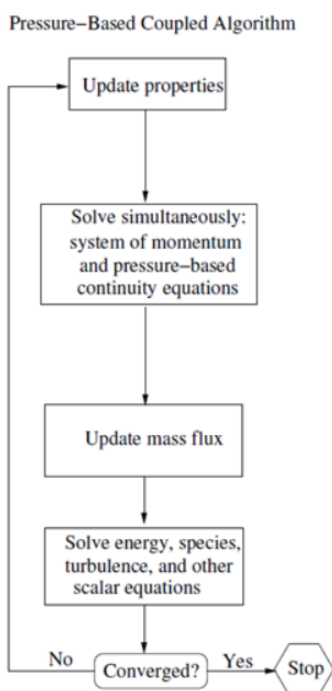


Figura 3: Diagrama de funcionamento do *Pressure-Based Coupled Algorithm*.

Fonte: Guia teórico do *Ansys Fluent* [13].

### 3.2.1. Discretização de Volumes Finitos

O *Ansys FLUENT*, utiliza o método dos volumes finitos (VFM). Este método analisa equações diferenciais como (5) ou (2) em equações escalares que podem ser resolvidas numericamente. De forma a ser aplicado este método, divide-se o domínio em vários volumes de controlo sendo que são guardados os valores das variáveis no centróide desse volume. Esses valores são calculados integrando as

equações diferenciais apresentadas em **3.1.**, sendo que os restantes valores desse volume de controlo são interpolados tendo em conta os valores dos volumes de controlo adjacentes.

Para um caso geral transiente e considerando um volume de controlo qualquer, a integração da equação de movimento integrada toma a seguinte forma [13]:

$$\underbrace{\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV}_{\text{Transiente}} + \underbrace{\oint \rho \phi \vec{v} \cdot d\vec{A}}_{\text{Convecção}} = \underbrace{\oint \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\vec{A}}_{\text{Difusão}} + \underbrace{\int_V S_\phi dV}_{\text{Fonte}} \quad (17)$$

Onde:

$\rho$  = massa volúmica;

$\vec{v}$  = vetor da velocidade;

$\vec{A}$  = Área vetorial;

$\Gamma_\phi$  = Coeficiente de difusão para  $\phi$ ;

$\nabla \phi$  = Gradiente de  $\phi$ ;

$S_\phi$  = Fonte de  $\phi$  por unidade de volume;

Aplicando esta fórmula a uma determinada célula de malha obtém-se:

$$\underbrace{\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} V}_{\text{Transiente}} + \underbrace{\sum_f^{N_{\text{Faces}}} \rho_f \vec{v}_f \phi_f \cdot \vec{A}_f}_{\text{Convecção}} = \underbrace{\sum_f^{N_{\text{Faces}}} \Gamma_\phi \nabla \phi_f \cdot \vec{A}_f}_{\text{Difusão}} + \underbrace{S_\phi V}_{\text{Fonte}} \quad (18)$$

Onde:

$N_{\text{Faces}}$  = número de faces da célula;

$\phi_f$  = valor de  $\phi$  transportado pela face  $f$ ;

$\rho_f \vec{v}_f \cdot \vec{A}_f$  = Caudal mássico pela face  $f$ ;

$\vec{A}_f$  = área da face  $f$ ;

$\nabla \phi_f$  = Gradiente de  $\phi$  na face  $f$ ;

$V$  = Volume da célula;

Neste caso o termo  $\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} V$  representa a discretização temporal.

O problema será analisado em regime estacionário, e como tal o termo transiente não voltará a ser abordado.

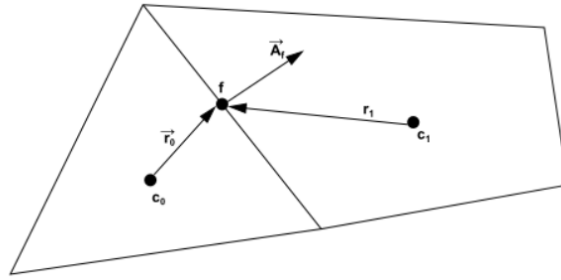


Figura 4: Exemplo de um volume de controle a discretizar.

Fonte: Guia teórico do *Ansys Fluent* [13].

### 3.2.2. Discretização Espacial

Por defeito, o *Ansys Fluent* guarda valores discretos do escalar  $\phi$  no centróide das células, no entanto são necessários valores nominais de  $\phi_f$  para resolver o termo de convecção na equação (18). É então necessário interpolar esses valores, tendo sido utilizado um esquema *upwind* de segunda ordem.

Um esquema *upwind* com uma precisão de segunda ordem é obtido utilizando uma expansão da série de Taylor. Os valores de  $\phi_f$  são então calculados com a seguinte fórmula [13]:

$$\phi_f = \phi + \nabla\phi \cdot \vec{r} \quad (19)$$

Onde  $\phi$  e  $\nabla\phi$  são o valor no centro da célula anterior (*upstream*) e o gradiente nessa mesma célula, respetivamente.  $\vec{r}$  é deslocamento do centróide da célula anterior à face da célula.

### 3.2.3. Avaliação de Gradientes e Derivadas

Os gradientes não são apenas utilizados para calcular os valores de  $\phi$  nas faces das células. Os gradientes,  $\nabla\phi$  de uma determinada variável,  $\phi$ , são utilizados para discretizar os termos de convecção e difusão na equação de conservação. Neste problema utilizou-se o método de cálculo "*Least Squares Cell- Based*" para calcular os gradientes. Este método assume que a solução varia de forma linear entre células. Essa variação é calculada recorrendo à seguinte expressão [13]:

$$(\nabla\phi)_{c0} \cdot \partial r_i = (\phi_{ci} - \phi_{c0}) \quad (20)$$

Aplicando a mesma fórmula para todas as células em fronteira com  $c0$ , obtém-se o seguinte sistema:

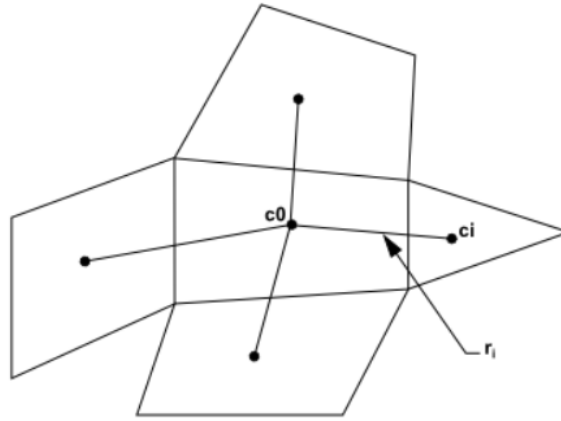


Figura 5: Esquema de avaliação dos centróides das células.

Fonte: Guia teórico do *Ansys Fluent* [13].

$$[J](\nabla\phi)_{c0} = \partial\phi \quad (21)$$

Onde  $[J]$  é uma matriz de coeficientes inteiramente dependente da geometria. O objetivo é resolver o gradiente da célula  $\phi_0$  ( $\nabla\phi_0 = \phi_{i,x}\hat{i} + \phi_{i,y}\hat{j} + \phi_{i,z}\hat{k}$ ). É possível decompor a matriz de coeficientes utilizando o processo de *Gram-Schmidt* [14] obtendo-se uma matriz de "pesos" para cada célula. São então produzidos três componentes de "pesos" para cada face da célula  $c0$  ( $W_{i0}^x, W_{i0}^y, W_{i0}^z$ ).

O gradiente no centro da célula é então calculado multiplicando os fatores de "peso" pelo vetor diferença  $\partial\phi = (\phi_{c1} - \phi_{c0})$ , obtendo-se:

$$(\phi_x)_{c0} = \sum_{i=1}^n W_{i0}^x \cdot (\phi_{c_i} - \phi_{c0}) \quad (22)$$

$$(\phi_y)_{c0} = \sum_{i=1}^n W_{i0}^y \cdot (\phi_{c_i} - \phi_{c0}) \quad (23)$$

$$(\phi_z)_{c0} = \sum_{i=1}^n W_{i0}^z \cdot (\phi_{c_i} - \phi_{c0}) \quad (24)$$

A precisão deste método em células distorcidas é comparável à dos restantes com exceção do método *cell-based gradient* que tem uma precisão muito inferior. No entanto, o método *Least Squares Cell-Based* requer um poder de cálculo inferior, sendo assim o mais adequado para este trabalho.

### 3.2.4. Discretização da Equação do Momento

A equação do momento na sua forma integral é a seguinte [13]:

$$\oint \rho \vec{v} \vec{v} \cdot d\vec{A} = - \oint p I \cdot d\vec{A} + \oint \bar{\tau} \cdot d\vec{A} + \int_V \vec{F} dV \quad (25)$$

Onde  $I$  é a matriz intensidade,  $\bar{\tau}$  é o tensor tensão e  $\vec{F}$  é o vetor da força.

É utilizado o mesmo esquema de discretização apresentado em 3.2.2.. Podendo obter, por exemplo, a equação do momento em  $x$  utilizando  $\phi = u$ :

$$a_p u = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb} + \sum p_f A \cdot \hat{i} + S \quad (26)$$

Caso sejam conhecidos o campo de pressões e os caudais mássicos, é possível obter um campo de velocidades com esta equação. No entanto, estes valores não são conhecidos e, portanto, precisam de ser calculados como parte da solução. É então necessário utilizar um esquema de interpolação para a pressão.

### 3.2.5. Esquemas de Interpolação para a Pressão

Sendo este um problema de convecção natural, é recomendado em [13] que se utilize um esquema de interpolação "PRESTO!" (*PREssure STaggering Option*). Este esquema utiliza uma grelha escalonada o que permite calcular os valores de pressão nas faces do volume de controlo, dispensando a interpolação que seria necessário realizar caso se utilizasse o valor de pressão no centróide.

### 3.2.6. Discretização da Equação da Continuidade

A equação da continuidade na sua forma de integral é a seguinte [13]:

$$\oint \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (27)$$

Integrando esta equação num determinado volume de controlo obtém-se a seguinte expressão:

$$\sum_f^{N_{faces}} J_f A_f = 0 \quad (28)$$

Onde  $J_f$  é o caudal mássico através da face  $f$ ,  $\rho v_n$ .

Para poder avançar, é necessário relacionar os valores de velocidade nas faces da célula,  $\vec{v}_n$  com os valores de velocidade no centroíde da célula. Os valores de velocidade nas faces das células são calculados utilizando uma aproximação com base na equação do momento, utilizando os coeficientes,  $a_p$  da equação (26). Pode então escrever-se  $J_f$  da seguinte maneira:

$$J_f = \rho_f \frac{a_{p,c0} v_{n,c0} + a_{p,c1} v_{n,c1}}{a_{p,c0} + a_{p,c1}} + d_f((p_{c0} + (\nabla p)_{c0} \cdot \vec{r}_0) - (p_{c1} + (\nabla p)_{c1} \cdot \vec{r}_1)) \quad (29)$$

$$= \hat{j}_f + d_f(p_{c0} - p_{c1})$$

Onde  $p_{c0}, p_{c1}$  e  $v_{n,c0}, v_{n,c1}$  são, respetivamente, as pressões e as velocidades normais entre duas células em cada lado da face.  $\hat{j}_f$  contém a influência das velocidades nestas células. O termo  $d_f$  é uma função de  $\bar{a}_p$ , sendo este a média dos coeficientes  $a_p$  na equação do momento em cada lado da face  $f$ .

### 3.2.7. Modelo $k-\epsilon$

O *Ansys Fluent* apresenta três principais modelos  $k-\epsilon$ , sendo eles: *standard*, *RNG* e *Realizable*. Todos estes métodos têm formas semelhantes de tratar a equação de transporte [3.1.4]. As principais diferenças são:

- O método de calcular a viscosidade turbulenta
- Os números de Prandtl turbulentos que irão entrar no termo de difusão de  $k$  e  $\epsilon$
- A geração e destruição dos termos na equação de  $\epsilon$

Neste trabalho utilizou-se o modelo "*Realizable k- $\epsilon$* ". O termo "*realizable*" significa que o modelo satisfaz certas limitações matemáticas ao resolver as tensões de *Reynolds*, mantendo-se consistente com a física de escoamentos turbulentos. Para o modelo "*realizable k- $\epsilon$* " o valor default de  $Pr_t$  é de 0,85.

Neste modelo a viscosidade turbulenta é modelada como [13]:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (30)$$

Sendo que neste modelo,  $C_\mu$  não é uma constante sendo calculado com:

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_S \frac{kU^*}{\epsilon}} \quad (31)$$

Onde:

$$U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}} \quad (32)$$

e

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\epsilon_{ijk}\omega_k\Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \epsilon_{ijk}\omega_k \quad (33)$$

Onde  $\bar{\Omega}_{ij}$  é o tensor taxa de rotação média visto num referencial móvel com uma velocidade angular de  $\omega_k$ . As constantes desta fórmula são,  $A_0 = 4,04$ ,  $A_s = \sqrt{6}\cos\phi$ . Onde:

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{1}{3}\cos^{-1}(\sqrt{6}W) \\ W &= \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}^3} \\ \tilde{S} &= \sqrt{S_{ij}S_{ij}} \\ S_{ij} &= \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) \end{aligned} \quad (34)$$

As constantes deste modelo são então:

$$C_{1\epsilon} = 1,44; C_2 = 1,9; \sigma_k = 1,0; \sigma_\epsilon = 1,2$$

### 3.2.8. Tratamento do Escoamento nas Paredes

As paredes do modelo têm sempre uma influência relevante no escoamento. O campo de velocidades é afetado pelas paredes tendo que, em zonas de contacto com as mesmas, cumprir as condições de não escorregamento. No entanto, as paredes afetam o escoamento de outras formas, não tão triviais como as referidas. O amortecimento viscoso reduz as flutuações de velocidade tangencial, no entanto, na parte exterior de uma região próxima de uma parede (*near wall region*) a turbulência aumenta rapidamente devido à produção de energia cinética proveniente de altos gradientes de velocidade média.

Em determinados casos, a modelação nas regiões próximas de paredes pode ter um impacto determinante na fiabilidade das simulações numéricas. Isto porque é nestas regiões que as variáveis têm maiores gradientes. Então, uma boa representação do escoamento nas regiões próximas de paredes é determinante para uma boa previsão de escoamentos limitados por paredes.

As regiões próximas das paredes podem então ser divididas em três camadas. Uma primeira, próxima da parede, chamada de camada interna (*inner layer*), onde o escoamento é maioritariamente laminar, uma

mais longe da parede, chamada de camada externa (*outer layer*), onde o escoamento é turbulento e uma região entre ambas, chamada de camada intermédia (*interim layer*) onde ambos os efeitos existem. [13]

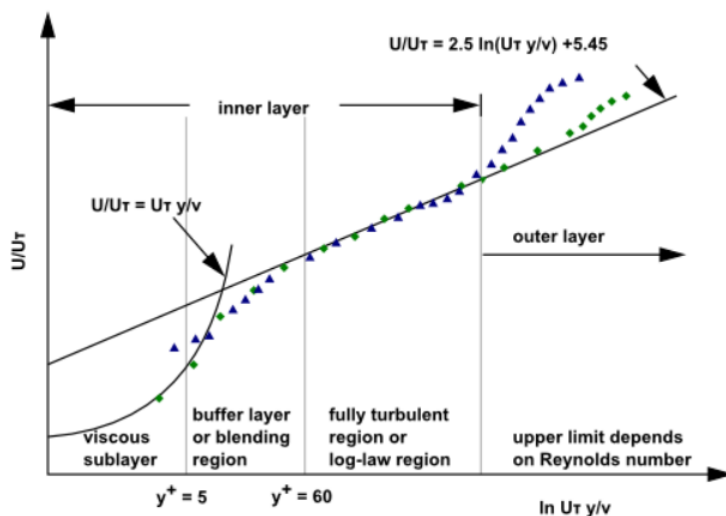


Figura 6: Camadas num escoamento turbulento próximo de uma parede.

Fonte: Guia teórico do *Ansys Fluent* [13].

Este trabalho utiliza "*Standard Wall Functions*". Estas funções representam um conjunto de fórmulas que tratam as equações de momento e energia junto às paredes do sistema.

### Equações do Momento

A lei da parede para a velocidade média dá:

$$U^* = \frac{1}{k} \ln(Ey^*) \quad (35)$$

Onde:

$U^* \equiv \frac{U_P C_\mu^{\frac{1}{4}} k_P^{\frac{1}{2}}}{\tau_w / \rho}$  é a velocidade adimensional;

$y^* = \frac{\rho C_\mu^{\frac{1}{4}} k_P^{\frac{1}{2}} y_P}{\mu}$  é a distância à parede adimensional;

$k$  é a constante de von Kármán (= 0,4187);

$E$  é constante empírica (= 9,793);

$U_P$  é a velocidade média do fluido no centróide da célula adjacente à parede, P;

$k_P$  é a energia cinética turbulenta no centróide da célula adjacente à parede, P;

$y_P$  é a distância do centróide da célula adjacente à parede, P;

$\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido.

### Equações da Energia

O *Ansys Fluent*, baseia-se em duas leis para tratar a temperatura perto das paredes sendo elas:

- lei linear para a condução térmica na camada interior, onde a condução é importante,
- lei logarítmica para a região onde os efeitos da turbulência dominam a condução.

A espessura das camadas de escoamento são diferentes quando se trata de energia ou de momento. Ou seja, a camada interior viscosa é diferente da camada interior onde se considera condução térmica. Adicionalmente, é ainda tido em conta o aquecimento viscoso devido às velocidades de escoamento nas zonas próximas das paredes. É então utilizada a seguinte fórmula para a energia nas zonas próximas de paredes:

$$T^* \equiv \frac{(T_w - T_P)\rho c_P C_m u^{\frac{1}{4}} k_P^{\frac{1}{2}}}{\dot{q}} = \begin{cases} Pr y^* + \frac{1}{2} \rho Pr \frac{C_m u^{\frac{1}{4}} k_P^{\frac{1}{2}}}{\dot{q}} U_P^2 & (y^* < y_T^*) \\ Pr_t [\frac{1}{k} \ln(E_y^*) + P] + \frac{1}{2} \rho \frac{C_m u^{\frac{1}{4}} k_P^{\frac{1}{2}}}{\dot{q}} \cdot \{Pr_t U_P^2 + (Pr - Pr_t) U_C^2\} & (y^* > y_T^*) \end{cases} \quad (36)$$

Onde P é calculado [para paredes suaves (*smooth walls*)] com:

$$P = 9,24 \left[ \left( \frac{Pr}{Pr_t} \right)^{\frac{3}{4}} \right] [ +0,28 e^{-0,007 Pr / Pr_t} ] \quad (37)$$

e:

$k_P$  é energia cinética turbulenta no centróide da célula adjacente à parede, P

$\rho$  é a massa volúmica do fluido

$c_p$  é o calor específico do fluido

$\dot{q}$  é o fluxo de calor na parede

$T_P$  é a temperatura no centróide da célula adjacente à parede, P

$T_w$  é a temperatura da parede

$Pr$  é o número de Prandtl molecular ( $\mu c_p / k_f$ )

$Pr_t$  é o número de Prandtl turbulento (0,85 na parede)

$A$  é a constante de Vand Driest (= 26)

$U_c$  é a magnitude da velocidade média em  $y^* = y_T^*$

A espessura adimensional  $y^*$  é calculada tomando o valor de  $y^*$  quando este é igual pelo cálculo da lei linear e da lei logarítmica.

### Equações da Turbulência

Junto às paredes a condição de fronteira imposta a  $k$  é:

$$\frac{\partial k}{\partial n} = 0 \quad (38)$$

Onde  $n$  é a coordenada local normal à parede. A produção de energia cinética,  $G_k$ , e a sua taxa de dissipação,  $\epsilon$ , nas células adjacentes às paredes, que são os termos de fonte na equação de  $k$ , são calculados com base no equilíbrio local. Tendo isto em conta, assume-se que no volume de controle adjacente à parede a produção de  $k$  e a sua taxa de dissipação são iguais.

A produção de  $k$  é então baseada na lei logarítmica e é calculada como:

$$G_K \approx \tau_w \frac{\partial U}{\partial y} = \tau_w \frac{\tau_w}{k \rho C_\mu^{1/4} k_P^{1/2} y_P} \quad (39)$$

Onde  $\epsilon$  é calculado como:

$$\epsilon = \frac{C_m u^3 k_P^{3/2}}{k y_P} \quad (40)$$

A equação (40) é utilizada nas células adjacentes às paredes ao invés da equação 51.

### 3.2.9. Radiação

O *Ansys Fluent*, oferece várias hipóteses para modelar a radiação. Analisando a literatura disponível conclui-se que para este problema o modelo de radiação *Surface-to-Surface* (S2S) é uma boa opção [10].

Este modelo é viável para contabilizar os efeitos da radiação num ambiente fechado com superfícies que possam ser tratadas como um corpo cinzento difuso. A energia trocada por duas superfícies depende do seu tamanho, da distância entre elas e da sua orientação. Para contabilizar estes fatores é utilizada

uma função geométrica chamada de "*view factor*". A principal aproximação que este modelo utiliza é considerar que qualquer absorção, emissão ou dispersar de radiação pode ser desprezado, sendo apenas tida em conta a radiação "superfície a superfície".

Ao tratar as superfícies como um corpo cinzento difuso, admite-se que a emissividade e a absorptividade são independentes do comprimento de onda e, segundo a lei de Kirchoff, têm o mesmo valor ( $\epsilon = \alpha$ ).

No modelo do corpo cinzento, uma determinada radiação incidente ( $E$ ) numa superfície, será parte refletida ( $\rho E$ ), parte absorvida ( $\alpha E$ ) e parte transmitida ( $\tau E$ ). Como para a maioria das aplicações, as superfícies em questão são opacas à radiação térmica (espectro infravermelho), consideram-se todas as superfícies opacas, ou seja,  $\tau = 0$ . Assim, seguindo a conservação de energia tem-se [13] :

$$\alpha + \rho = 1 \quad \text{e como} \quad \alpha = \epsilon \Rightarrow \rho = 1 - \epsilon \quad (41)$$

O fluxo energético que sai de uma determinada superfície é composto diretamente pela energia emitida e refletida. A energia refletida depende do fluxo energético incidente pela sua envolvente, que pode ser expresso pelo fluxo energético que sai de todas as outras superfícies. A energia que sai de uma determinada superfície é então dada por:

$$q_{out,k} = \epsilon_k \sigma T_k^4 + \rho_k q_{in,k} \quad (42)$$

Onde  $q_{ou,k}$  é o fluxo energético a sair da superfície  $k$ ,  $\epsilon_k$  é a emissividade,  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann e  $q_{in,k}$  é o fluxo energético incidente na superfície.

A quantidade de energia incidente na superfície é uma função direta dos "*view factors*",  $F_{jk}$ . O "*view factor*" é a fração de energia que sai da superfície  $j$  e incide na superfície  $k$ . As superfícies utilizadas no cálculo dos "*view factors*" são as faces da malha. É então possível exprimir o fluxo de energia a sair de todas as outras superfícies como:

$$A_k q_{in,k} = \sum_{j=1}^N A_j q_{out,j} F_{jk} \quad (43)$$

Onde  $A_k$  é a área da superfície  $k$  e  $F_{jk}$  é o *view factor* entre a superfície  $k$  e a superfície  $j$ . Para  $N$  superfícies, utilizar a relação de reciprocidade dos *view factors* dá:

$$A_j F_{jk} = A_k F_{kj} \quad \text{para} \quad j = 1, 2, 3, \dots, N \quad (44)$$

Substituindo em (43),

$$q_{in,k} = \sum_{j=1}^N F_{kj} q_{out,j} \quad (45)$$

Substituindo em (42),

$$q_{out,k} = \epsilon_k \sigma T_k^4 + \rho_k \sum_{j=1}^N F_{kj} q_{out,j} \quad (46)$$

É então possível escrever:

$$J_k = E_k + \rho_k \sum_{j=1}^N F_{kj} q_{out,j} \quad (47)$$

Onde  $J_k$  representa a energia libertada pela superfície  $k$  (radiosidade) e  $E_k$  representa a potência emissiva da superfície  $k$ . Este último representa  $N$  equações que podem ser organizadas em forma de matriz como:

$$KJ = E \quad (48)$$

Onde  $K$  é uma matriz  $N \times N$ ,  $J$  é o vetor da radiosidade e  $E$  é o vetor da potência emissiva. A equação (48) é conhecida como a equação matriz da radiosidade. O *view factor* entre duas superfícies finitas  $i$  e  $j$  é dado por:

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi r^2} \partial_{ij} dA_i dA_j \quad (49)$$

Onde  $\partial_{ij}$  é determinado pela visibilidade de  $dA_j$  para  $dA_i$ . se  $dA_j$  é visível para  $dA_i$ ,  $\partial_{ij} = 1$  caso contrário  $\partial_{ij} = 0$ .



## 4. Validação da Metodologia

O caso utilizado para testar a metodologia da investigação é o descrito em [10]. O artigo consiste na comparação dos resultados experimentais obtidos ao seguir as normas JEDEC [11] [12] com os resultados obtidos através de uma simulação em CFD recorrendo ao software FLUENT. O artigo [10] utiliza um método conjugado entre o método dos elementos finitos (*FEM*) para a condução nos sólidos e o método dos volumes finitos (*VFM*) para o domínio do fluido. Para implementar este método os autores utilizaram o *software Ansys APDL* para resolver o problema da condução de calor, utilizando esses valores como condições de fronteira para o domínio do fluido, resolvido utilizando o *software Ansys Fluent*. Utilizando este método a solução é obtida realizando iterações destes dois processos até que a solução convirja.

### 4.1. Recolha de Dados Experimentais

Para a recolha de dados experimentais em, [10], os autores basearam-se nas indicações das normas [11] e [12]. Os ensaios foram realizados numa caixa com  $0,028\text{ m}^3$ , paredes de acrílico transparente com elevada condutibilidade e emissividade, com paredes de 6,35 mm de espessura. Estes valores foram obtidos tendo em conta uma das indicações presentes nas normas *JEDEC* que indica que, para potências de teste superiores a 3 W, caso a temperatura da caixa de teste aumente mais de 10% junto às paredes, deve ser aumentado o tamanho da caixa. Este parâmetro foi verificado recorrendo a termopares do tipo T colocados nos cantos da caixa e ao centro de cada uma das paredes. Adicionalmente, a temperatura do ar interior foi recolhida utilizando uma sonda termopar.

O modelo de teste, de dimensões  $127 \times 139,7\text{ mm}^2$  obedece às normas *JEDEC*. O chip tem como dimensões  $12,57 \times 12,57\text{ mm}^2$  e foi montado num módulo com  $55 \times 55\text{ mm}^2$ . O contacto entre o chip e o módulo foi feito através de pontos de solda (C4) preenchidos com uma camada de substrato polimérico (*underfill*) que fortalece a integridade dos pontos de solda. O *chip* foi protegido por uma tampa de cobre com 1 mm de espessura que também serve como dissipador de calor. Colocou-se ainda entre o *Chip* e a tampa uma camada de pasta térmica com, aproximadamente  $15\text{ }\mu\text{m}$  de espessura. O *chip* utilizado continha nove fontes térmicas e seis termoresistências (RTD) localizadas um em cada canto do *chip* e dois no centro, para que se pude-se obter uma boa distribuição de temperaturas no mesmo. Adicionalmente, colocaram-se termopares do tipo T na tampa e na parte de baixo do *PCB*, para melhor

descrever as distribuições de temperaturas nestes componentes e, assim, validar o modelo numérico.

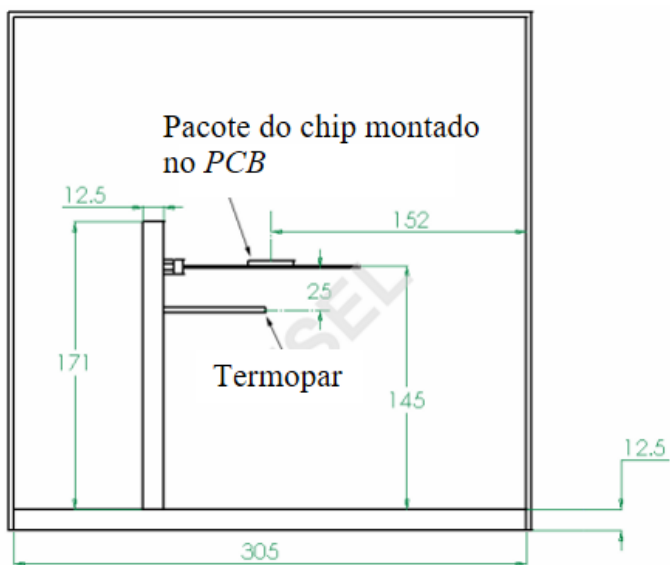


Figura 7: Vista lateral do ambiente de teste (dimensões em mm).

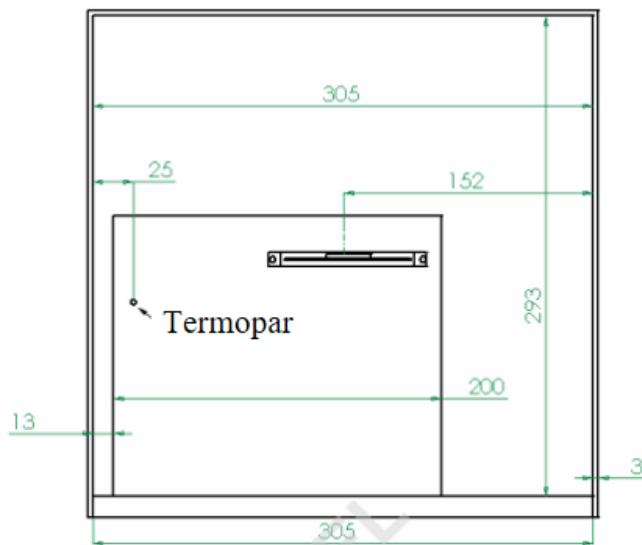


Figura 8: Vista frontal do ambiente de teste (dimensões em mm).

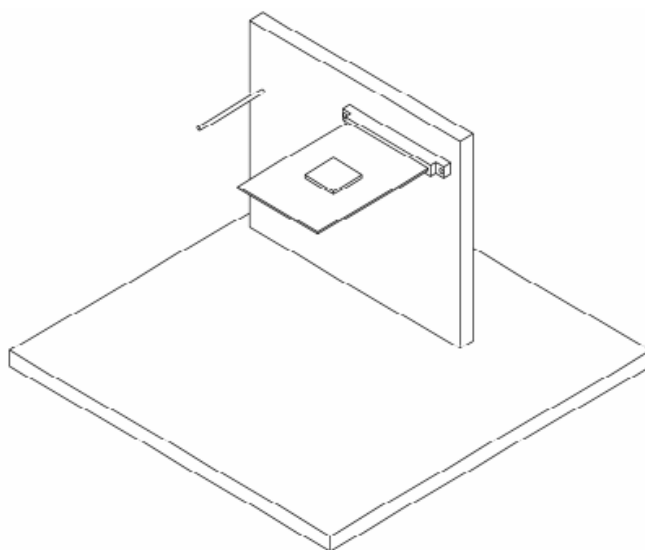


Figura 9: Vista isométrica do ambiente de teste.

Fonte: JEDEC Standard - JESD51-2A [12]

## 4.2. Preparação do Modelo

### 4.2.1. Geometria Utilizada como Referência

Em [10], a geometria é desenvolvida recorrendo ao software *PACK* [7] este *software* permite gerar e exportar a geometria sendo apenas necessário introduzir as características do *PCB*, neste caso, do tipo 2s2p e de dimensões  $127 \times 139,7 \text{ mm}^2$ .

Seguindo [11], um *PCB* do tipo 2s2p, tem a seguinte estrutura:



Figura 10: Camadas de um *PCB* do tipo 2s2p.

Fonte: *JEDEC Standard - JESD51-9* [11]

Onde  $0,25 \leq A \leq 0,5 \text{ mm}$ . As camadas de cor cinza a que se referem a letra "A" representam um material dielétrico, comumente denominado de, *prepeg* que é um material compósito (FR4). A camada central é referida como núcleo (*core*) e consiste em um ou mais laminados de *prepeg* prensados e curados com calor. O *core* é ainda laminado com cobre em cada uma das suas superfícies. Na figura 10 as camadas pretas representam laminados de cobre cuja espessura é de  $30 \mu\text{m} + 0/ - 20\%$ .

No módulo do *chip*, as únicas camadas especificadas nas normas JEDEC [11], são os diâmetros das bolas térmicas [*BGA*], respectivas vias térmicas e das pontas de solda (*C4*) que irão segurar o *chip* e a tampa. As vias térmicas são furos com as paredes revestidas por uma camada de cobre. O cobre, sendo um bom condutor térmico irá ajudar na dissipação de calor das bolas térmicas para a parte inferior do *PCB*. As dimensões das vias térmicas estão diretamente relacionadas com o passo das bolas térmicas. No *PCB* a testar, as bolas térmicas têm um diâmetro de  $400 \mu\text{m}$  e um passo de  $1 \text{ mm}$ .

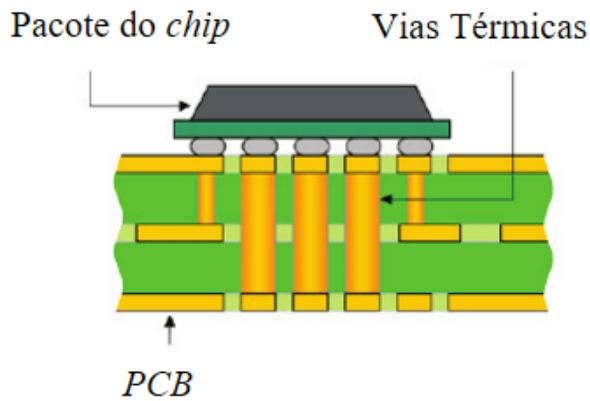


Tabela 1: Dimensão das vias térmicas em função do passo do BGA [11].

Passo	Diâmetro Exterior das Vias Térmicas
1,5 mm	0,40 mm +/-10 %
1,27 mm	0,35 mm +/-10 %
1,00 mm	0,30 mm +/-10 %
0,75 mm	0,25 mm +/-10 %
0,65 mm	0,20 mm +/-10 %
0,5 mm	0,20 mm +/-10 %

Figura 11: Representação de vias térmicas num PCB.

Fonte: [https://www.researchgate.net/figure/Use-of-thermal-vias-to-transport-heat-to-other-locations-on-the-PCB\\_fig5\\_254859504](https://www.researchgate.net/figure/Use-of-thermal-vias-to-transport-heat-to-other-locations-on-the-PCB_fig5_254859504) (acedido em 28/09/2022)

Da tabela 1, é possível verificar o diâmetro exterior das vias térmicas que, neste caso, toma o valor de  $0,30 \text{ mm} + / - 10\%$ .

Como referido em 2. e em [7], é possível simplificar a geometria do BGA e do C4, aproximando-os a uma camada homogénea de material. As resistências térmicas dessas camadas foram calculadas de acordo com a seguinte fórmula [10].

$$R_{ball} = \frac{(1 - \varepsilon)^{1,5}}{2d_{Ball}} \cdot \left( \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} \right) + \frac{4h_{Ball}}{\lambda_{Ball}\pi d_{Ball}^2} \quad (50)$$

Com:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\pi d_{Ball}^2 N}{4A}} \quad (51)$$

Onde  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  e  $\lambda_{Ball}$  são as condutibilidades térmicas da camada superior, camada inferior e de C4 ou BGA,  $h_{Ball}$  é a altura de C4 ou BGA e A é a área total do chip. A equação (50) é válida para  $0 \leq \varepsilon \leq 0,3$ .

Na tabela 2, descrevem-se as dimensões do PCB e do módulo do chip gerados pelo software PACK.

Tabela 2: Espessuras e condutividades térmicas dos materiais utilizados no PCB e no módulo.

Materiais		Espessura	Condutividade Térmica (W/m K)
<b>PCB</b>	Prepeg	226 $\mu\text{m}$	0,25
	Core	927 $\mu\text{m}$	0,25
	Cobre	30 $\mu\text{m}$	385
BGA Equivalente		500 $\mu\text{m}$	6,64
C4 Equivalente		200 $\mu\text{m}$	5,98
<b>Pacote</b>	Cobre	15 $\mu\text{m}$	358
	Core	400 $\mu\text{m}$	0,65
	Diel	33 $\mu\text{m}$	0,49
	Underfill	65 $\mu\text{m}$	0,65
	CHIP	785 $\mu\text{m}$	148
	TIM	15 $\mu\text{m}$	2,6
	Lid	1 mm	385

A geometria utilizada em [10], toma então o seguinte aspeto:

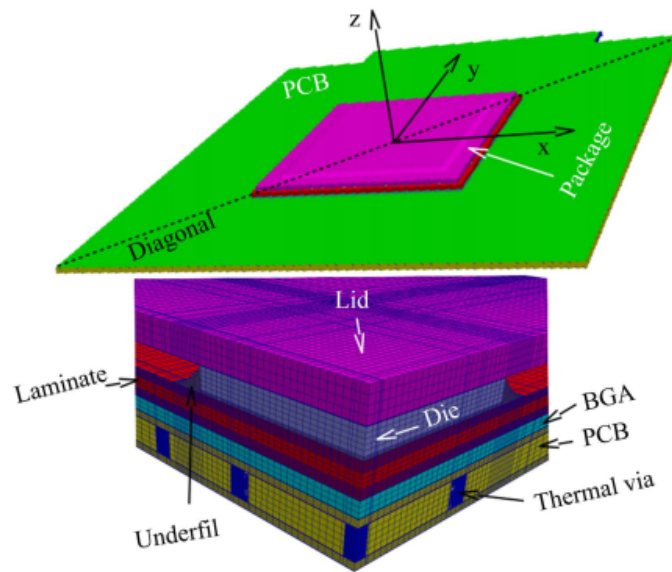


Figura 12: Geometria gerada pelo software *PACK*

Fonte: [10]

## 4.2.2. Geometria Desenvolvida

Apesar de a validação da metodologia estar a utilizar como referência o trabalho desenvolvido em [10], não é possível utilizar o mesmo método de modelação. O software *PACK* não está disponível publicamente e a versão do *FLUENT*, utilizada (versão de estudante 2022) não suporta algumas das particularidades do modelo gerado pelo *PACK*, como será explicado posteriormente **4.2.5**.

O *software* de utilizado para modelação da geometria foi o *Solid Edge*, desenvolvido pela *Siemens*. Modelaram-se então as diferentes partes constituintes do *PCB*, tendo elas as dimensões descritas em **4.2.1**. e na tabela 2. Existem então no modelo:

- PCB
  - Quatro placas de cobre com  $30\ \mu m$  de espessura;
  - Duas placas de *prepeg* com  $226\ \mu m$  de espessura;
  - Uma placa de *Core* com  $927\ \mu m$  de espessura;
  
- Módulo
  - Uma placa homogénea a representar o *BGA* com  $500\ \mu m$  de espessura;
  - Uma placa de material dielétrico com  $33\ \mu m$  de espessura;
  - Uma placa de cobre com  $15\ \mu m$  de espessura;
  - Uma placa homogénea a representar o *C4* com  $200\ \mu m$  de espessura;
  - Uma camada de substrato (*underfill*) com  $65\ \mu m$  de espessura;
  - O *chip* com uma espessura de  $785\ \mu m$ ;
  - Uma camada de pasta térmica *TIM* com uma espessura de  $15\ \mu m$ ;
  - Uma tampa (*LID*) com uma espessura de  $1\ mm$ .

O único componente cuja geometria não é simplificada a uma placa plana, é a tampa (*LID*). Em [10], é apenas especificada a sua espessura, no entanto, é necessário que o chip fique totalmente coberto

pela tampa e, portanto, esta não pode ser apenas uma placa plana. Tendo em conta as dimensões do *chip* e o alinhamento da tampa com as restantes camadas constituintes do módulo, modelou-se a tampa cujas dimensões se podem verificar na figura 14. Para o modelo do domínio de fluido considerou-se um volume de forma cúbica com um volume de  $0,028 \text{ m}^3$  à semelhança do utilizado em [10].

Foi também necessário modelar as vias térmicas como paralelepípedos de cobre, ao invés de furos redondos forrados a cobre. Esta simplificação foi feita para facilitar a convergência da simulação. Furos forrados a cobre iriam obrigar a uma malha de fluido muito mais refinada nesta zona e, como as dimensões das vias são muito reduzidas, poderia originar problemas como *floating points* na simulação que, por sua vez, iriam inviabilizar a utilização do modelo.

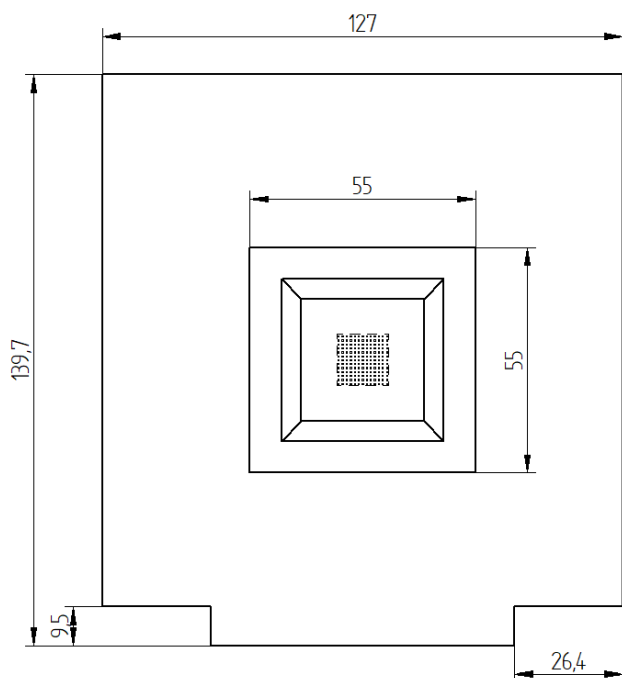


Figura 13: Dimensões do modelo gerado em *Solid Edge*.

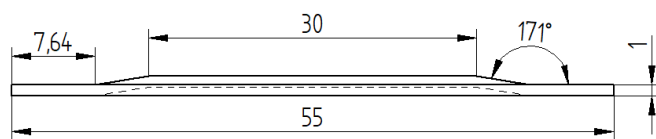


Figura 14: Dimensões da tampa (*Lid*).

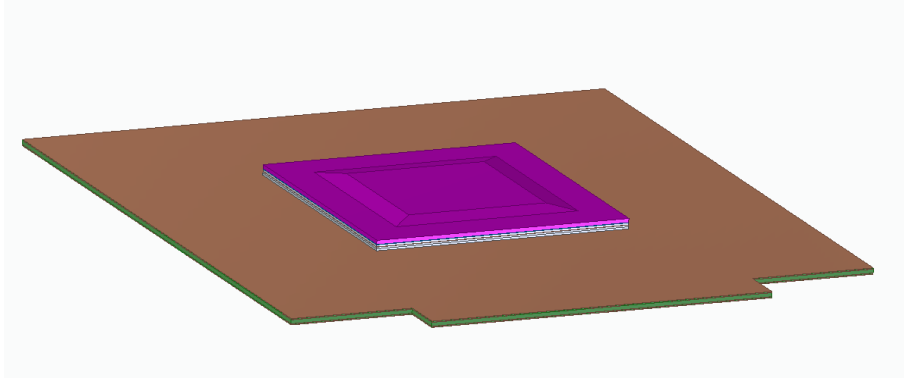


Figura 15: Geometria gerada no software *Solid Edge*

### 4.2.3. Geração de Malha

Um dos processos mais importantes em qualquer modelo *CFD* é a geração de malha. Só uma boa malha pode assegurar que os resultados obtidos através da simulação são fiáveis.

Existem três principais tipos de malha utilizados em simulações *CFD* a três dimensões, sendo elas: malhas triangulares/tetraédricas, malhas hexaédricas e malhas poliédricas.

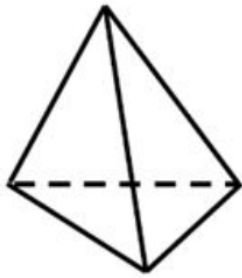


Figura 16: Célula tetraédrica.

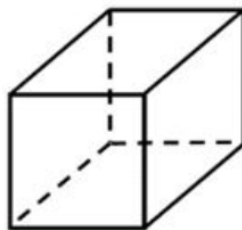


Figura 17: Célula hexaédrica.

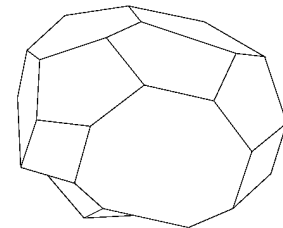


Figura 18: Célula poliédrica.

Fonte: Guia de utilizador do *Ansys Fluent* [15].

- Malhas tetraédricas - Indicadas para geometrias complexas, no entanto, são as células que originam resultados menos precisos e necessitam de números de células muito superiores aos outros métodos de malha para que as simulações possam convergir. Este tipo de malha é fácil de gerar não necessitando de grande poder computacional.
- Malhas hexaédricas - Indicadas para geometrias mais simples. Originam resultados mais precisos e as simulações convergem com números de células significativamente inferiores aos de uma malha

tetraédrica. Este tipo de malha requer um maior poder computacional sendo a sua geração mais demorada quando comparada com outros tipos de malha.

- Malhas poliédricas - As malhas poliédricas são o intermédio entre as malhas tetraédricas e hexaédricas. São possíveis de utilizar em geometrias complexas e requerem um número de células inferior ao de uma malha tetraédrica para que as simulações convirjam. Os resultados são também mais precisos que os obtidos com uma malha tetraédrica. O poder computacional necessário para gerar esta malha, é superior ao necessário para gerar uma malha tetraédrica e inferior ao necessário para gerar uma malha hexaédrica. Em alguns *softwares* e, no *Ansys Fluent* em particular, é possível converter malhas tetraédricas em malhas poliédricas, permitindo assim reduzir o número de células e reduzir o tempo de simulação ao mesmo tempo que se aumenta a precisão dos resultados.

Não existem regras que especifiquem que opções devem ser tomadas durante a geração de malha. Este processo está então dependente da sensibilidade do utilizador, poder computacional disponível, tempo e eventuais particularidades do modelo.

Neste caso, a prioridade é não exceder o limite de 512 000 células (limite da versão de estudante do *Ansys Fluent*) não comprometendo uma boa descrição do problema. Evitou-se então o uso de uma malha tetraédrica. Numa primeira aproximação optou-se por uma malha hexaédrica tanto para o domínio sólido como para o domínio fluido. No entanto, verificou-se uma grande distorção nas células no interior do domínio fluido (*skewness*  $\approx 1$ ) o que impedia que a solução pudesse convergir. Foi necessário então utilizar uma malha poliédrica no domínio fluido, uma vez que com este tipo de malha já não existe a distorção excessiva que existe com a malha hexaédrica e, ao mesmo tempo, não se compromete a restrição de pontos que a versão de estudante do *Fluent* impõe. Assim, estas opções permitem que a solução convirja rápido e não necessita de grande poder de computação, tanto para a geração de malha como para os cálculos iterativos. Um pormenor importante é que ao utilizar o *fluent*, a malha poliédrica é gerada a partir de uma malha tetraédrica. O *software* utilizado para gerar a malha não tem a opção de gerar uma malha poliédrica, sendo a conversão feita já no ambiente do *fluent*, assim sendo, tem que ser gerada primeiramente uma malha tetraédrica para o fluido sem exceder o limite de células.

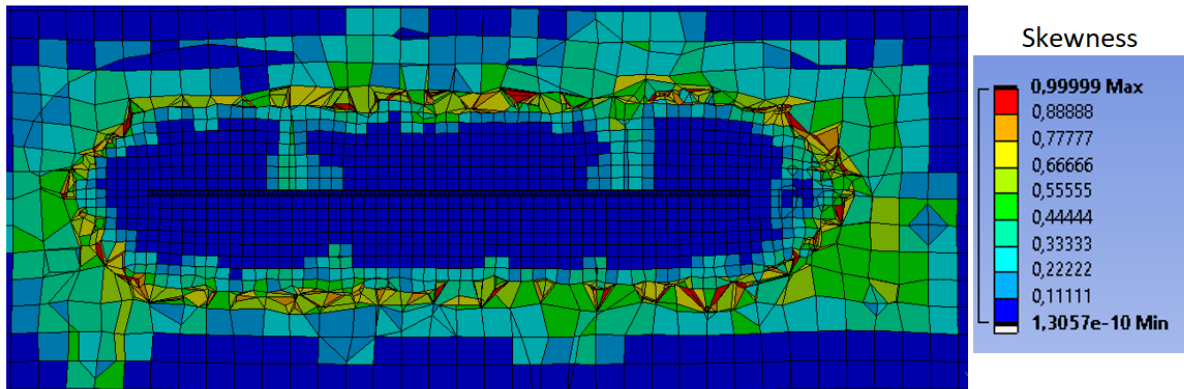


Figura 19: Exemplo de uma malha hexaédrica distorcida.

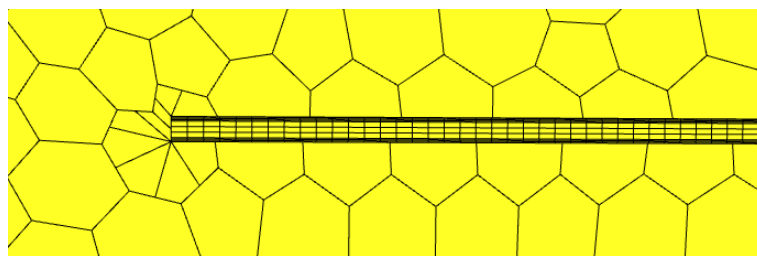


Figura 20: Exemplo de uma malha poliédrica para o mesmo modelo.

#### 4.2.4. Testes de Malha

Numa primeira fase, testou-se apenas o modelo sólido e considerando apenas condução. A malha foi gerada tendo sempre como objetivo utilizar o menor número de pontos possível não comprometendo a precisão dos resultados. Para isso, foram comparados dois modelos: um com uma malha mais grosseira tendo sido, apenas, refinada o suficiente para não comprometer a convergência da simulação; outro com a malha mais refinada para servir como base para perceber o erro que se está a introduzir ao utilizar a malha mais grosseira.

Tabela 3: Parâmetros da malha utilizada nas simulações.

Malha Utilizada		
	Método	Tamanho dos elementos [m]
Placas finas	Sweep 2 div	5,00E-04
Placas espessas	sweep 3 div	9,00E-04
Tampa	sweep 3 div	9,00E-04
Chip	sweep 3 div	9,00E-04
Vias	Hex Dominant	1,00E-04

Tabela 4: Parâmetros da malha refinada.

Malha Utilizada		
	Método	Tamanho dos elementos [m]
Placas finas	Sweep 3 div	3,00E-04
Placas espessas	Sweep 3 div	6,00E-04
Tampa	Sweep 3 div	6,00E-04
Chip	Sweep 3 div	6,00E-04
Vias	Hex Dominant	1,00E-04

Nas simulações de teste, consideraram-se como condições de fronteira uma temperatura de 350 K no topo da tampa e 300k na parte de baixo do *PCB*. Idealmente este teste seria feito com o modelo final, mas devido às limitações da versão utilizada bem como do poder computacional disponível, não é possível fazer este teste com o modelo completo. Recolheu-se então a distribuição de temperaturas ao longo do *chip* (componente onde é mais importante controlar a temperatura) e elaborou-se a figura 21.

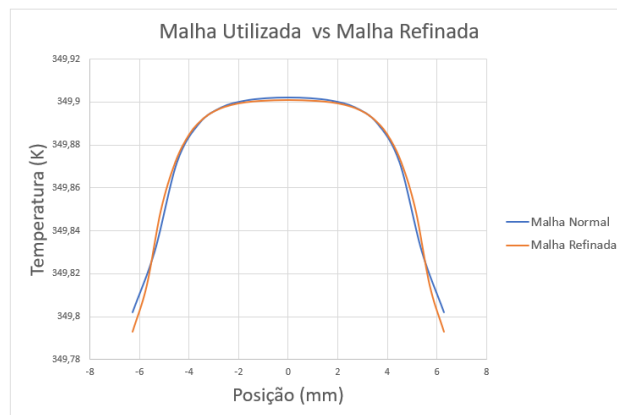


Figura 21: Distribuição de temperaturas no *chip* com diferentes malhas

Após correr as simulações, a diferença máxima de temperaturas entre os dois casos é de aproximadamente  $0,009K$ . No centro do *chip*, onde ocorre a temperatura máxima, a diferença é de aproximadamente  $0,001K$ , assim sendo, é possível concluir que a malha utilizada mostra-se adequada à resolução do problema, sendo que a melhoria, em termos de precisão, obtida com uma malha mais fina, é de ordem de grandeza inferior à menor unidade considerada nas medições.

#### 4.2.5. Simplificações ao Modelo

Devido às limitações da versão de estudante do *Ansys Fluent*, foi necessário realizar simplificações ao modelo, de forma a que a malha gerada não excedesse os 512 000 pontos. Caso contrário, a versão de estudante não permite avançar com a simulação. Apesar de modelo ser relativamente pequeno, (as cotas de atravancamento não excedem os 305 *mm*) algumas placas possuem espessuras muito pequenas, na ordem dos 15  $\mu\text{m}$ , o que obriga a uma malha muito refinada nessas zonas para que a simulação possa convergir.

Ao observar a geometria do modelo é fácil perceber que a sua geometria é simétrica e, portanto, é possível modelar apenas metade do *PCB*, definindo condições de fronteira como do tipo "simetria" nas faces "cortadas". Após testar vários modelos, concluiu-se que seria ainda necessário dividir o modelo mais uma vez, ou seja, o modelo a testar passa a ser um quarto do modelo original. Testando metade do modelo não é possível gerar uma malha para o domínio de fluido fina o suficiente para que a simulação convirja. Optou-se por testar apenas um quarto do modelo original e, assim, utilizar uma malha fina para o fluido. Esta simplificação já tem influência na geometria, visto que, a zona de encaixe do *PCB*, faz com que o modelo só seja perfeitamente simétrico numa direção. No entanto, esta mudança na geometria não tem impacto significativo no desempenho do modelo, pois a diferença é apenas no *PCB*, na zona mais afastada do módulo do *chip*, não tendo assim influência drástica na dissipação do calor.

Mesmo utilizando apenas um quarto do modelo, ainda não foi possível utilizar uma malha fina o suficiente para que a solução pudesse convergir. A solução arranjada foi substituir as placas mais finas por resistências térmicas. Esta aproximação é possível, pois tendo em conta a geometria, a transferência de calor nestas placas dá-se na direção vertical e, como o componente onde é mais importante controlar a temperatura, não é uma das placas a ser substituídas esta aproximação não deverá ter uma influência significativa no desempenho do modelo.

Para testar esta aproximação desenvolveram-se dois modelos.

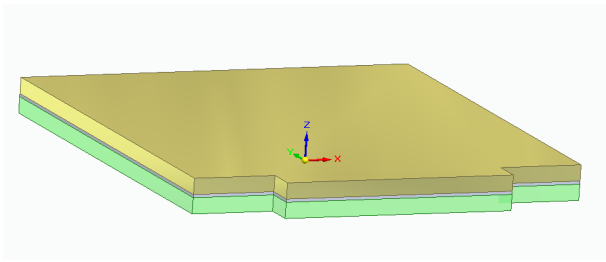


Figura 22: Modelo de teste com todas as camadas.

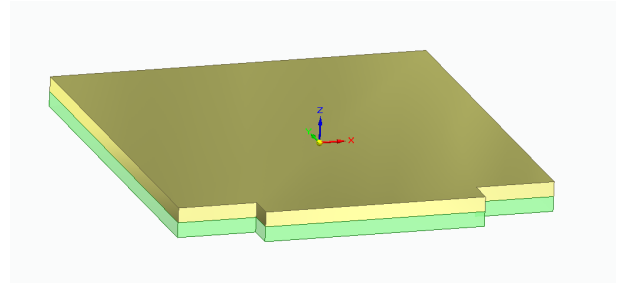


Figura 23: Modelo de teste com resistência equivalente.

Os modelos são constituídos por: uma placa superior, do mesmo material que o *chip*, com 5 mm de espessura; uma placa inferior, de *prepeg*, com 5 mm de espessura e uma placa intermédia de cobre com 1 mm de espessura.

Para correr as simulações utilizaram-se como condições de fronteira temperaturas fixas, 350 K na face superior da placa superior e 300 K na face inferior da placa inferior. Para analisar os resultados foi analisada a distribuição de temperaturas na face superior da placa inferior. Como seria de esperar, uma vez que as placas têm todas as mesmas dimensões, a temperatura é constante ao longo da face a avaliar tomando valor de 323,5 K em ambos os casos comprovando assim a validade do método.

Durante a testagem desta metodologia, verificou-se também que este método da resistência térmica equivalente só é válido quando a placa a substituir por uma resistência térmica está em contacto com placas das mesmas dimensões, caso contrário este método não consegue descrever o problema de forma correta pois não considera a distribuição de calor na direção longitudinal que existiria no caso de ter a placa fina totalmente modelada. Assim sendo, substituíram-se as placas finas do modelo completo por resistências equivalentes, com exceção da placa de cobre, que estabelece contacto com a camada de *BGA* e com o ar e da camada de substrato *underfill* que estabelece contacto com a tampa, *chip* e bolsa de ar entre a lateral do *chip* e a tampa. Elementos estes que serão tratados como sólidos.

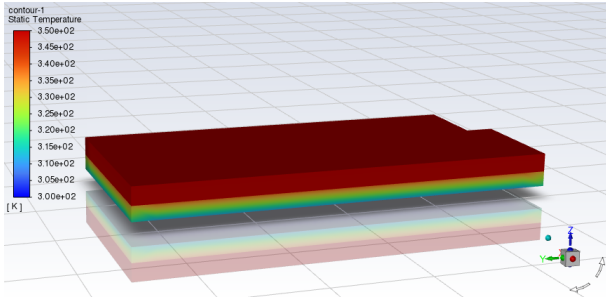


Figura 24: Distribuição de temperaturas no modelo de teste com todas as camadas.

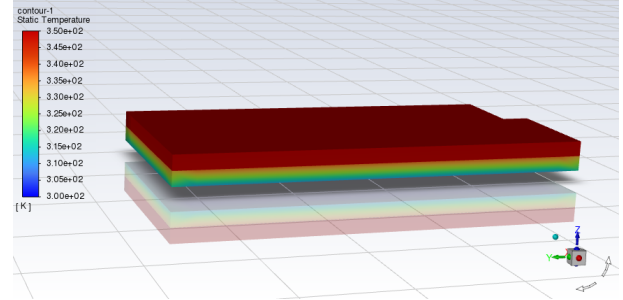


Figura 25: Distribuição de temperaturas no modelo de teste com resistência equivalente.

### 4.3. Simulação

Após importar o modelo e a malha para o *Fluent*, realizou-se um *setup* o mais semelhante possível ao descrito em [10]. Ativou-se a equação da energia, o modelo viscoso e o modelo de radiação. O modelo viscoso utilizado foi o *Realizable K- $\epsilon$*  (3.2.7.), *standard wall function* (3.2.8.). Para a radiação utilizou-se o modelo *Surface to Surface (S2S)* (3.2.9). Os materiais utilizados para as diferentes camadas têm as mesmas características físicas dos descritos em [10] podendo ser consultadas as resistências térmicas na tabela 2.

#### 4.3.1. Características do Ar

As características do ar não são referidas em [10], tendo sido então escolhidas de maneira a que representem o problema de forma fiel.

Para obter a massa volúmica, considerou-se o ar como um gás perfeito incompressível (*incompressible ideal-gas* no *Fluent*). Esta opção despreza o efeito da pressão no cálculo da massa volúmica, sendo indicada para correr as simulações num volume fechado e em regime estacionário segundo [13]. A massa volúmica obedece então à seguinte fórmula:

$$\rho = \frac{P_{op}}{R \cdot T} \quad (52)$$

Onde,  $\rho$  é a massa volúmica ( $kg/m^3$ ),  $P_{op}$  é a pressão de operação ( $Pa$ ) (neste caso, pressão atmosférica),  $R$  é a constante universal dos gases ( $\frac{J}{K \cdot mol}$ ),  $M$  é a massa molar ( $\frac{g}{mol}$ ). Esta aproximação é

adequada no presente problema pois o recipiente tem dimensões muito superiores ao *PCB* e a variação de temperatura não é elevada o suficiente para causar um aumento significativo na pressão no interior do recipiente.

Considerou-se um calor específico constante com o valor de  $1006,43 \left(\frac{J}{kg \cdot K}\right)$ , sendo este o valor tabelado para ar a  $24^\circ C$ . [16]

Para a condutividade térmica, fez-se uma interpolação linear utilizando os valores tabelados em [16]. Utilizaram-se cinco valores limitados entre as temperaturas de 273 K e 473 K para a interpolação. Obteve-se então o seguinte gráfico:

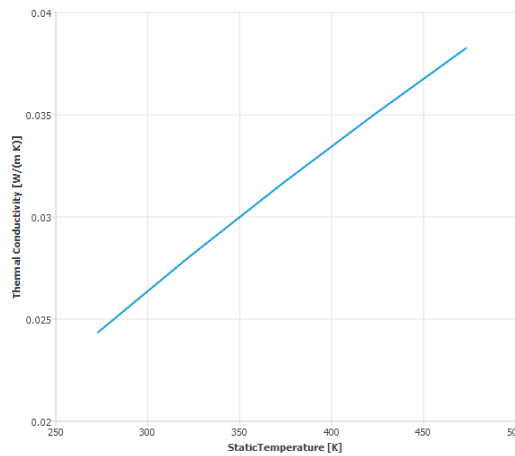


Figura 26: Aproximação linear dos valores de condutividade térmica do ar para temperaturas entre os 273 K e os 473 K.

Para a viscosidade, utilizou-se a aproximação de Sutherland. É possível estimar a variação da viscosidade dinâmica de um fluido em função da temperatura, recorrendo à aproximação de *Sutherland*. Existem duas maneiras de modelar esta aproximação. Utilizando dois coeficientes:

$$\mu = \frac{C_1 \cdot T^{\frac{3}{2}}}{T + C_2} \quad (53)$$

Onde,  $\mu$  é a viscosidade em  $[kg/m \cdot s]$ ,  $T$  é a temperatura em  $[K]$ ,  $C_1$  e  $C_2$  são as constantes de *Sutherland*, tomando os valores de  $1,458e - 6 [kg/m \cdot s \cdot K^{\frac{1}{2}}]$  e  $110,4 K$  respetivamente.

Ou utilizando três coeficientes:

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{T_0 + S}{T + S} \quad (54)$$

Onde,  $\mu$  é a viscosidade em [kg/m.s],  $T$  é a temperatura estática em [K],  $\mu_0$  é um valor de referência em [kg/m.s],  $T_0$  é a temperatura de referência em [K] e  $S$  é a constante de *Sutherland* em [K]. Com esta forma, para ar a temperaturas moderadas, as variáveis tomam os seguintes valores:  $\mu_0 = 1,716e - 5$  [kg/m.s];  $T_0 = 273,11$  [K] e  $S = 110,56$  [K].

Segundo [17], para o ar, estes valores induzem apenas um erro de 2% para temperaturas entre os 170 K e os 1900 K.

Neste trabalho, utilizou-se a lei de Sutherland com três coeficientes, obtendo-se uma variação de viscosidade em função da temperatura que obedece ao seguinte gráfico:

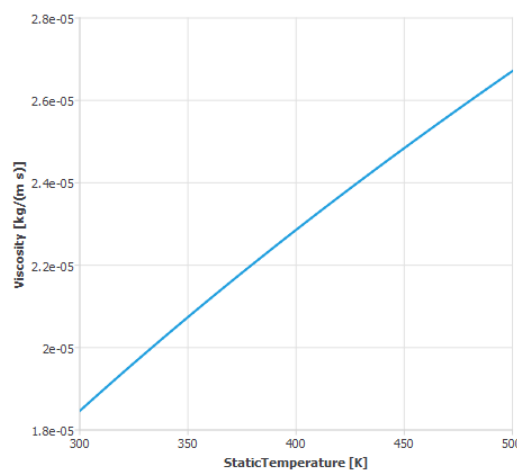


Figura 27: Viscosidade do ar em função da temperatura segundo a aproximação de Sutherland com três coeficientes.

### 4.3.2. Condições de Fronteira

No artigo [10], o *PCB* é testado para uma potência de 10 W a ser libertada pelo *chip*. No *Ansys Fluent*, no caso de a fonte de calor ser um dos sólidos modelados, o valor de potência libertada é inserido em [ $W/m^3$ ]. O *chip* tem então um volume de  $12,57\text{ mm} \times 12,57\text{ mm} \times 0,785\text{ mm} = 124,034\text{ mm}^3$ . O valor a introduzir fica então:

$$P_{dens} = \frac{10}{124,0338e-9} = 806230540,97 \left[ \frac{W}{m^3} \right]$$

De notar que, uma vez que o modelo está reduzido apenas a um quarto da sua dimensão total,  $V = 31,0085 \text{ mm}^3$ , a potência libertada será também um quarto do seu valor total, e como tal, tomará o valor de  $2,5 \text{ W}$ . Com estes dados, o valor de  $P_{dens}$  mantém-se inalterado.

As paredes da caixa envolvente irão servir como condições de fronteira, uma vez que o ar da sala onde ocorre o teste não foi modelado. Para ter em conta o ar exterior, consideraram-se as paredes da caixa como estando sujeitas a radiação exterior e a convecção.

Estas considerações obrigam a que seja dado pelo utilizador um valor para os coeficientes de convecção nas paredes exteriores da caixa. Para estimar este valor recorreu-se às expressões, simplificadas, descritas em [18].

$$\text{Placas Verticais} \begin{cases} h = 1,42\left(\frac{\Delta T}{L}\right)^{\frac{1}{4}} & 10^4 < Gr_f Pr_f < 10^9 \\ h = 1,31(\Delta T)^{\frac{1}{3}} & Gr_f Pr_f > 10^9 \end{cases} \quad (55)$$

$$\text{Placas Horizontais} \begin{cases} h = 1,32\left(\frac{\Delta T}{L}\right)^{\frac{1}{4}} & 10^4 < Gr_f Pr_f < 10^9 \\ h = 1,24(\Delta T)^{\frac{1}{3}} & Gr_f Pr_f > 10^9 \end{cases} \quad (56)$$

Onde  $h$  é o coeficiente de convecção,  $\Delta T$  é a diferença de temperaturas da placa para o ar,  $L$  é o comprimento da placa (neste trabalho  $L = 0,30366 \text{ m}$ ),  $Gr_f$  e  $Pr_f$  são os números de Grashoff e Prantdl, respetivamente. O número de Prantdl encontra-se tabelado e obedece à seguinte expressão:

$$Pr = \mu \frac{c_p}{k} \quad (57)$$

Onde  $\mu$  é a viscosidade dinâmica [kg/m.s],  $c_p$  é o calor específico [J/kg.K] e  $k$  é a condutividade térmica [W/m.k].

O número de Grashoff é dado por:

$$Gr = \frac{g\beta(T_w - T_\infty)L^3}{\mu^2} \quad (58)$$

com

$$\beta = \frac{1}{T_m} \quad (59)$$

Onde  $g$  é a aceleração gravítica,  $\beta$  é a temperatura média entre o ar e a placa ( $T_m = \frac{T_\infty + T_w}{2}$ ),  $T_w$  é a temperatura da placa,  $T_\infty$  é a temperatura do ar ambiente e  $L$  é o comprimento da placa.

Para calcular os coeficientes de convecção e, sabendo que o ar exterior se encontra a 21 °C. Considerou-se que a parede da caixa tem uma diferença de temperatura para o ar exterior de 3 K ( $\Delta T = 294,15 - 297,15 = 3$ ), uma vez que é esta a diferença máxima de temperatura que se pode atingir para que o teste seja válido 4.1. Consultou-se uma tabela [16] de características do ar a diferentes temperaturas. Com os valores listados em [16] fez-se uma interpolação linear para obter essas mesmas características a  $T_f = 295,65K$  (22,5 °C):

Tabela 5: Propriedades do ar a diferentes temperaturas.

T [K]	$\mu$ [10 <sup>-5</sup> kg/m.s]	Pr
275	1,725	0,713
295,65	1,825	0,708
300	1,846	0,707

Utilizando os valores da tabela 5, verificou-se que  $Gr_f Pr_f = 9875961$  e portanto calcula-se:

$$h_{vertical} = 2,52 \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad \text{e} \quad h_{horizontal} = 2,34 \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

Adicionalmente é necessário definir a emissividade das paredes da caixa, bem como a temperatura do ar exterior. Ambos estes valores são dados em [10], sendo a emissividade da caixa, 0,91, e a temperatura do ar exterior, 294,15 K.

### 4.3.3. Emissividades

A radiação é um dos parâmetros mais importantes na transferência de calor em microeletrónica. No entanto, a emissividade é um parâmetro extremamente sensível ao acabamento das superfícies, bem como a sua temperatura. Para além disso, sujidade ou poeiras também influenciam este parâmetro.

No problema em questão temos 3 superfícies onde é importante conhecer o valor da emissividade, sendo elas, a tampa (*lid*), e as superfícies superiores e inferiores do *PCB*.

Para a tampa de cobre, consultou-se uma tabela disponível em [19] e após analisar as várias opções, utilizou-se o valor de 0,37 (cobre níquel platinado). Este valor é válido para temperaturas entre os 38 °C

e os 260 °C.

Para as superfícies do *PCB*, consultaram-se vários artigos e fóruns *online*. Optou-se por adotar o valor de, 0,92, que coincide com o utilizado em [20].

#### 4.3.4. Testes de Sanidade

Para garantir que a simulação convergiu, é importante fazer testes de sanidade ao modelo. Uma boa maneira de fazer estes testes é verificar se os princípios físicos estão a ser cumpridos após obter a solução. Neste caso, a temperatura do ar exterior e a potência libertada pelo *chip*, são valores conhecidos de antemão.

Como não existe mais nenhum parâmetro que possa causar uma diminuição de temperatura, é possível afirmar que a temperatura mínima, seja no domínio sólido, seja no domínio do fluido, não pode ser inferior à temperatura do ar exterior (294 K).

Perante um modelo em regime estacionário e, uma vez que, as fronteiras do modelo são a caixa, no caso de a simulação convergir é obrigatório que a soma das potências térmicas transmitidas pelas paredes da caixa para o exterior seja igual à potência libertada pelo *chip*, tomando o valor de 2,5 W (explicado em 4.3.2.).

Outro parâmetro fácil de avaliar é a potência térmica transmitida nas interfaces das diferentes camadas do *PCB* e módulo. Por exemplo, no caso da camada de cobre que está em contacto com a camada de *prepeg*. Avaliando a potência térmica transmitida na face do cobre ou na face do *prepeg*, tem que ser obtido o mesmo valor em módulo. Naturalmente, ao fazer esta avaliação no *Fluent*, um dos valores será positivo e o outro negativo atendendo à direção da transmissão de calor.

Sendo este um problema de convecção natural, e tendo bem definida a fonte térmica, é conhecido, a priori, o formato geral da pluma de velocidades. Isto porque o ar em contacto com a fonte térmica irá aquecer e, como tal, a sua massa volúmica irá diminuir, criando assim forças de impulsão que criam um movimento ascendente do ar imediatamente acima da fonte térmica. Estando a fonte térmica num volume fechado, a ascensão do ar quente irá fazer com que o ar frio na parte superior da caixa desça, criando assim um movimento rotativo do ar dentro da caixa.

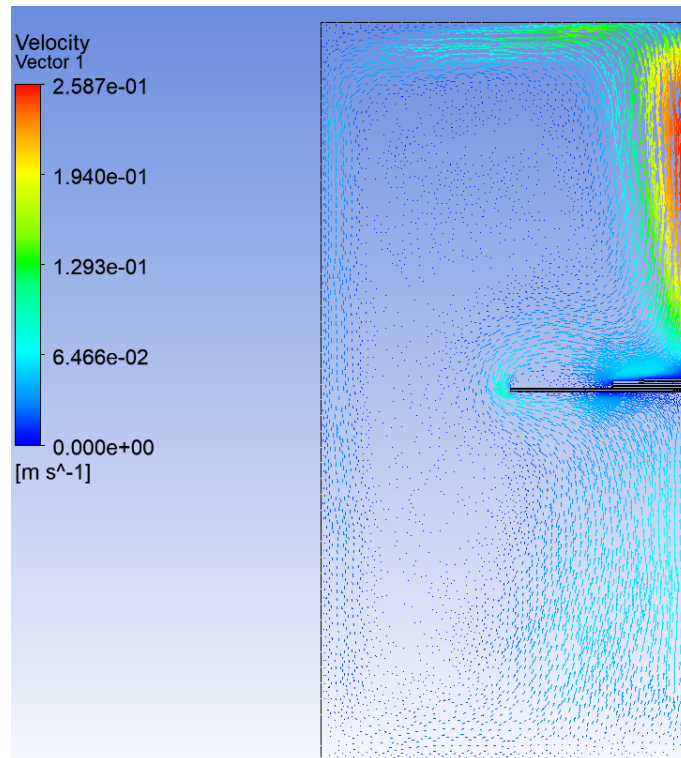


Figura 28: Pluma de velocidades obtida.

De notar que, uma vez que a solução é obtida de forma iterativa, existe sempre um erro associado aos resultados obtidos e, portanto, para o presente problema, foram considerados testes de sanidade positivos todos aqueles em que os resultados estivessem dentro de uma margem de erro inferior a 1%.

#### 4.4. Análise de Resultados

Para validar a metodologia e, sendo o principal problema deste trabalho um problema de transmissão de calor, compararam-se as temperaturas obtidas na simulação às obtidas em [10]. Para tal analisaram-se as distribuições de temperaturas em três localizações diferentes: ao longo da junção do *chip* com a camada de substrato (*underfill*); ao longo do topo da tampa; e ao longo da superfície inferior do *PCB*.

Obtiveram-se então os seguintes resultados:

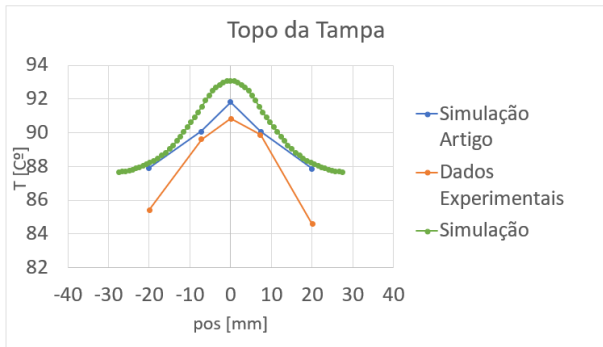


Figura 29: Distribuição de temperaturas no topo da tampa.

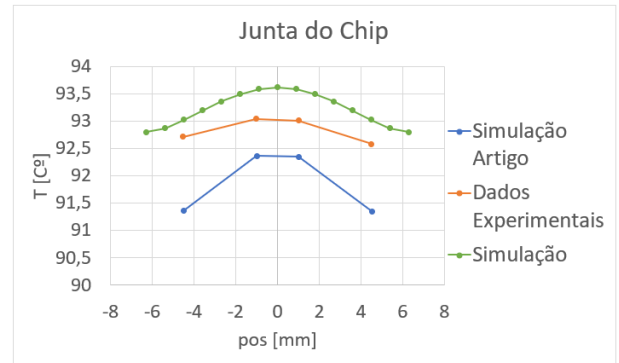


Figura 30: Distribuição de temperaturas na junta do chip com a camada de substrato (*underfill*).

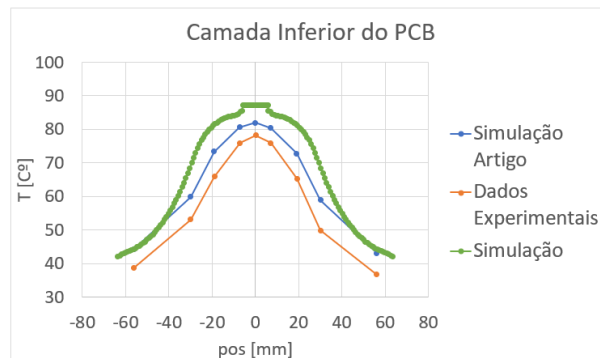


Figura 31: Distribuição de temperaturas na camada inferior do *PCB*.

Alguns dos pontos positivos a retirar imediatamente das figuras, 29, 30 e 31 é o perfil das temperaturas ao longo da posição. Ou seja, o facto de as temperaturas serem mais elevadas na coordenada 0 [mm] (centro do modelo) e baixarem gradualmente à medida que nos afastamos desse ponto. Este comportamento mostra que as opções tomadas para modelar a transmissão de calor estão bem implementadas.

Na figura 31, o salto, aparentemente abrupto, de temperaturas no centro do modelo deve-se às vias de cobre que existem nessa zona. Este fenómeno não é perceptível nos gráficos provenientes do artigo pois estes foram gerados recorrendo a menos pontos e, portanto, as interpolações lineares entre cada ponto absorvem este efeito.

Um dos valores mais importantes a controlar é a temperatura máxima atingida. Comparando então as temperaturas obtidas neste trabalho com as obtidas em [10] temos:

Tabela 6: Temperaturas máximas atingidas em cada parte do modelo.

	Max Temp [°C]		
	Tampa	Chip	PCB
Sim	93,07	93,62	87,23
Art Sim	91,8	92,36	82,01
Exp	90,84	93,04	78,2

Para validar o modelo e, ao mesmo tempo, qual o erro associado aos resultados obtidos, calculou-se o erro relativo em cada uma das superfícies.

De notar que, para a zona inferior do *PCB* não faz sentido fazer esta análise do erro relativo. Isto porque, a camada de cobre existente na parte inferior do *PCB*, não está modelada (substituída por uma resistência equivalente) e, como tal, o *Fluent* não consegue recolher as temperaturas nessa camada. Esta substituição da placa de cobre por uma resistência equivalente, aproxima bem a temperatura que o restante modelo atinge, no entanto, a impossibilidade de recolher a temperatura na face inferior do cobre, faz com que a análise do erro relativo seja inválida.

$$Erro\% = \frac{|\text{Valor Simulação} - \text{Valor Artigo/Experimental}|}{\text{Valor Artigo/Experimental}} \cdot 100 \quad (60)$$

Temos então:

Tabela 7: Erros relativos.

	Erro %	
	Tampa	Chip
Sim - Art Sim	1,38	1,37
Sim - Exp	2,46	0,63

Na tabela 7, verifica-se que para a tampa e para o *chip*, existe um erro inferior a 2,5%, que, para a gama de temperaturas em que se trabalha é um erro aceitável validando assim o modelo desenvolvido.

No caso de estudo, o valor mais importante a controlar é o da temperatura máxima atingida pelo *chip*, visto que, num caso real, os problemas surgem pelo sobreaquecimento do *chip* que pode causar danos no processador. Neste sentido o modelo desenvolvido representa bem a evolução da temperatura no *chip*,

apresentando apenas erros relativos de 1,37% e 0,63 % quando comparado aos valores simulados no artigo e recolhidos experimentalmente, respetivamente.

No caso de não existirem tantas restrições, seja a nível computacional, como inerentes à versão do *software*, seria ainda possível refinar a malha dos domínios fluido e sólido, o que permitiria aproximar ainda mais os resultados. Esta disponibilidade de recursos também permitiria, elaborar um modelo sem as simplificações adotadas neste trabalho, o que também contribuiria para resultados mais próximos dos obtidos em [10].

Conclui-se assim que a metodologia utilizada é válida podendo então ser utilizada em problemas semelhantes.

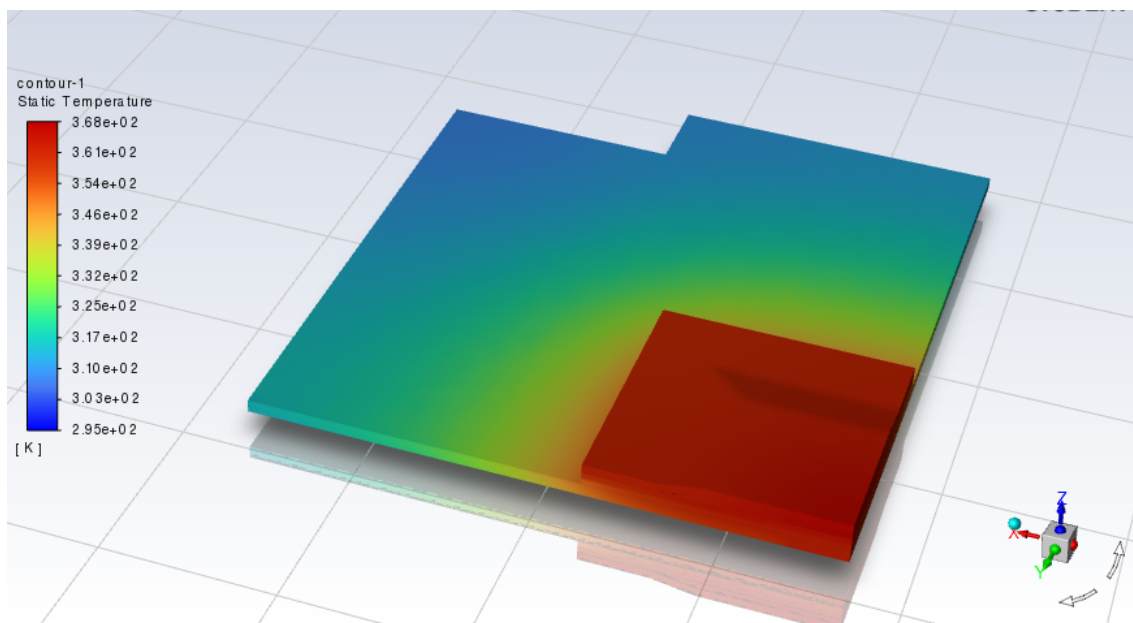


Figura 32: Distribuição de temperaturas no modelo físico.

## 5. Desenvolvimento de uma Caixa Estanque para Gestão da Carga Térmica

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver uma caixa estanque para a gestão da carga térmica em microeletrónica, fazendo uso exclusivo da convecção natural. Optou-se por testar um Raspberry Pi 3b+ e desenvolver uma caixa que permita o equipamento funcionar em carga sem que o processador inicie o processo de *throttling*. O Raspberry Pi será testado com a sua configuração de origem, pelo que não se irão utilizar dissipadores de calor. *Throttling* é um mecanismo de segurança que a generalidade dos processadores têm implementado no seu funcionamento. O que este processo faz é limitar a velocidade de funcionamento do processador após atingir uma temperatura, determinada como crítica, para o seu bom funcionamento. Não é recomendado, para a generalidade dos dispositivos eletrónicos com processadores, que funcionem a temperaturas superiores aos 80 °C. Períodos de funcionamento prolongados, acima desta temperatura, causam desgaste precoce no processador e podem levar a uma falha crítica. Os dispositivos Raspberry Pi, não são exceções a isso e, como tal, o modelo 3b+ tem o seu limite de *throttling* definido aos 80° C.

Serão recolhidos primeiramente dados referentes ao funcionamento do Raspberry Pi sem caixa, como forma de aproximar quais as potências térmicas dissipadas por cada um dos seus componentes. Será depois testado o equipamento em funcionamento, no interior da caixa original, e desenvolvidas mais duas caixas como sugestões de melhoria, com o objetivo de perceber quais os impactos da geometria da caixa no arrefecimento do Raspberry Pi por convecção natural.

### 5.1. Geometria do Raspberry Pi 3b+

Para que se possa simular um Raspberry Pi em *CFD* é importante elaborar um modelo que represente fielmente os principais componentes do Raspberry Pi. Na sua essência, um Raspberry Pi é um *PCB*, com vários componentes eletrónicos que o permitem classificar como *SoC*.

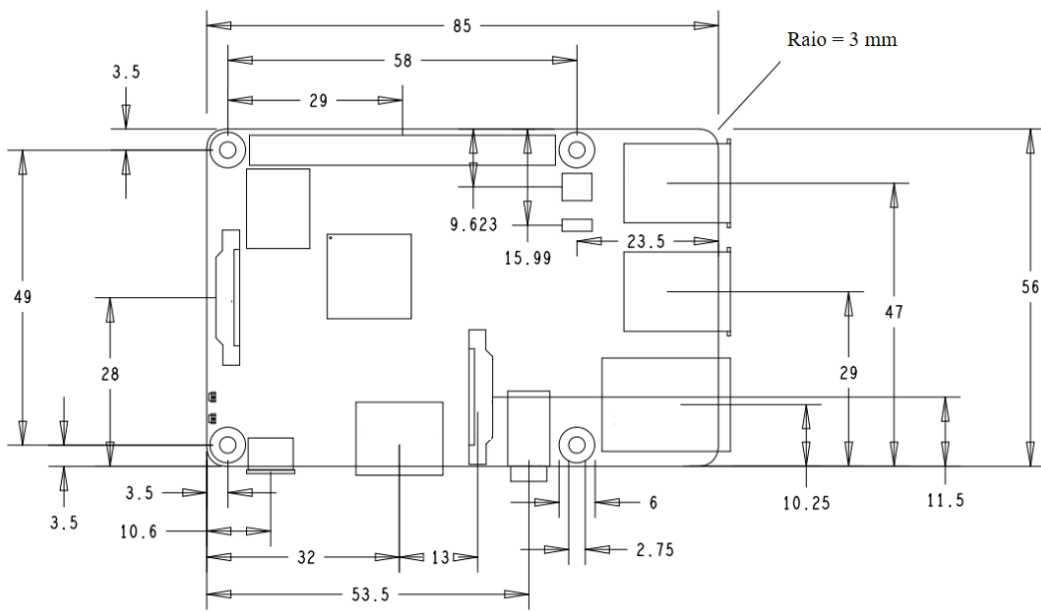


Figura 33: Dimensões, em mm, do Raspberri Pi 3b+.

Fonte: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/> (acedido em 28/09/2022)

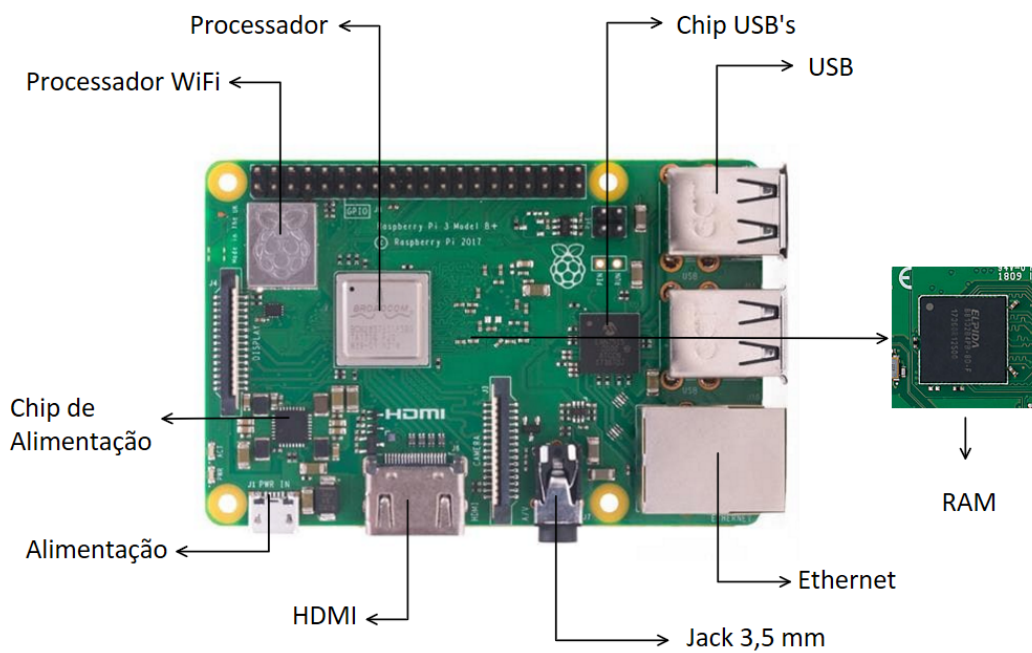


Figura 34: Componentes do Raspberri Pi 3b+.



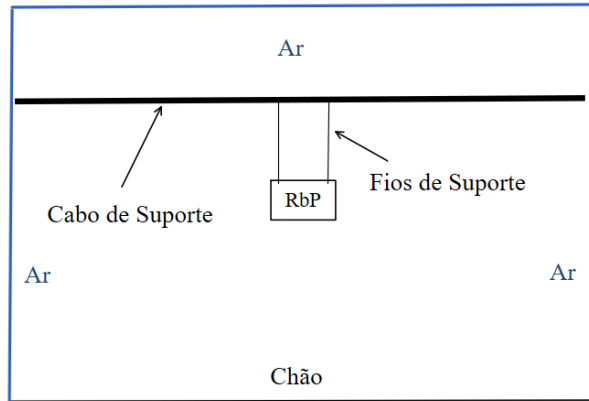


Figura 36: Diagrama do ambiente do ensaio.



Figura 37: Montagem com cabos para o teste de desempenho sem caixa.



Figura 38: Montagem sem cabos para o teste de desempenho sem caixa.

Para colocar o processador em esforço, utilizou-se o *software stressberry*. Este software é lançado a partir da linha de comandos do Raspberry Pi e permite definir parâmetros de teste como: período de estabilização, duração do teste e período de arrefecimento. Este *software* permite ainda gerar gráficos que indicam qual a velocidade de relógio e temperatura do processador a cada segundo de teste. Realizou-se um teste com um período de estabilização de 5 minutos, um período de carga de 15 minutos e um período de arrefecimento de 5 minutos, de onde se exportou o seguinte gráfico:

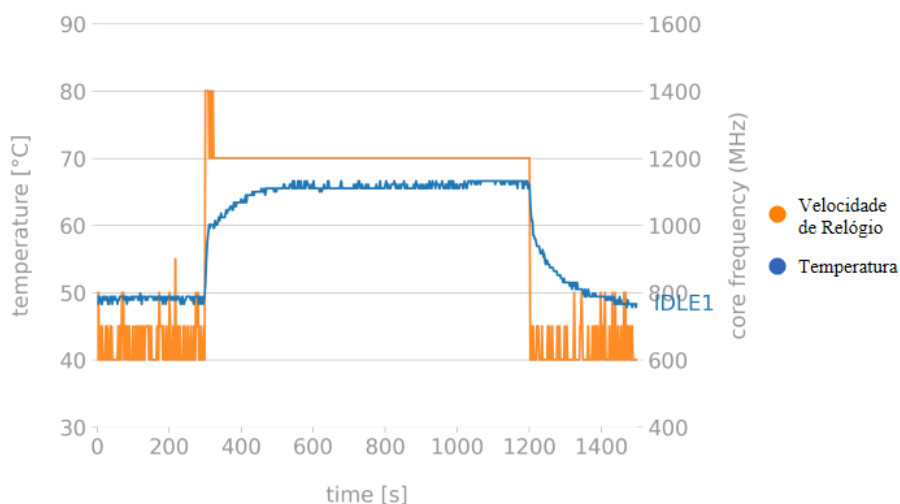


Figura 39: Gráfico exportado pelo *software Stressberry* para o Raspberry Pi sem caixa.

Daqui retira-se que a temperatura máxima atingida pelo processador, segundo o seu sensor interno, foi de 67 °C.

Verificou-se que os componentes do Raspberry Pi que emitem calor para além do processador são: O processador *WiFi*, o *chip* dos USB's, os USB's no caso de estarem conectados, a memória RAM, a Ethernet no caso de estar conectada, a entrada HDMI, a entrada da alimentação e o chip da alimentação. Nestes componentes, utilizaram-se dois métodos para recolher as temperaturas, sendo eles, uma pistola de infravermelhos e um termopar, ambos incluídos no equipamento "*Fluke 566 IR Thermometer*"[anexo 3]. As medições foram efetuadas no centro geométrico de cada componente quando o Raspberry Pi é visto de cima (posição da figura 34). A incerteza de leitura deste equipamento é de  $\pm 1$  °C ou  $\pm 1\%$  para temperaturas entre os -40 °C e os 1371 °C qualquer destes que tome o maior valor, segundo o manual de utilizador.

Elaborou-se a seguinte tabela com os valores medidos:

Tabela 8: Valores de temperaturas nos diferentes elementos do Raspberry Pi recolhidos experimentalmente.

	Valores Experimentais		
	Termopar [°C] +-1	Emissividade	IV [°C] +-1
RAM	39,00	1	41,00
Chip USB	38,30	1	39,10
WIFI	44,00	0,3	42,50
Supply	40,50	0,3	41,00
Chip Supply	34,90	1	33,00
HDMI	42,50	0,3	44,00
Ethernet	39,00	0,3	40,00
USB's	41,40	0,3	41,70
Processador	69,00	0,64	70,00

Os valores experimentais foram recolhidos no decorrer do teste representado na figura 39, durante o intervalo de tempo [600s ; 1200s]. Intervalo este onde, segundo o sensor interno do Raspberry Pi, a temperatura do processador se encontra estabilizada a 67 °C.

Para utilizar a pistola de infravermelhos é necessário indicar a emissividade do material ao qual se pretende ler a temperatura. Para descobrir este valor, recolheram-se primeiro as temperaturas com o termopar e, de seguida, foi-se ajustando o valor de emissividade da pistola de infravermelhos até que as temperaturas, lidas com este equipamento, se aproximassem dos valores lidos com o termopar. Os componentes são compostos essencialmente por três materiais, alumínio (emissividade = 0,3), silicone (material utilizado para fazer *chips*) (emissividade  $\approx$  1) e o material da tampa do processador que, neste caso, é também um alumínio mas com um acabamento mais rugoso (emissividade = 0,64). De notar que, na prática, não existem materiais com uma emissividade de 1 (emissividade do corpo negro), no entanto, no caso de estudo presente este valor provou-se uma boa aproximação.

## 5.3. Simulação Sem Caixa e Determinação das Potências Térmicas

### 5.3.1. Setup da Simulação

As simulações efetuadas utilizaram a metodologia descrita em 4 com a exceção do domínio de fluido. Visto que não se testou o Raspberry Pi num ambiente fechado, não seria correto realizar as simulações num domínio fechado.

Para aproximar o modelo à realidade, modelou-se um domínio de fluido com uma dimensão grande o suficiente para garantir que o Raspberry Pi não tem influência direta na temperatura do ar nas suas extremidades (figura 40).

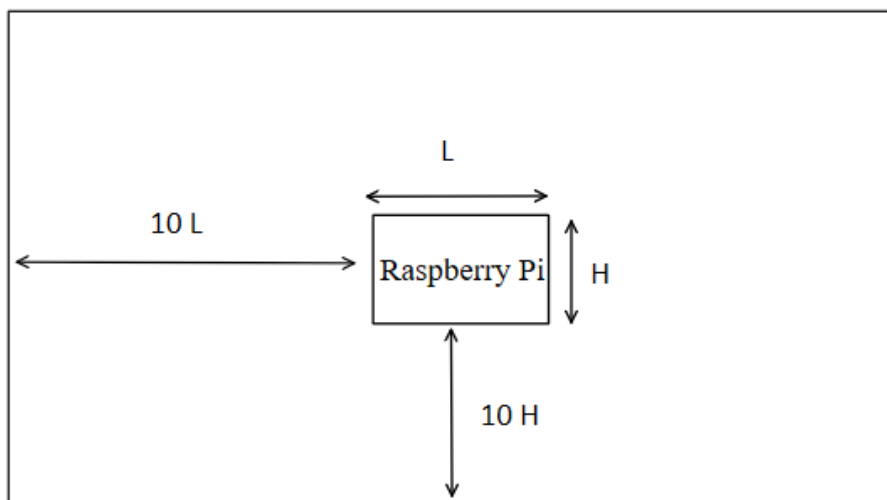


Figura 40: Esquema das dimensões do domínio do fluido.

As condições de fronteira implícitas às faces exteriores do domínio fluido foram do tipo "*pressure outlet*" onde se definiu uma pressão manométrica de 0 Pa (pressão na fronteira = pressão atmosférica) e uma temperatura de retorno igual à temperatura ambiente (24 °C). Este tipo de condições de fronteira irão simular um espaço aberto, nas condições indicadas, onde o ar pode escoar para qualquer direção sem restrições.

Os materiais associados a cada material são os descritos na tabela 2, apenas com a adição do alumínio que tem uma condutividade térmica de 202,4 (W/m.K). A emissividade do *PCB* manteve-se igual à descrita em 4.3.3. (0,92), estando as dos restantes elementos descritas na tabela 8.

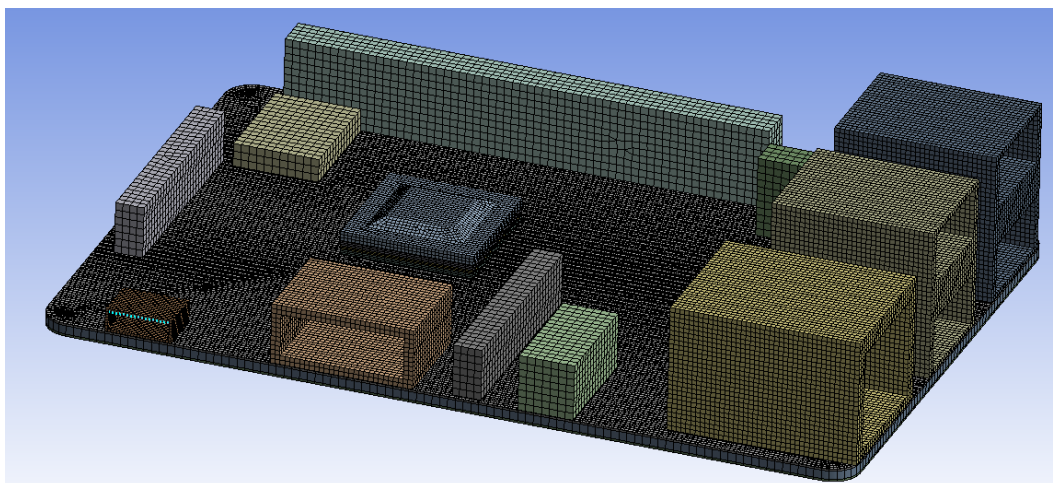


Figura 41: Malha utilizada para o Raspberry Pi.

### 5.3.2. Determinação das Potências Térmicas

O processo para determinar as potências térmicas dissipadas por cada elemento do Raspberry Pi, foi um processo de tentativa-erro. Adotaram-se diferentes valores de potência para cada elemento até que se atingissem temperaturas próximas das listadas na tabela 8.

Após este processo elaborou-se um quadro com: os valores de temperatura recolhidos experimentalmente, as potências térmicas dissipadas em cada componente e a temperatura atingida na simulação.

Tabela 9: Resultados da simulação sem caixa.

	P [W]	Termopar [°C] +-1	Infravermelhos [°C] +-1	CFD [°C]	
RAM	0,10	39,00	41,00	43,00	
Chip USB	0,40	38,30	39,10	41,65	
WIFI	0,50	44,00	42,50	46,82	
Supply	0,15	40,50	41,00	44,45	
Chip Supply	0,10	34,90	33,00	36,00	
HDMI	0,20	42,50	44,00	41,83	
Ether	0,20	39,00	40,00	41,53	
USB's	0,20	41,40	41,70	42,35	Sensor Interno [°C]
Processador	1,30	69,00	70,00	68,21	67,00

Sendo o processador o componente que mais aquece e que, em caso de sobreaquecimento, pode comprometer o bom funcionamento do Raspberry Pi, é também o componente onde é mais importante ter uma boa representação da temperatura. Neste componente em específico, optou-se por não se comparar os resultados aos dados recolhidos manualmente, mas sim, aos resultados do relatório gerado pelo

*software Stressberry*. Tomou-se esta opção uma vez que nas simulações futuras, em que o Raspberry Pi se encontra dentro de uma caixa, não é possível fazer a recolha de temperaturas que foi feita no caso sem caixa, sendo apenas possível comparar as simulações com os relatórios dos testes.

Quanto aos restantes componentes, o caso em que houve uma maior discrepância entre as temperaturas obtidas na simulação e as temperaturas recolhidas experimentalmente, foi no caso do processador do *WiFi*. A diferença da temperatura obtida na simulação deste componente para o valor recolhido com o termopar é de 2,82 °C. Apesar de ser uma diferença que excede a incerteza do equipamento de leitura, é preciso também contar com o erro associado à simulação, que, como descrito em 4.4, pode chegar aos 2,4%. Como esta diferença de temperaturas não tem uma influência crítica nas temperaturas atingidas pelo processador, consideraram-se os valores de potência listados na tabela 9 como boas aproximações.

### **5.3.3. Validação da distribuição de temperaturas no PCB**

Para confirmar a distribuição de temperaturas na zona do *PCB* do Raspberry Pi, recorreu-se a uma outra pistola de infravermelhos, desta vez gráfica (*Hotfind V* Anexo 4). Apesar de os valores de temperatura lidos não serem fiáveis, a imagem recolhida deverá dar uma boa aproximação da distribuição de temperaturas no *PCB* cuja emissividade é conhecida. Nas zonas do processador, processador *WiFi*, HDMI, alimentação, saída de som (*jack 3,5mm*), *USB's* e *ethernet*, não é possível verificar o gradiente de temperaturas. A pistola de infravermelhos trabalha com um valor de emissividade fixo, o que faz com que as temperaturas nos componentes com emissividades mais baixas apresentem valores inferiores de temperatura inferiores aos reais, justificando assim a cor azul/violeta nos componentes anteriormente descritos. No caso do *chip dos USB's*, acontece o contrário, como este componente tem uma cor preta e uma emissividade muito elevada, o valor de emissividade adequado para ler a sua temperatura teria que ser superior ao utilizado para recolher a imagem.

O perfil de temperaturas nos componentes não deverá ser contabilizado, uma vez que as emissividades dos materiais são muito diferentes (*PCB = 0,92* e *alumínio = 0,3*).

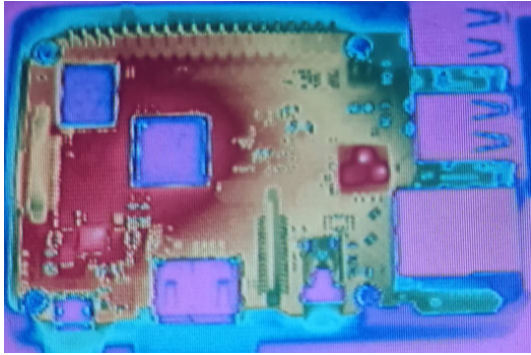


Figura 42: Imagem de infravermelhos do Raspberry Pi em funcionamento.

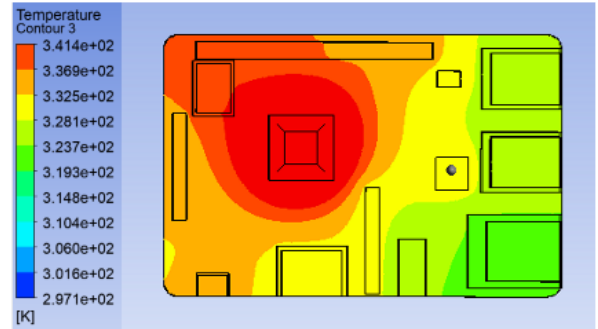


Figura 43: Perfil de temperaturas obtido na simulação.

Analisando as duas imagens qualitativamente, verifica-se que a distribuição de temperaturas no *PCB*, obtida na simulação, apresenta um perfil muito próximo da distribuição de temperaturas real.

### 5.3.4. Caracterização do Escoamento

Para perceber o escoamento do ar durante o ensaio sem caixa, elaboraram-se as seguintes figuras.

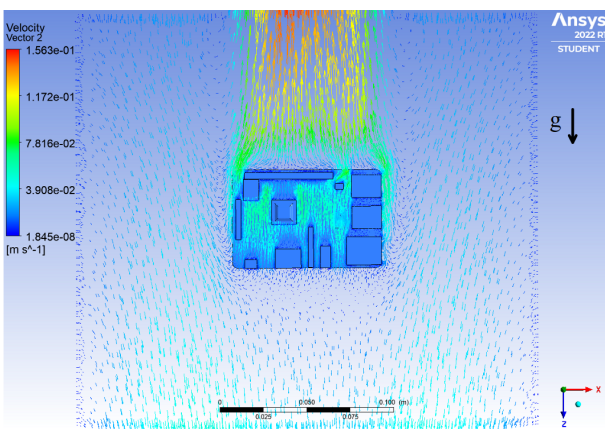


Figura 44: Vetores de velocidade na simulação do ensaio sem caixa (vista frontal).

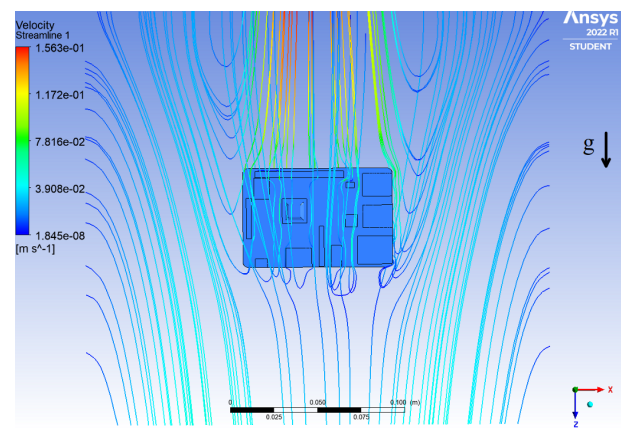


Figura 45: Linhas de corrente na simulação do ensaio sem caixa (vista frontal).

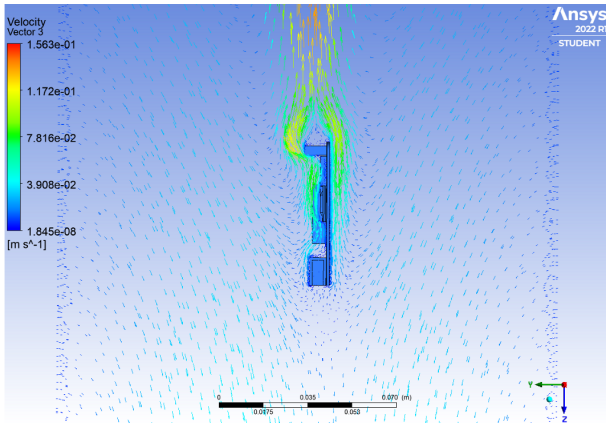


Figura 46: Vetores de velocidade na simulação do ensaio sem caixa (vista lateral).

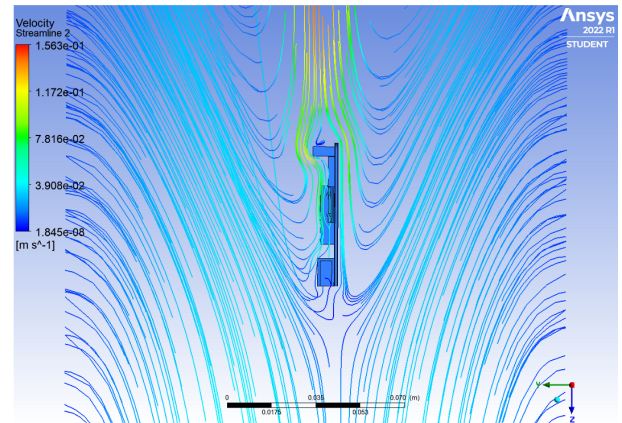


Figura 47: Linhas de corrente na simulação do ensaio sem caixa (vista lateral).

Daqui é possível perceber a pluma de velocidades do ar. Como o Raspberry Pi está a uma temperatura superior à do ar ambiente, a variação da massa volúmica do ar em função da sua temperatura, faz com que se crie uma corrente de ar ascendente na zona acima do equipamento. O valor máximo de velocidade obtido foi de 0,1563 m/s, no entanto, na zona do processador, a velocidade do ar toma um valor máximo de 0,08374 m/s.

## 5.4. Caixa Original

Existem, de origem, caixas para os Raspberry Pi's, no entanto, são caixas cujo objetivo é proteger, fisicamente, o aparelho e desprezam os problemas térmicos que possam surgir. A caixa original possui aberturas na sua parte superior e inferior. Estas aberturas podem provar-se um problema caso o equipamento esteja a funcionar num ambiente hostil, por exemplo, com poeiras no ar que possam causar danos ou problemas de desempenho no mesmo.



Figura 48: Caixa original disponível em <https://www.filipeflop.com/produto/case-raspberry-pi/>.

Para perceber qual o desempenho da caixa original face ao problema imposto neste trabalho, taparam-se as aberturas da caixa, deixando apenas as aberturas para periféricos e para fixação na parte inferior da caixa. Com esta caixa já adaptada, voltou-se a realizar o teste de esforço recorrendo ao *software Stressberry*. Mais uma vez, colocou-se o Raspberry Pi ao alto de forma a promover a convecção natural na zona do processador e iniciou-se o teste com o *software Stressberry* utilizando as mesmas opções que em 5.2.. O teste foi realizado na mesma sala a aproximadamente 24 °C.



Figura 49: Teste da caixa original com as entradas tapadas.

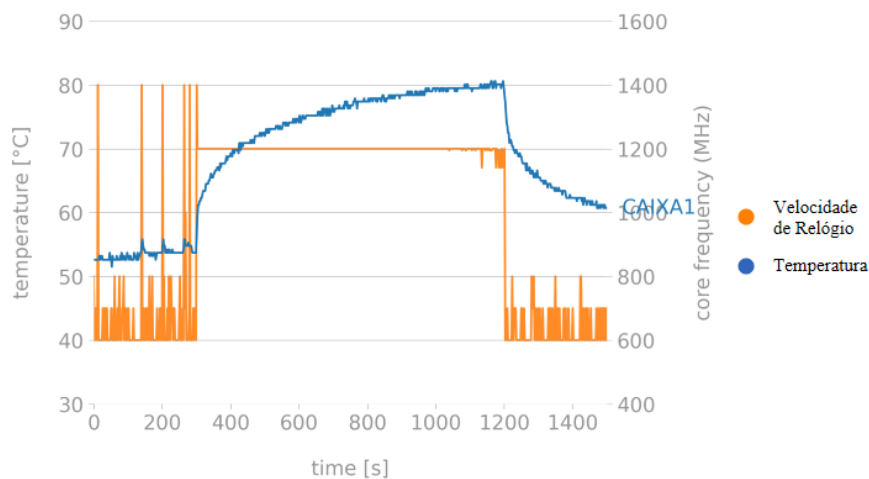


Figura 50: Gráfico exportado pelo *software Stressberry* para o Raspberry Pi na caixa original com as entradas tapadas.

Como se pode verificar na figura 50, o processador do Raspberry Pi, atinge temperaturas superiores ao limite em que se ativa o *throttling* (80 °C). Como se pode verificar na linha laranja, que representa a frequência do processador, existem oscilações quando a temperatura excede os 80 °C ( $T_{max} = 81$  °C). Este fenómeno é o referido *throttling* e, em casos mais extremos, tem uma grande influência no desempenho do Raspberry Pi. Conclui-se então que a geometria da primeira caixa não é adequada para a proteção deste equipamento a funcionar em carga.

### 5.4.1. Simulação da Caixa Original

Para poder comparar e melhor compreender o impacto da geometria da caixa no arrefecimento do Raspberry Pi, por convecção natural, simulou-se também um modelo com esta geometria.

Para esta simulação utilizou-se o modelo do Raspberry Pi já elaborado em 5.1., tendo sido apenas necessário modelar a caixa e o novo domínio do fluido.

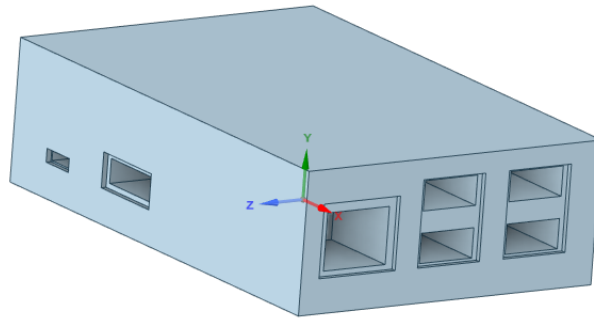


Figura 51: Modelo da caixa original [26,2 mm x 91,1 mm x 61,5 mm]. Anexo 1

O material da caixa é um polímero pelo que se considerou uma condutividade térmica de  $0,4 \left(\frac{W}{mK}\right)$  e uma emissividade de 0,91 como indicado em [10]. O *setup* da simulação foi realizado tal como descrito 5.3.1.

Os resultados da simulação mostram que o processador deveria atingir uma temperatura de 82,45 °C. Este valor é válido, e volta a confirmar o valor de potência proposto na tabela 9. Na tabela 9 a diferença entre a temperatura obtida na simulação e a temperatura lida pelo *software Stressberry*, é de 1,21 °C. Considerando agora o caso com a caixa original, a diferença de temperaturas entre a simulação e o *software* é de 1,45 °C. Caso a potência estivesse mal estimada, a temperatura na simulação teria que ser muito superior à lida no teste de esforço, uma vez que o efeito de *throttling* não é considerado na simulação. Efeito este que impede que a temperatura continue a aumentar no caso real.

É também interessante avaliar a velocidade do ar quando este entra em contacto com a tampa do processador.

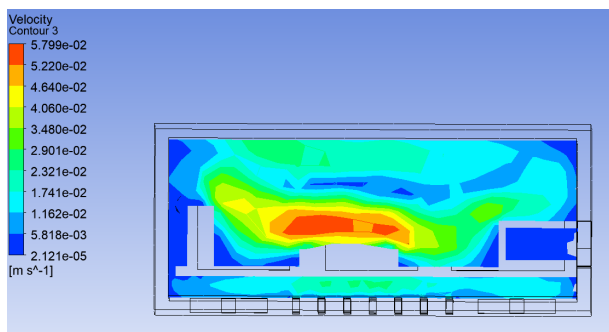


Figura 52: Velocidade na zona do processador com a caixa original.

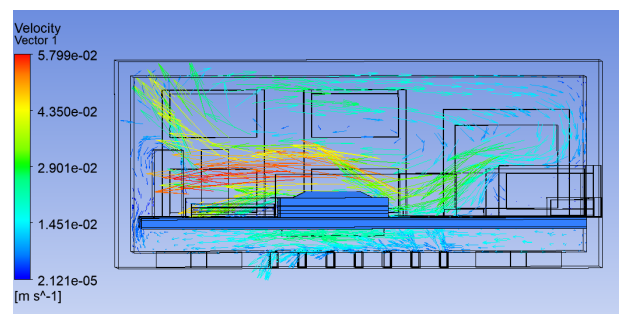


Figura 53: Velocidade na zona do processador com a caixa original em vetores.

Neste caso, o ar atinge uma velocidade máxima de 59,8 mm/s na zona próxima do processador. Este valor pode ser interessante para comparar com os valores atingidos utilizando outras geometrias, visto que a transferência de calor está diretamente relacionada com a velocidade a que o ar entra em contacto com a superfície aquecida.

Um dos problemas fáceis de identificar com a caixa original, é que o ar não tem por onde escoar livremente dentro da caixa (figura55). As entradas de ar encontram-se exclusivamente na parte inferior da caixa, o que faz com que o ar aquecido pelo processador, fique retido mais tempo no interior da caixa aumentando assim a temperatura no seu interior.

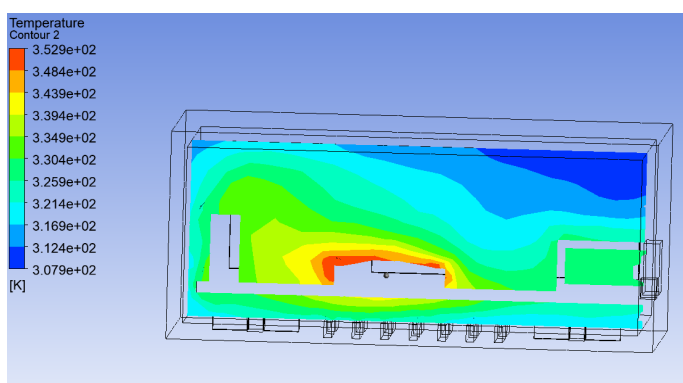


Figura 54: Perfil de temperatura do ar dentro da caixa original na zona do processador.

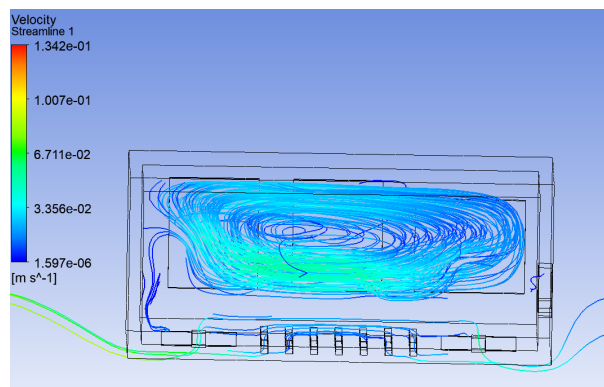


Figura 55: Linhas de escoamento do ar no interior da caixa original.

A temperatura média do ar, no plano representado na figura 54, é de 55,66 °C.

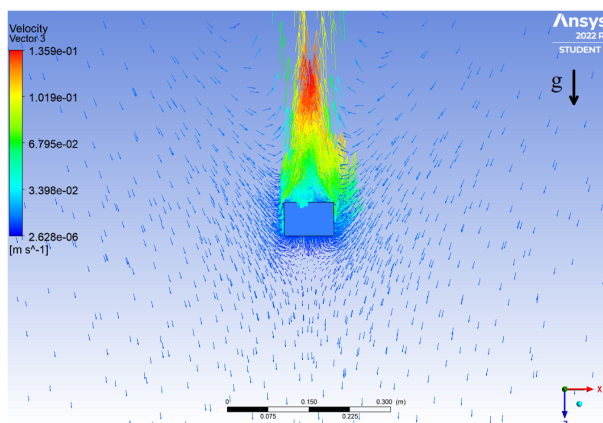


Figura 56: Pluma ao redor da caixa original com o Raspberry Pi em funcionamento.

## 5.5. Proposta de Caixa nº 1 (Caixa P1)

Para tentar resolver o problema de o ar não ter por onde escoar na caixa original, elaborou-se uma caixa com pequenos entalhes (1 mm) na sua lateral e com o mesmo volume que a caixa original. Estes entalhes deverão ser suficientes para promover o movimento do ar dentro da caixa. Visto que a caixa trabalha numa posição lateral, o ar deverá entrar e sair por zonas diferentes, evitando assim o problema que acontecia com a caixa original.

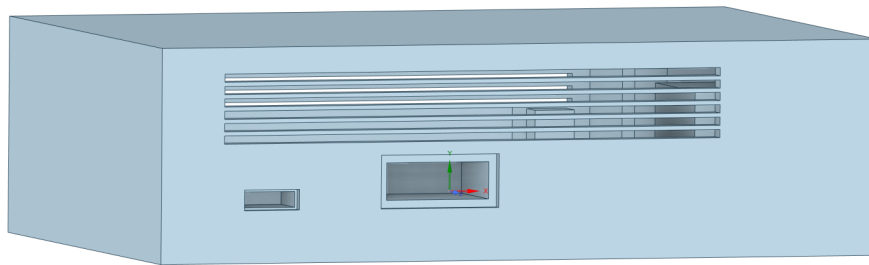


Figura 57: Geometria da caixa P1 [26,2 mm x 91,1 mm x 61,5 mm]. Anexo 1

Utilizando a mesma metodologia que para a caixa original, simulou-se então o modelo com esta nova caixa. Obteve-se uma temperatura para o processador de 81,21°C. Como esperado, o processador não aquece tanto quanto na situação da caixa original (82,45°C), no entanto, este resultado ainda não é satisfatório uma vez que a temperatura ainda é superior a 80 °C não impedindo o *throttling*.

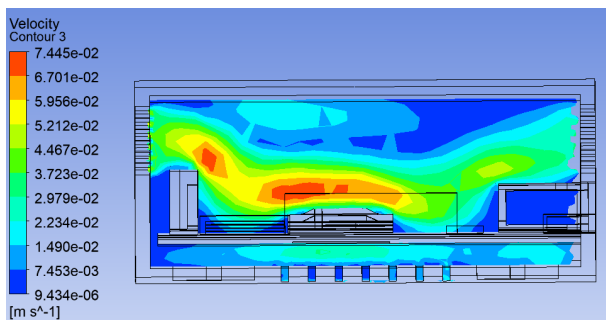


Figura 58: Velocidade na zona do processador com a caixa P1.

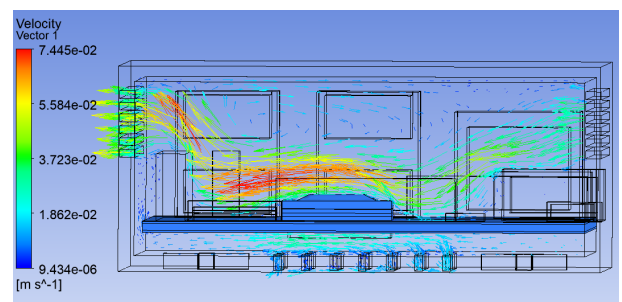


Figura 59: Velocidade na zona do processador com a caixa P1 em vetores.

Com a caixa P1, o ar atinge uma velocidade de 74,5 mm/s, na zona de contacto com o processador. Esta velocidade é mais elevada que a velocidade atingida nesta zona, com a caixa original.

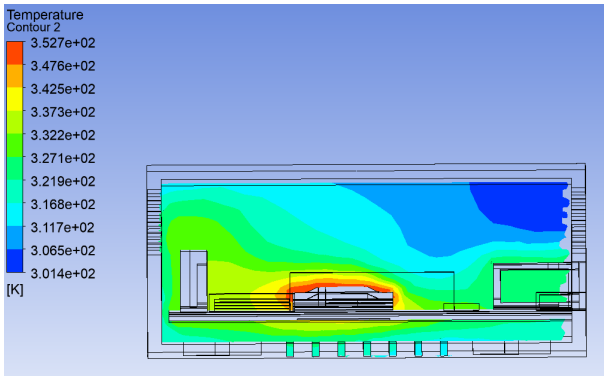


Figura 60: Perfil de temperatura do ar dentro da caixa P1 na zona do processador.

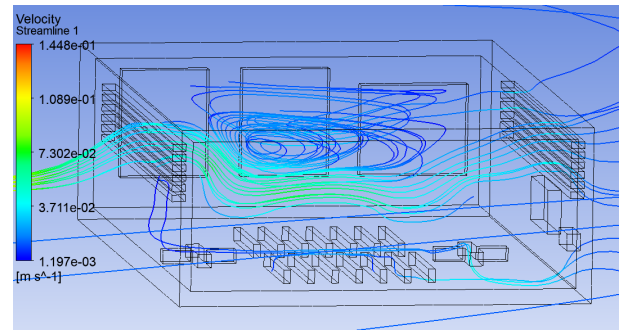


Figura 61: Linhas de escoamento do ar no interior da caixa P1.

A temperatura média do ar no plano representado na figura 60, é de 48,54 °C.

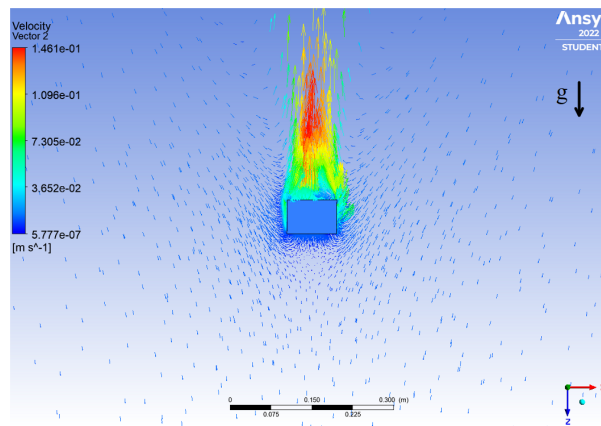


Figura 62: Pluma ao redor da caixa P1 com o Raspberry Pi em funcionamento.

Estando a velocidade de escoamento do ar diretamente relacionada com o calor que este troca com o processador, a solução deverá passar por elaborar uma geometria que potencie o aumento desta velocidade e/ou que promova uma diminuição da temperatura média do ar no interior da caixa. Neste caso, comprova-se que as entradas de ar permitem que o ar entre e saia da caixa por zonas diferentes, favorecendo este aumento de velocidade. No entanto, esta adaptação traz outra vantagem à caixa. O facto de haver mais entradas e saídas de ar significa também que o ar é renovado mais rapidamente, controlando assim o aumento da temperatura média do ar no interior da caixa.

## 5.6. Proposta de Caixa nº 2 (Caixa P2)

Tendo visto a influência benéfica, ainda que insuficiente, de criar aberturas de ar nas laterais da caixa, decidiu-se aumentar o volume da caixa, de forma a que o ar tenha mais espaço para acelerar. O aumento do volume, possibilita ainda que se aumente o número de entalhes na lateral, possibilitando assim renovar o ar no interior da caixa de forma ainda mais eficiente sem expor diretamente o equipamento ao ar exterior. A caixa P2 toma então o seguinte aspeto:

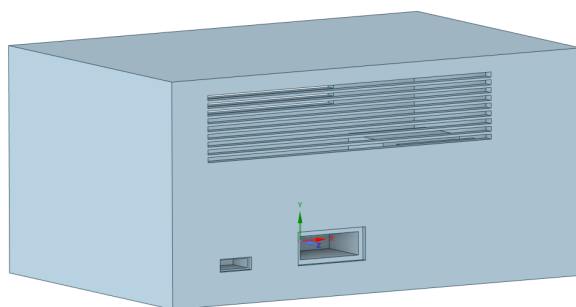


Figura 63: Geometria da caixa P2 [44 mm x 91,1 mm x 61,5 mm]. Anexo 1

Realizando o mesmo *setup* que nos casos anteriores, realizou-se mais uma simulação.

Com a caixa P2, o processador atinge uma temperatura de 79,6 °C. Esta temperatura já é suficiente para evitar que o processador inicie o processo de *throttling*.

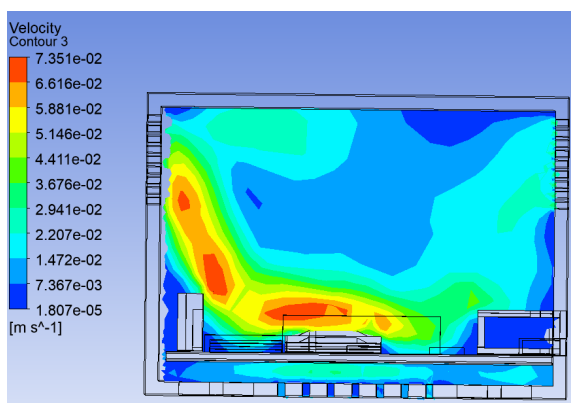


Figura 64: Velocidade na zona do processador com a caixa P2.

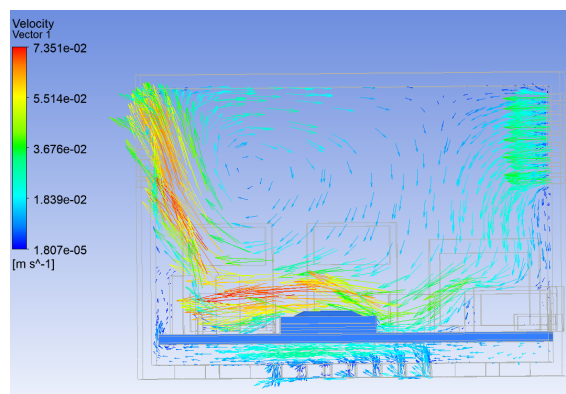


Figura 65: Velocidade na zona do processador com a caixa P2 em vetores.

A velocidade máxima do ar na zona do processador é de 77,8 mm/s.

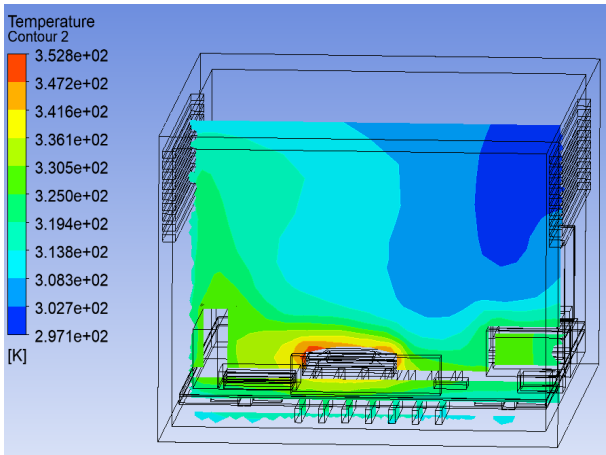


Figura 66: Perfil de temperatura do ar dentro da caixa P2 na zona do processador.

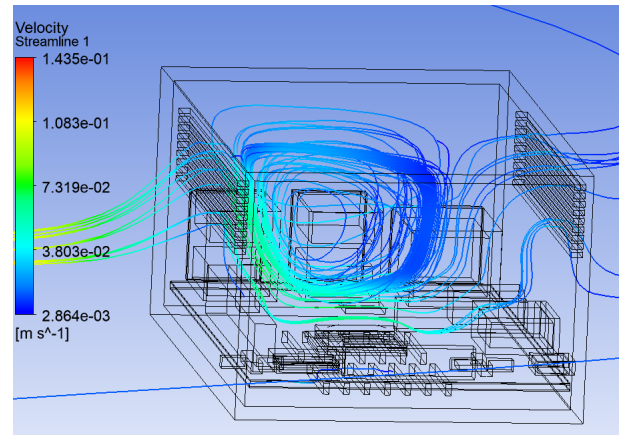


Figura 67: Linhas de escoamento do ar no interior da caixa P2.

A temperatura média do ar no plano representado na figura 66, é de 41,54 °C.

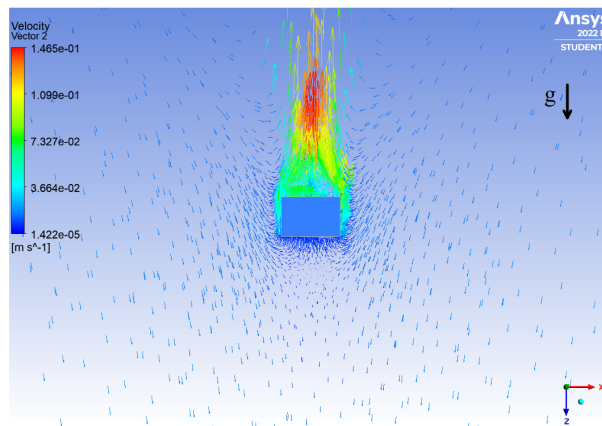


Figura 68: Pluma ao redor da caixa P2 com o Raspberry Pi em funcionamento.

Neste caso, a velocidade na zona do chip, não aumenta tanto como na passagem da caixa original para a caixa P1. No entanto, a temperatura média do ar no plano avaliado, baixa significativamente devido ao aumento do volume de ar no interior da caixa. Este aumento de volume, no caso da caixa P2, vem ainda acompanhado de uma maior área de entrada para o ar, todos estes fatores contribuem para diminuir a temperatura do ar no interior da caixa. No caso da caixa P1, e analisando a figura 60 a temperatura do ar que entra em contacto com a tampa do processador está compreendida entre [248 K

e 253 K]. No caso da caixa P2, e analisando a figura 66 a temperatura do ar que entra em contacto com a tampa do processador está compreendida, entre [242 K e 253 K]. Este é o principal fator responsável pela diminuição de temperatura do processador na caixa P2 face à caixa P1.

## 5.7. Impressão e Teste da Caixa P2

A temperatura obtida para o processador com a simulação realizada em 5.6, é de 79,6° C. Apesar deste valor parecer demasiado próximo do limite do *throttling*, decidiu-se adaptar o modelo para que este pudesse ser impresso numa impressora 3D (Anexo 5) e testado como foi testada a caixa original. Esta decisão foi tomada, pois todas as simulações feitas neste trabalho, têm originado resultados cerca de 1 a 2 °C acima daqueles que se verificam experimentalmente. Caso o mesmo se verifique para a Caixa P2, o processador não deverá iniciar o processo de "*throttling*" estando assim resolvido o problema inicial deste trabalho.

Após imprimir a caixa P2 pela primeira vez, verificou-se imediatamente que seria necessário fazer algumas adaptações. Como as ranhuras na lateral da caixa P2, são separadas por tiras de material muito finas, quando se imprimiu esta caixa pela primeira vez, esses separadores empenaram, o que fez com que no centro das ranhuras ficasse praticamente fechado. Para evitar que isso acontecesse colocaram-se duas vigas igualmente espaçadas a reforçar a estrutura em questão.

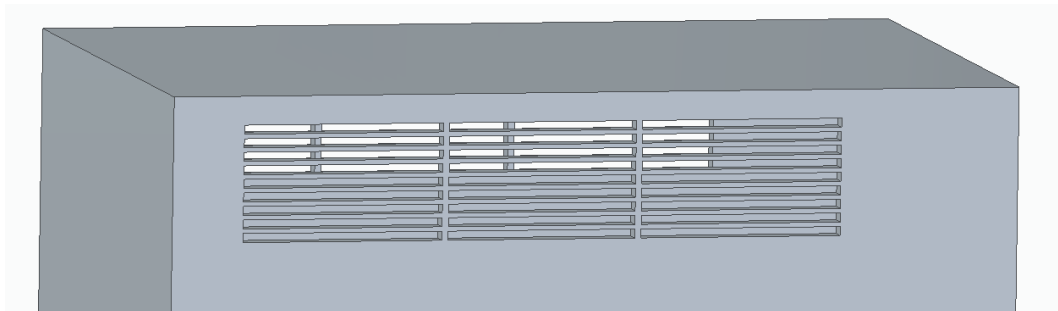


Figura 69: Adaptação para impressão 3D.



Figura 70: Caixa P2 impressa.

Submeteu-se, mais uma vez, o Raspberry Pi a um teste de esforço recorrendo ao *software Stressberry*. Para este último teste, e visto que a temperatura obtida na simulação é muito próxima do limite, mudaram-se ligeiramente os parâmetros de teste de forma a não deixar dúvidas sobre desempenho da caixa. Diminuiu-se tanto o tempo de estabilização como o tempo de arrefecimento para 2 minutos e aumentou-se o tempo de teste para 25 minutos. O ensaio foi realizado numa sala a 24 °C.



Figura 71: Teste da caixa P2.

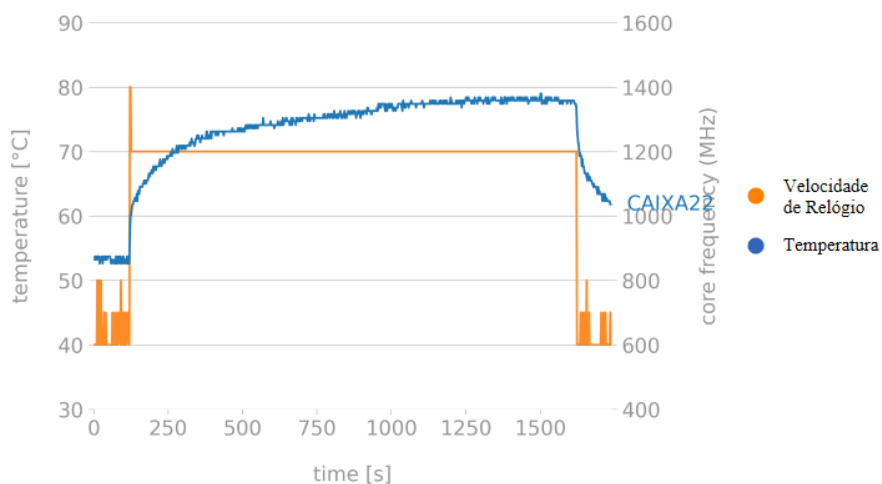


Figura 72: Gráfico exportado pelo *software Stressberry* para o Raspberry Pi na caixa P2 com as entradas tapadas.

A temperatura máxima atingida foi de 79 °C num teste que durou ainda mais 10 minutos que os anteriores. O Raspberry Pi não iniciou o processo de *throttling* permitindo assim concluir que a caixa P2 é adequada para a utilização de um Raspberry Pi 3b+ em esforço.

Um aspeto importante a destacar neste trabalho, é que todos os testes foram feitos num ambiente com uma temperatura controlada (24 °C). Em casos com a temperatura ambiente mais elevada, estes resultados iriam sofrer alterações e a caixa desenvolvida poderia não ser suficiente para evitar o sobreaquecimento do processador. No entanto, a ser necessário continuar o processo iterativo de gerações de novas caixas, as conclusões retiradas neste trabalho mantêm-se relevantes e serviriam de base para as próximas adaptações.

## 6. Conclusão

Para abordar o problema proposto inicialmente, de desenvolver uma caixa para proteção de um *SoC* que não comprometa o seu desempenho, recorrendo apenas à condução térmica que acontece no equipamento e à convecção natural como métodos de arrefecimento, optou-se pela metodologia de simulação descrita em [10], uma vez que fornece dados experimentais como referência. Desenvolveu-se um modelo semelhante ao descrito em [10], realizando as adaptações necessárias, devido às restrições impostas pela versão de estudante do *Ansys Fluent* e à capacidade computacional disponível. Foi então validado o modelo *CFD* simplificado, mostrando uma boa consistência nos resultados e um erro relativamente ao método experimental de 0,63% no chip e 2,46% na tampa e, relativamente ao método numérico, de 1,37% no *chip* e 1,38% na tampa.

O equipamento escolhido para testar foi um Raspberry Pi 3b+. Elaborou-se um modelo do Raspberry Pi com base no modelo de um *SoC*, validado anteriormente e realizaram-se testes de desempenho térmica num ambiente controlado. Com os valores experimentais recolhidos, estimaram-se as potências térmicas dissipadas por cada componente do Raspberry Pi, via tentativa e erro, comparando os resultados obtidos no modelo *CFD* com os resultados experimentais.

Após ter a metodologia bem definida, realizaram-se testes experimentais na caixa original apenas com as entradas de ar associadas a dispositivos de fixação, de onde se concluiu que o Raspberry Pi atinge temperaturas superiores a 80 °C que limitam o seu desempenho. Esta hipótese foi também testada em *CFD* onde se reproduziram as temperaturas atingidas experimentalmente, verificando assim, mais uma vez, a adequação das metodologias de simulação e simplificações utilizadas.

Desenvolveram-se mais duas caixas com geometrias diferentes, Caixa P1 e Caixa P2. A Caixa P1 tem exatamente o mesmo volume interior que a caixa original, no entanto, fizeram-se duas grelhas, em faces opostas da caixa, para permitir que o ar entre e saía por sítios diferentes. Esta adaptação permite que o ar possa escoar para o exterior à medida que é aquecido. Este ponto e o facto de que existe um maior caudal de ar a entrar dentro da caixa, permite que o ar atinja velocidades superiores no seu interior, promovendo assim trocas térmicas com os componentes.

A segunda caixa desenvolvida (Caixa P2) possui um maior volume, o que permite aumentar a área das grelhas nas suas laterais sem expor diretamente os componentes do Raspberry Pi ao exterior. Esta caixa

foi a que apresentou um melhor desempenho a nível térmico. Este melhor desempenho foi devido ao aumento do volume da caixa, que permitiu baixar a média de temperaturas do ar na zona do processador em até 6 °C relativamente à Caixa P1. A velocidade máxima atingida pelo ar no interior da caixa também aumentou, no entanto, não tão drasticamente como quando comparando a Caixa P1 à caixa original.

Por fim, imprimiu-se a Caixa P2, e testou-se o seu desempenho, nas mesmas condições que a caixa original. Verificou-se que o Raspberry Pi já não atinge a temperatura limite de 80 °C no processador e, portanto, o seu desempenho já não é afetado como acontece utilizando a caixa original.

Este trabalho comprova que, manipulando a geometria da caixa de forma a promover a convecção natural, é possível colocar um *SoC* em funcionamento no seu interior, sem que se atinjam temperaturas críticas para o seu bom funcionamento. No entanto, as diferenças de temperaturas do pior caso para a caixa final são apenas de 3 °C. Esta diferença de temperaturas pode não ser suficiente no caso de se trabalharem com potências superiores às testadas neste trabalho. Atendendo aos resultados obtidos, percebe-se que, para dispensar outros métodos de arrefecimento e promovendo apenas a convecção natural, é necessário desenvolver caixas com volumes grandes quando comparados ao *SoC*. Um maior volume implica mais gastos em termos materiais e, em alguns casos, pode impedir a colocação da caixa numa posição próxima o suficiente da fonte para que se destaquem as vantagens do *Edge Computing*. De qualquer forma, considerando, a crescente acessibilidade das impressoras 3D e o preço económico do PLA comum, caixas que promovam a convecção natural e que possam ser impressas de forma relativamente barata, podem mostrar-se boas soluções em problemas com *SoC's* a funcionarem com potências semelhantes às utilizadas neste trabalho.

Deste trabalho desenvolveu-se ainda o artigo [21], submetido para a 20ª conferência internacional de mecânica experimental (ICEM20), onde são descritas de forma sucinta as metodologias utilizadas ao longo deste documento, bem como os resultados obtidos, dando destaque à metodologia de simulação e à utilidade da prototipagem rápida em investigação.

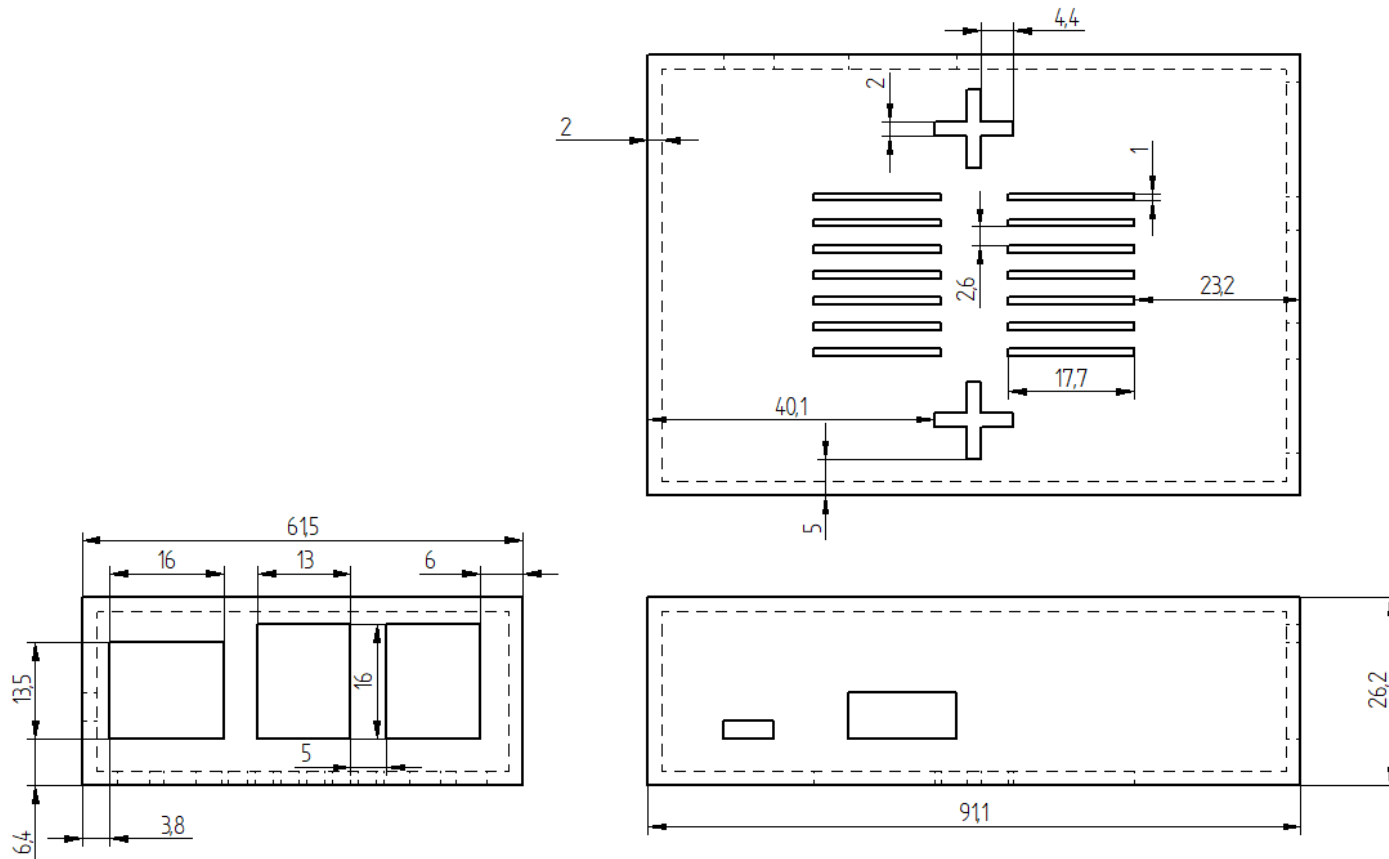
## Bibliografia

- [1] S. J. Kim e S. W. Lee, *Air cooling technology for electronic equipment*. CRC press, 1996.
- [2] F. Incropera, “Convection heat transfer in electronic equipment cooling,” 1988.
- [3] S. Lee, J. Culham, M. Yovanovich et al., ““The Effect Of Common Design Parameters on the Thermal Performance of Microelectronic Equipment: Part 1-Natural Convection,” *Heat Transfer in electronic equipment*, vol. 171, pp. 47–54, 1991.
- [4] P. Rodgers, V. Eveloy, J. Lohan, C.-M. Fager, P. Tiilikka e J. Rantala, “Experimental validation of numerical heat transfer predictions for single and multi-component printed circuit boards in natural convection environments,” em *Fifteenth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (Cat. No. 99CH36306)*, IEEE, 1999, pp. 54–64.
- [5] R. W. Ruddock, *Basic infrared thermography principles*. Reliabilityweb. com, 2010.
- [6] L. Florio e A. Harnoy, “Combination technique for improving natural convection cooling in electronics,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 46, n.º 1, pp. 76–92, 2007.
- [7] J. Sylvestre, “Integrated modeling of C4 interconnects,” em *2007 Proceedings 57th Electronic Components and Technology Conference*, IEEE, 2007, pp. 1084–1090.
- [8] M. K. Toure, P. M. Souare, S. Allard, B. Foisy, E. Duchesne e J. Sylvestre, “CFD-based iterative methodology for modeling natural convection in microelectronic packages,” em *2018 19th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE)*, IEEE, 2018, pp. 1–8.
- [9] P. M. Souare, M. K. Toure, S. Allard et al., “High Precision Numerical and Experimental Thermal Studies of Microelectronic Packages in Still Air Chamber Tests,” em *2018 7th Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC)*, IEEE, 2018, pp. 1–8.
- [10] M. K. Touré, P. M. Souaré e J. Sylvestre, “Best Practices for Thermal Modeling in Microelectronics with Natural Convection Cooling: Sensitivity Analysis,” *Journal of Electronics Cooling and Thermal Control*, vol. 10, n.º 2, pp. 15–33, 2021.

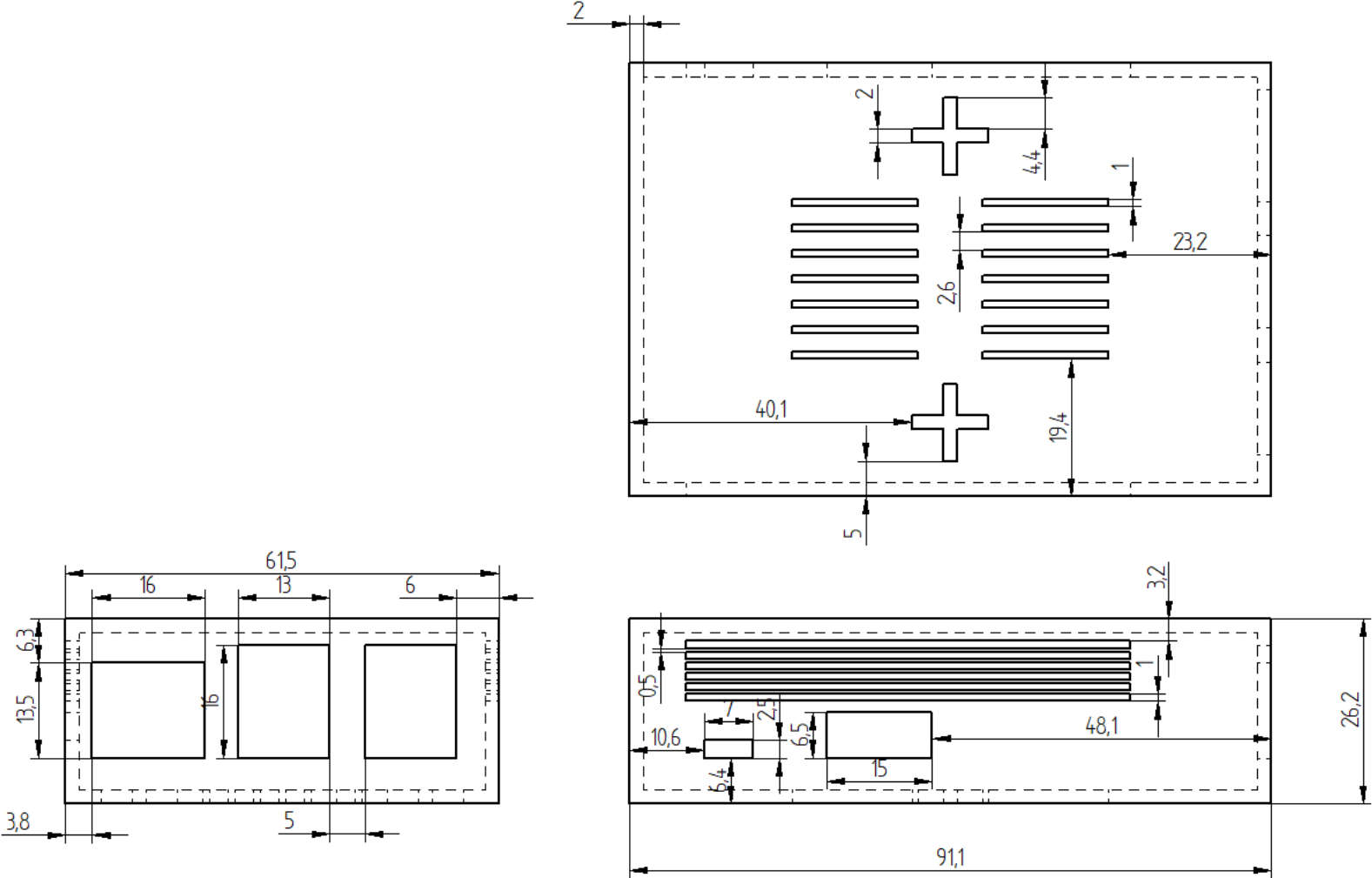
- [11] JEDEC, “Test Boards for Area Array Surface Mount Package Thermal Measurements,” *JESD51-9*, jul. de 2000.
- [12] JEDEC, “Integrated Circuits Thermal Test Method Environmental Conditions- Natural Convection (Still Air),” *JESD51-2A*, 2008.
- [13] A. Fluent, “ANSYS fluent theory guide 15.0,” *ANSYS, Canonsburg, PA*, vol. 33, 2013.
- [14] W. K. Anderson e D. L. Bonhaus, “An implicit upwind algorithm for computing turbulent flows on unstructured grids,” *Computers & Fluids*, vol. 23, n.º 1, pp. 1–21, 1994.
- [15] *Ansys Fluent User’s Guide*.
- [16] “Engineering Toolbox.” (2022), URL: <http://www.engineeringtoolbox.com>.
- [17] F. M. White e J. Majdalani, *Viscous fluid flow*. McGraw-Hill New York, 2006, vol. 3.
- [18] J. P. Holman, *Heat transfer*. 2010.
- [19] “Omega engineering.” (2022), URL: <https://www.omega.co.uk/>.
- [20] V. Eveloy, P. Rodgers e M. Hashmi, “Numerical heat transfer predictive accuracy for an in-line array of board-mounted plastic quad flat back components in free convection,” 2005.
- [21] E. Guia e N. Marques, “A Rapid Prototyping Methodology for the Development of Enclosures for Microelectronics,” ICEM20 (submetido), 2022.
- [22] J. H. Lau, *Electronic packaging: design, materials, process and reliability*. McGraw-Hill, 1998.
- [23] F. M. White, *Mecânica dos fluidos*. McGraw Hill, 1988.
- [24] S. Konecni, X. Wang, R. Magnusson e A. Haji-Sheikh, “Convection cooling of microelectronic chips,” em *[1992 Proceedings] Intersociety Conference on Thermal Phenomena in Electronic Systems*, IEEE, 1992, pp. 138–144.
- [25] P.-W. Hwang, H.-C. Cheng, J. Fang e J.-H. Li, “CFD-based thermal characterization of board-level microelectronic devices under natural convection cooling,” em *2007 International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology*, IEEE, 2007, pp. 79–82.

# Anexo 1

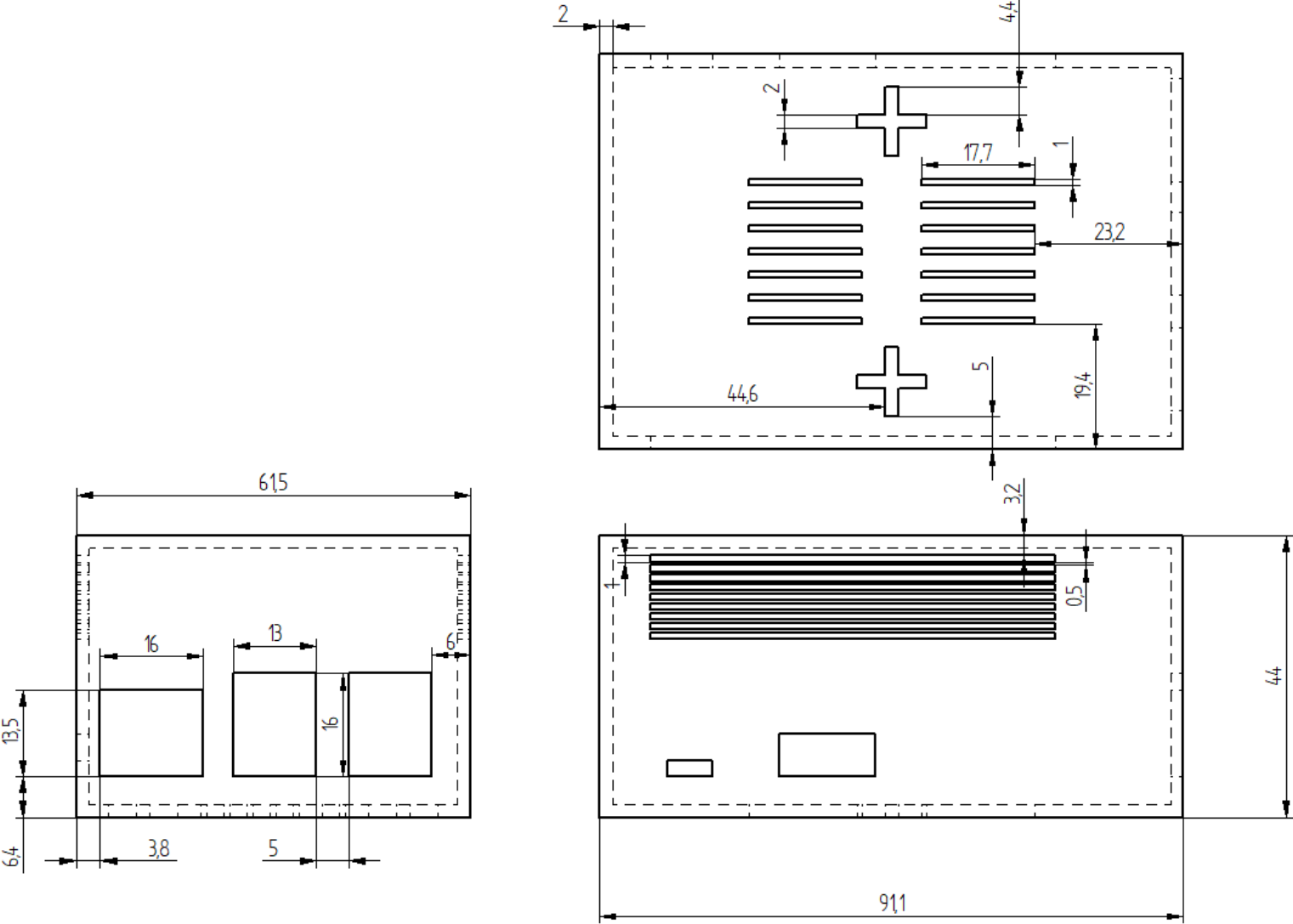
## Desenho da Caixa Original



# Desenho da Caixa P1



# Desenho da Caixa P2



## Anexo 2

### *Stressberry*

*Stressberry* é um *software* desenvolvido por utilizadores do Raspberry Pi com o objetivo de recolher as temperaturas atingidas quando o equipamento funciona à máxima velocidade de relógio (sem *over-clock*) durante longos períodos de tempo. Este *software* torna-se então uma ferramenta útil para perceber as diferenças no desempenho dos Raspberry Pi quando funcionam em diversos ambientes e condições. É possível de instalar o *Stressberry* em qualquer equipamento Raspberry Pi a partir da linha de comandos utilizando o seguinte código:

```
sudo apt install
```

```
sudo apt full-upgrade
```

Para correr os testes de esforço é recomendado criar diretórios para armazenar os ficheiros criados pelo *software*.

```
mkdir /TemperatureTests
```

```
cd /TemperatureTests
```

O comando para iniciar o ensaio é o seguinte:

```
/home/pi/.local/bin/stressberry-run -n "My Test-d 1800 -i 300 -c 4 mytest.out
```

Onde:

[-n "My Test"] - Nome do ensaio.

[-i 300] - 300 segundos para os períodos de estabilização e arrefecimento, no início e final do ensaio, respetivamente.

[-d 1800] - 1800 segundos em esforço.

[-c 4] - 4 núcleos ativos no processador.

[mytest.out] - nome e formato do ficheiro com os dados recolhidos durante o ensaio.

Após finalizar o ensaio é possível exportar gráficos à semelhança do utilizado na figura 50. Para gerar estes gráficos deve utilizar-se o seguinte código:

```
MPLBACKEND=Agg /home/pi/.local/bin/stressberry-plot mytest.out  
-f -d 300 -f -l 400 1600 -t 30 90 -o mytest.png --hide-legend --not-transparent --l
```

Onde:

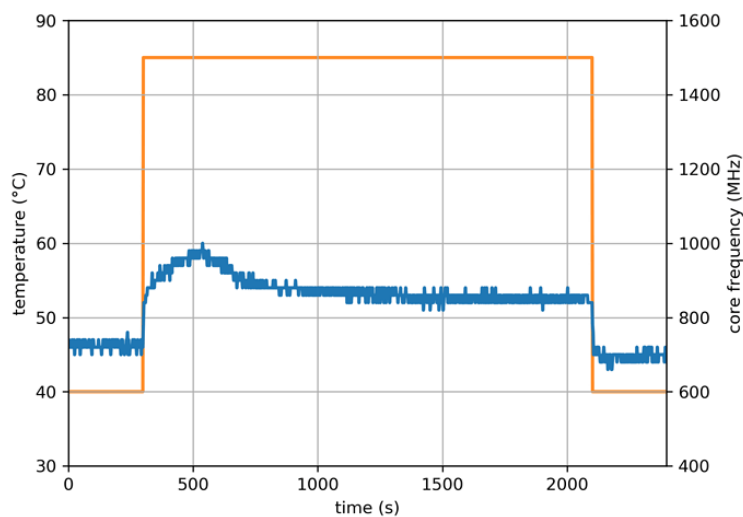
[mytest.out] - Nome do ficheiro de dados.

[-f] - Gera informação sobre a frequência do CPU.

[-l 400 1600] - Limites mínimo/máximo da frequência.

[--not-transparent] - Gera um gráfico com um fundo opaco.

[mytest.out] - nome e formato do ficheiro com os dados recolhidos durante o ensaio.



Exemplo de gráfico exportado pelo *software Stressberry*.



Fonte: <https://core-electronics.com.au/guides/how-to-stress-test-temperature-on-raspberry-pi/> (acedido em 28/09/2022)

## Anexo 3

### *Fluke 566 IR Thermometer*

O Equipamento *Fluke 566 IR Thermometer*, é uma pistola de infravermelhos e termopar, num só dispositivo. É um equipamento com uma construção robusta para enfrentar ambientes industriais, elétricos e mecânicos. Adicionalmente, é um equipamento de fácil utilização, possuindo três botões de interface com o menu (disponível em seis linguagens). O termopar permite recolher temperaturas entre os -270 °C e os 1372 °C, já a pistola de infravermelhos permite recolher temperaturas entre os -40 °C e os 650 °C, sendo para este último necessário conhecer a emissividade do material. Outras funções úteis do equipamento são:

- Emissividade ajustável, permitindo ler a temperaturas numa grande variedade de superfícies.
- Permite guardar até 20 pontos de informação para transferência ou referência futura.
- Dois níveis de iluminação na interface.
- Avisos sonoros e visuais para medições fora dos limites definidos pelo utilizador.
- Permite correr funções como: MAX, MIN, DIF e AVG para ajudar na identificação de problemas.



A tabela de características é a seguinte:

### Características do equipamento *Fluke 566 IR Thermometer*

Fonte: <https://www.fluke.com/en-us/product/temperature-measurement/ir-thermometers/fluke-566#> (acedido em 28/09/2022)

Product Specifications		
Infrared temperature range	-40°C to 650°C (-40°F to 1202°F)	
Infrared accuracy	< 0°C (32°F): $\pm(1.0^{\circ}\text{C} (\pm 2.0^{\circ}\text{F}) + 0.1^{\circ}/1^{\circ}\text{C or }^{\circ}\text{F})$ ;	
	> 0°C (32°F): $\pm 1\%$ or $\pm 1.0^{\circ}\text{C} (\pm 2.0^{\circ}\text{F})$ , whichever is greater	
Display resolution	0.1°C / 0.1°F	
Infrared spectral response	8 $\mu\text{m}$ to 14 $\mu\text{m}$	
Infrared response time	< 500 msec	
Thermocouple Type-K input temperature range	-270°C to 1372°C (-454°F to 2501°F)	
Thermocouple Type-K input accuracy	-270°C to -40°C	$\pm(1^{\circ}\text{C} + 0.2^{\circ}/1^{\circ}\text{C})$ (-454°F to -40°F: $\pm(2^{\circ}\text{F} + 0.2^{\circ}/1^{\circ}\text{F})$ )
	-40°C to 1372°C	$\pm 1\%$ or $1^{\circ}\text{C}$ (-40°F to 2501°F: $\pm 1\%$ or $2^{\circ}\text{F}$ ), whichever is greater
D:S (distance to measurement spot size)	30:1	
Laser sighting	Single-point laser < 1 mw output Class 2 (II) operation, 630 nm to 670 nm	
Minimum spot size	19 mm (0.75 in)	
Emissivity adjustment	By built-in table of common materials or digitally adjustable from 0.10 to 1.00 by 0.01	
Data storage with date/time stamp	20 points	
PC interface and cable	None	
Hi/Low alarms	Audible and two-color visual	
Min/Max/Avg/Dif	Yes	
Display	Dot matrix 98 x 96 pixels with function menus	
Backlight	Two levels, normal and extra bright for darker environments	
Trigger lock	Yes	
Switchable Celsius and Fahrenheit	Yes	
Power	2 AA/LR6 Batteries	
Battery life	If used continuously	Laser and backlight on, 12 hours; laser and backlight off, 100 hours
Operating temperature	0°C to 50°C (32°F to 122°F)	
Storage temperature	-20°C to 60°C (-40°F to 140°F)	
Bead thermocouple Type-K range	-40°C to 260°C (-40°F to 500°F)	
Bead thermocouple Type-K accuracy	$\pm 1.1^{\circ}\text{C}$ (2.0°F) from 0°C to 260°C (32°F to 500°F), typically within $1.1^{\circ}\text{C}$ (2.0°F) from -40°C to 0°C (-40°F to 32°F)	

## Anexo 4

### *Hotfind V*

O equipamento *Hotfind V*, é uma pistola de infravermelhos de alto desempenho com câmara e display. A saída de vídeo do equipamento tem uma taxa de atualização de 60Hz, sendo a recolha de informação térmica feita em tempo real. A câmara implementada no equipamento permite, não só guardar imagens térmicas mas também guardar vídeos térmicos onde é possível verificar alterações de temperatura em tempo real. A pistola de infravermelhos presente neste equipamento permite recolher temperaturas entre os  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $250^{\circ}\text{C}$  tendo uma incerteza de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  ou  $\pm 2\%$ , sendo assumido o maior destes dois valores.



A tabela de características é a seguinte:

Características do equipamento *Hotfind V*

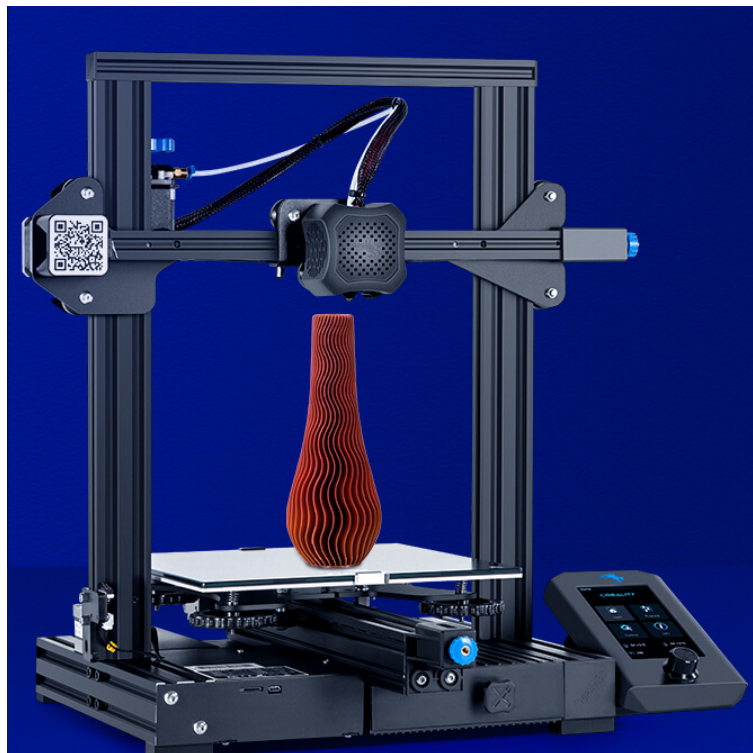
Fonte: <https://2.imimg.com/data2/NV/HC/MY/-hotfind-v-series-new.pdf> (acedido em 28/09/2022)

Model	HOTFIND-V	HOTFIND-VX	HOTFIND-VXS	HOTFIND-VXT	
<b>Thermal Image and optical data</b>					
FOV/ min. focus distance	20° × 15° / 0.1m				
Spatial resolution	2.2 mrad				
Thermal sensitivity @ 50/60 Hz	100 mK@30°C				
Detector type	FPA, uncooled microbolometer				
Resolution	160 × 120				
Spectral range	8 – 14µm				
Focus	Manual				
<b>Image presentation</b>					
LCD display	3.5" LCD				
Visual image	Built-in digital video, 640x480pixels, full color				
Duo Vision	4 modes				
P.I.P	Yes, 4 display modes				
Video output	NTSC(60Hz) or PAL(50Hz) composite video				
Illuminator	Yes				
<b>Measurement</b>					
Measurement range	Range one	-20°C to +250°C (-4°F to +482°F)	-20°C to +250°C (-4°F to +482°F)	-20°C to +250°C (-4°F to +482°F)	-20°C to +250°C (-4°F to +482°F)
	Range two	-----	+200°C to +600°C (+392°F to +1112°F)	+200°C to +1000°C (+392°F to +1832°F)	+200°C to +1000°C (+392°F to +1832°F)
	Range three	-----	-----	-----	+800°C to +1500°C (+1472°F to +2732°F)
Accuracy	± 2°C, ± 2% of reading				
Measurement mode	Spot analysis up to 4 spots, auto tracking, isotherm analysis, temperature alarm				
Correction	Emissivity, ambient temperature, distance, relative humidity				
<b>Image storage</b>					
Type	Removable Mini SD card, 2G				
File formats – Thermal	SAT format, 14 bit measurement data included				
File formats – Visual	CCD format				
Thermal video recording	With real time software (optional)				
Voice annotation	With Bluetooth (optional)				
<b>Laser pointer</b>					
Type	Class 2, 1mw/ 635 nm red				
<b>Battery system</b>					
Battery	Rechargeable lithium battery				
Battery operation time	≈ 2.5 hours continuous operation				
Power save mode	Yes				
<b>Environment specification</b>					
Operating temperature range	-20°C to +50°C (-4°F to +122°F)				
Storage temperature range	-40°C to +70°C (-40°F to +158°F)				
Humidity	10% to 95%, non-condensing				
Encapsulation	IP 54				
Shock	Operational: 25G				
Vibration	Operational: 2G				
<b>Physical characteristic</b>					
Weight (ex. battery)	600g				
Size (L*W*H)	215 mm × 80mm × 219mm				
Tripod mounting	1/4" _ 20				

## Anexo 5

### *Creality Ender 3 V2 3D Printer*

A impressora *Ender 3 V2*, é uma das gamas de entrada da empresa *Creality*. Este é um modelo acessível devido às suas dimensões relativamente reduzidas (475 x 470 x 620 mm) e facilidade de utilização e montagem. A impressora tem uma cama de carboneto de silício (carborundum) que permite um aquecimento uniforme em toda a sua área, permitindo assim uma qualidade mais consistente nas primeiras camadas de impressão. A impressora tem as seguintes características: capacidade para espessuras de camadas entre os 0,1mm e os 0,4mm; permite imprimir peças com volumes inferiores a 220 x 220 x 250 mm; permite utilizar três tipos filamentos (PLA/TPU/PETG); permite aquecer a cama de impressão até aos 100°C; tem uma precisão de  $\pm 0,1$ mm e um filamento de 1,75mm.



Características do equipamento *Creality Ender 3 V2*

Fonte: <https://www.creality3dofficial.eu/products/ender-3-v2-3d-printer> (acedido em 28/09/2022)

Para indicar à impressora quais os parâmetros de impressão que devem ser utilizados para imprimir determinada peça, é necessário utilizar um *Slicer*. Um *Slicer* é um tipo de *software* que permite criar ficheiros com a extensão ".stl" que podem ser lidos pela impressora 3D. O *Slicer* utilizado neste trabalho foi o *Cura*, desenvolvido pela empresa *Ultimaker*. As definições de impressão utilizadas para imprimir a caixa P2 (figura 63) foram as seguintes:

- Qualidade
  - Altura de camada = 0,2 mm
- Paredes
  - Espessura das paredes = 0,8 mm
  - Número de linhas = 2
  - Expansão horizontal = 0 mm
- Topo/Base
  - Espessura do topo/base = 0,8mm
  - Número de camadas no topo/base = 4
- Preenchimento
  - massa volúmica de preenchimento = 20%
  - Padrão de preenchimento = cúbico
- Material
  - Temperatura de impressão = 200°C
  - Temperatura da cama de impressão = 60 °C
- Velocidade
  - Velocidade de impressão = 50 mm/s