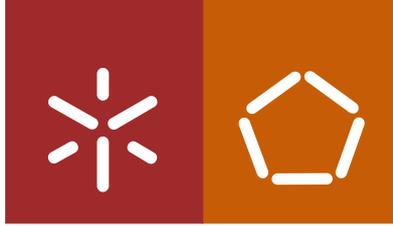


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Eduardo Filipe de Carvalho Almeida Falcão

Modelação Térmica de Placas de Circuito Impresso



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Eduardo Filipe de Carvalho Almeida Falcão

Modelação Térmica de Placas de Circuito Impresso

Dissertação de Mestrado
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor José Carlos Fernandes Teixeira
e do
Professor Doutor Delfim Fernandes Soares

outubro de 2014

DECLARAÇÃO

Nome: Eduardo Filipe de Carvalho Almeida Falcão

Endereço eletrónico: a58826@alunos.uminho.pt Telefone: 914017787

Bilhete de Identidade/Cartão do Cidadão: 13974196

Título da dissertação: Modelação Térmica de Placas de Circuito Impresso

Orientadores:

Professor Doutor José Carlos Fernandes Teixeira

Professor Doutor Delfim Fernandes Soares

Ano de conclusão: 2014

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

.

Universidade do Minho, ____/____/____

Assinatura:

Resumo

Para reduzir o tempo e custo de desenvolvimento de um produto, o processo de prototipagem e os testes de validação têm vindo a ser substituídos pela produção assistida por computador. Em particular, ferramentas de CFD tornaram-se muito importantes na análise e projeto térmico de sistemas eletrónicos.

A temperatura pode dar origem, não só a mudanças mecânicas, como também a alterações do desempenho elétrico de uma placa de circuito impresso. O projeto de ventiladores e dissipadores de calor deve equilibrar as atuais necessidades de dimensões reduzidas, com o escoamento de calor adequado, por forma a garantir que as placas de circuito impresso não deformem nem partam quando submetidas a uma temperatura excessiva.

Neste trabalho é feito um estudo do comportamento térmico de placas de circuito impresso, tendo como ferramenta computacional de apoio o *software* de simulação CFD ANSYS FLUENT.

Feita a modelação matemática do fenómeno associado à geração e troca de calor em placas de circuito impresso, procurou-se posteriormente testar e validar o modelo obtido, examinando cada mecanismo de troca de calor separadamente e seleccionando, para o efeito, cenários específicos para análise do comportamento dos mecanismos.

Finalmente foram considerados quatro casos de estudos para os quais foram realizadas simulações numéricas de modo a perceber o comportamento e a dispersão térmica de uma placa de circuito impresso na presença de componentes eletrónicos em funcionamento. Estes casos vão desde a simulação de uma placa com uma resistência elétrica em funcionamento até à situação de diferentes placas com diferentes resistências e pretendem fazer a análise de sensibilidade da temperatura e área de influência da transferência de calor, face aos parâmetros potência dissipada, composição da placa e número de elementos dissipativos.

Palavras-Chave: modelação térmica, placas de circuito impresso, simulação, CFD

Abstract

To reduce product development cost and time, traditional prototyping and testing have been replaced by computer aided software. In particular, CFD has become an important tool in the thermal analysis and design of electronics systems.

The temperature can produce not only mechanical changes, but also changes in the electrical performance of a printed circuit board. The design of cooling fans and heat sinks must balance the need for small size with adequate heat removal, so that printed circuit boards do not deform or crack under excessive thermal stress.

This thesis aims to analyse the thermal behaviour of printed circuit boards by using the CFD software ANSYS FLUENT.

After obtaining the mathematical model of the phenomena associated with generation and heat transfer on printed circuit boards, a program of validation and testing was implemented, by examining each heat transfer mechanism separately, and selecting for such purpose, specific scenarios to analyze the behavior of mechanisms.

Finally, four study cases were considered and several numerical simulations were performed to understand the behavior and thermal profile of a printed circuit board in the presence of operating components. These cases range from the simulation of a board with one resistor on to the situation of different boards with different resistors and aim to do a sensitivity analysis of the temperature and area of influence of heat transfer, due to power dissipation, board composition and number of components.

KEYWORDS: thermal modelling, printed circuit board, simulation, CFD

Índice

Resumo	iii
Abstract.....	v
Índice	vii
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xi
Lista de Símbolos	xiii
Letras gregas	xiv
Lista de Abreviaturas e Acrónimos	xv
Capítulo 1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivo do trabalho	2
1.3 Estrutura da tese	2
Capítulo 2 Estado da arte	5
2.1 Resenha histórica	5
2.2 Constituição de um PCB.....	9
2.3 Fabrico de PCB	10
2.4 Revisão bibliográfica.....	13
Capítulo 3 Modelação do problema	17
3.1 O fenómeno físico	17
3.1.1 Condução	18
3.1.2 Convecção.....	20
3.2 Modelação matemática do problema.....	22
3.2.1 Volume de controlo.....	22
3.2.2 Leis fundamentais	23
3.3 Simulação computacional.....	26
3.3.1 Métodos numéricos para resolução de EDP	26
3.3.2 Condições iniciais e condições de fronteira	28

3.3.3	Malhas	29
3.3.4	<i>Software</i> para simulação numérica	30
3.4	Pressupostos do modelo	31
Capítulo 4	Validação teórica	33
4.1	Parâmetros adimensionais	33
4.2	Convecção forçada num escoamento sobre uma placa plana	35
4.2.1	Previsão teórica.....	36
4.2.2	Simulação numérica.....	37
4.3	Convecção forçada num escoamento interno em conduta.....	41
4.3.1	Previsão teórica.....	43
4.3.2	Simulação numérica.....	44
4.4	Convecção natural sobre uma placa vertical.....	46
4.4.1	Previsão teórica.....	47
4.4.2	Simulação numérica.....	48
4.5	Convecção natural numa cavidade horizontal	51
4.5.1	Previsão teórica.....	52
4.5.2	Simulação numérica.....	52
Capítulo 5	Casos de estudo.....	57
5.1	Cenário A.....	57
5.2	Cenário B.....	65
5.3	Cenário C.....	68
5.4	Cenário D.....	73
Capítulo 6	Considerações finais	77
	Bibliografia.....	79

Lista de Figuras

Figura 2.1 Conceito de PCB, segundo Albert Hanson.	5
Figura 2.2 Rádio com a primeira placa de circuito impresso.	6
Figura 2.3 Primeiros circuitos impressos: componentes numa face e circuito de cobre na outra.	7
Figura 2.4 PCB com 5 camadas.	7
Figura 2.5 Protótipo de uma placa de circuito com 32 camadas à base de FR-4 e cobre-estanho.	8
Figura 2.6 Secção transversal de um PCB com um único circuito impresso.	9
Figura 2.7 Secção transversal de um PCB com circuito impresso em ambos os lados.	10
Figura 2.8 Vista em corte de um PCB multicamadas.	10
Figura 2.9 Vista em corte da placa antes (em cima) e depois (em baixo) do processo de corrosão parcial.	12
Figura 3.1 Mecanismos de transferência de calor: condução, convecção e radiação.	17
Figura 3.2 Transferência de calor unidimensional por condução.	19
Figura 3.3 Esquema representativo da troca de calor por convecção.	21
Figura 3.4 Representação gráfica da camada limite térmica.	22
Figura 3.5 Fluxo num volume de controlo.	23
Figura 3.6 Exemplos de malhas: a) Malha estruturada; b) malha não estruturada; c) malha híbrida. ..	30
Figura 4.1 Representação gráfica do problema considerado.	37
Figura 4.2 Geometria do domínio considerado.	38
Figura 4.3 Representação gráfica da malha numérica utilizada para simulação.	38
Figura 4.4 Distribuição de velocidade obtida no domínio de estudo.	39
Figura 4.5 Distribuição térmica obtida no domínio de estudo.	40
Figura 4.6 Representação gráfica do problema considerado.	43
Figura 4.7 Representação gráfica da malha numérica utilizada para simulação.	44
Figura 4.8 Distribuição de velocidades obtida no domínio de estudo.	45
Figura 4.9 Distribuição térmica obtida no domínio de estudo.	45
Figura 4.10 Representação gráfica do problema considerado.	47
Figura 4.11 Representação gráfica da malha numérica utilizada para simulação.	48
Figura 4.12 Distribuição de velocidades obtida no domínio de estudo.	49
Figura 4.13 Distribuição térmica obtida no domínio de estudo.	49

Figura 4.14	Representação gráfica do problema considerado.....	52
Figura 4.15	Representação gráfica da malha numérica utilizada para simulação.	53
Figura 4.16	Distribuição de velocidades obtida no domínio de estudo.	54
Figura 4.17	Distribuição térmica obtida no domínio de estudo.	54
Figura 5.1	Dimensões características da definição geométrica do domínio da placa.....	59
Figura 5.2	Dimensões características da definição geométrica do domínio da resistência.	60
Figura 5.3	Dispersão da temperatura no domínio placa+resistência para 1W dissipado.....	61
Figura 5.4	Dispersão da temperatura obtida no domínio placa+resistência para 2W dissipados.	62
Figura 5.5	Dispersão da temperatura obtida no domínio placa+resistência para 3W dissipados.	63
Figura 5.6	Relação obtida entre temperatura máxima registada e a potência dissipada.	64
Figura 5.7	Dispersão da temperatura obtida no domínio placa+resistências para 2x1W dissipados. ..	66
Figura 5.8	Dispersão da temperatura obtida no domínio placa+resistências para 3x1W dissipados. ..	67
Figura 5.9	Comparação de temperaturas máximas em função da temperatura para resistências isoladas ou baterias de resistências com a mesma potência total.....	68
Figura 5.10	Dispersão da temperatura obtida para o PCB-2.....	70
Figura 5.11	Dispersão da temperatura obtida para o PCB-6.....	72
Figura 5.12	Relação obtida entre o número de vias e a temperatura máxima registada.....	72
Figura 5.13	Dispersão da temperatura obtida para o PCB-6 na presença de uma resistência de 3W.	74
Figura 5.14	Relações obtidas entre a potência dissipada e o pico de temperatura registado para diferentes composições do PCB.....	74

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 Condutividade térmica de alguns materiais (a 27°C).	19
Tabela 3.2 Ordem de grandeza do coeficiente de transferência de calor por convecção em função do meio fluido e do processo.	21
Tabela 4.1 Valores de referência obtidos teoricamente.	37
Tabela 4.2 Resultados obtido numericamente para os parâmetros de cálculo previstos.....	40
Tabela 4.3 Valores de referência obtidos teoricamente.	43
Tabela 4.4 Resultados obtido numericamente para os parâmetros de cálculo previstos	46
Tabela 4.5 Valores de referência obtidos teoricamente.	47
Tabela 4.6 Resultados obtido numericamente para os parâmetros de cálculo previstos.....	50
Tabela 4.7 Valores de referência obtidos teoricamente.	52
Tabela 4.8 Parâmetros de relaxamento utilizados para estabilizar o método de resolução.	54
Tabela 4.9 Resultados obtidos numericamente para os parâmetros de cálculo previstos.	55
Tabela 5.1 Propriedades consideradas na definição do FR-4.	58
Tabela 5.2 Parâmetros geométricos considerados para o domínio de estudo.	59
Tabela 5.3 Resultados obtidos da simulação do cenário A com 1W de potência dissipada.	61
Tabela 5.4 Resultados obtidos da simulação do cenário A com 2W de potência dissipada.....	62
Tabela 5.5 Resultados obtidos da simulação do cenário A com 3W de potência dissipada.	63
Tabela 5.6 Resultados obtidos da simulação do cenário B com 2x1W de potência dissipada.	65
Tabela 5.7 Resultados obtidos da simulação do cenário B com 3x1W de potência dissipada.	66
Tabela 5.8 Propriedades dos materiais considerados.	69
Tabela 5.9 Propriedades equivalentes calculadas para as placas de estudo.	70
Tabela 5.10 Resultados obtidos da simulação do PCB-2.....	71
Tabela 5.11 Resultados obtidos da simulação do PCB-6.....	71
Tabela 5.12 Resultados obtidos da simulação do PCB-6 na presença de uma resistência de 3W.	73
Tabela 5.13 Sumário dos resultados obtidos e utilizados para construção das curvas potência-temperatura.....	75

Lista de Símbolos

A	área	[m ²]
a	aceleração	[m/s ²]
c_p	calor específico a pressão constante	[J/(kg.K)]
D	diâmetro	[m]
Fo	número de Fourier	
Fr	número de Froude	
Gr	número de Grashof	
g	aceleração da gravidade	[m/s ²]
h	coeficiente de transferência de calor por convecção	[W/(m ² K)]
k	condutividade térmica	[W/(m.K)]
L	comprimento característico	[m]
M	massa	[kg]
\dot{m}	caudal mássico	[kg/s]
Nu	número de Nusselt	
NUT	número de unidades de transferência	
P	perímetro	[m]
Pr	número de Prandtl	
Q	transferência de energia	[J]
q	taxa de transferência de calor	[W]
\dot{q}	taxa de geração de energia por unidade de volume	[W/m ³]
q'	taxa de transferência de calor por unidade comprimento	[W/m]
q''	fluxo térmico	[W/m ²]
R	raio de um cilindro	[m]
\mathcal{R}	constante universal dos gases	
Ra	número de Rayleigh	
Re	número de Reynolds	
R_e	resistência elétrica	[Ω]
R_t	resistência térmica	[K/W]

T	temperatura	[K]
t	tempo	[s]
U	coeficiente global de transferência de calor	[W/(m ² .K)]
u, v, w	componentes da velocidade mássica média do fluido	[m/s]
V	volume	[m ³]
\mathbf{u}	velocidade do fluido	[m/s]
v	volume específico	[m ³ /kg]

Letras gregas

α	difusividade térmica	[m ² /s]
β	coeficiente de expansão volumétrica térmica	[K ⁻¹]
δ	espessura da camada limite	[m]
δ_p	espessura de penetração térmica	[m]
ε	emissividade	
μ	Viscosidade dinâmica	[kg/(m.s)]
ν	viscosidade cinemática	[m ² /s]
ρ	massa específica	[kg/m ³]
σ	tensão viscosa normal	[N/m ²]
ϕ	função dissipação viscosa	[s ²]
ψ	função corrente	[m ² /s]
τ	tensão corte	[N/m ²]

Lista de Abreviaturas e Acrónimos

2D	bidimensional
3D	tridimensional
CAD	<i>Computer Aided Design</i> (Projeto assistido por computador)
CFD	<i>Computer Fluid Dynamics</i> (Dinâmica de fluidos computacional)
EDP	Equações de derivadas parciais
FR	<i>Flame retardant</i>
MDF	Método das Diferenças Finitas
MEF	Método dos Elementos Finitos
MVF	Método dos Volumes Finitos
SIMPLE	<i>Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i> (Placa de Circuito Impresso – PCI)
UV	Ultra-violeta

Capítulo 1

Introdução

Este capítulo contém uma breve apresentação do trabalho, do ponto de vista da motivação e dos objetivos. É também feita a contextualização do tema e referida a relevância da modelação térmica de placas de circuito impresso na indústria eletrónica.

1.1 Motivação

As placas de circuito impresso, designadas normalmente pela abreviatura PCB do inglês *Printed Circuit Board*, desempenham um papel essencial em qualquer circuito eletrónico. Grande parte dos objetos do quotidiano envolvem componentes eletrónicas, desde a mais simples lanterna ao mais complexo telemóvel. Na verdade, todos os dispositivos eletrónicos contêm agora placas de circuitos impressos, oferecendo serviços inteligentes e interativos. Presente em televisões, computadores, automóveis, máquinas de lavar, frigoríficos, termoventiladores ou máquinas de café, os PCB são normalmente feitos com uma estrutura laminada de base plástica, com circuitos metálicos com componentes eletrónicos fixos, cabos, pistas e tomadas.

O PCB é um elemento chave em qualquer circuito eletrónico moderno, sendo muitas vezes o único componente projetada exclusivamente para o produto. Com os avanços tecnológicos ocorridos ao longo dos anos, o PCB deixou de ser uma simples placa de conexão, trabalhada à mão, para passar a ser um produto complexo e sofisticado projetado computacionalmente.

O comportamento térmico de placas de circuito impresso é um dos aspetos importantes a ter em conta no projeto de PCB. Como o calor é distribuído e dissipado durante o fluxo de corrente, pode eventualmente causar danos no PCB, deixando este de funcionar normalmente.

O desenvolvimento de *software* de simulação que permite realizar o projeto de um produto e a sua análise em ambiente virtual, otimizando a solução, mesmo para problemas que são numericamente exigentes, revolucionou a dinâmica dos fluidos. De facto, ferramentas de CFD têm atualmente um papel fundamental na análise e no projeto térmico de sistemas eletrónicos, uma vez que ao substituírem o processo de prototipagem e os testes de validação tradicionais permitem reduzir o tempo e custo de desenvolvimento de um produto.

1. Introdução

O ANSYS FLUENT é um *software* comercial que oferece uma interface gráfica simples e intuitiva e possui um algoritmo de cálculo robusto e estável. Permite também, de uma forma integrada, definir/desenhar a geometria do domínio de estudo, gerar a malha, resolver o modelo matemático e ainda fazer o tratamento de dados obtidos, sem ser necessário recorrer a *software* adicional. Estas características foram decisivas para a escolha deste *software* como ferramenta de apoio a todo o trabalho de simulação numérica desenvolvido.

1.2 Objetivo do trabalho

Apresentando como objetivo geral, o aprofundamento de conhecimentos em CFD que permitam realizar a modelação térmica de placas de circuito impresso, este trabalho tem os seguintes objetivos específicos:

- compreensão dos fundamentos físicos e matemáticos associados ao fenómeno de transferência de calor num PCB;
- familiarização com os algoritmos implementados pelo ANSYS FLUENT para resolução deste tipo de problemas;
- replicação de casos teoricamente fundamentados;
- análise de sensibilidade da temperatura e área de influência da transferência de calor, face aos parâmetros potência dissipada, composição da placa e número de elementos dissipativos.

1.3 Estrutura da tese

Este trabalho contém seis capítulos, cujos conteúdos podem ser descritos, sucintamente, da seguinte forma:

No Capítulo 1 apresenta-se a motivação, contextualização, objetivos e estrutura da tese.

O Capítulo 2 é dedicado ao estado da arte no que aos PCB diz respeito. É feita uma pequena resenha histórica das placas de circuito impresso e são apresentados os conceitos básicos associados a circuitos impressos, bem como os materiais utilizados na sua construção. Este capítulo termina com uma breve revisão bibliográfica do tema em estudo.

No Capítulo 3 é abordado o fundamento físico do fenómeno associado à geração e troca de calor em placas de circuito impresso. Numa primeira análise é exposta a caracterização e descrição da

1. Introdução

componente física da transferência de calor sendo, depois, abordada a perspectiva matemática que fundamenta a resolução de um problema de transferência de calor entre dois meios. Por último, é feito um pequeno apanhado dos pressupostos que fundamentam o modelo utilizado.

O Capítulo 4 consiste na validação do modelo. Como habitualmente, na validação de um modelo, a fundamentação dos resultados é feita através do confronto dos resultados obtidos numericamente com soluções teóricas ou experimentalmente levantadas. Para este efeito, foram selecionados cenários específicos para analisar o comportamento dos mecanismos.

O Capítulo 5 contém a maior parte do trabalho computacional desenvolvido. Nele é feita a descrição dos casos de estudo simulados numericamente com o intuito de perceber o comportamento de uma placa de circuito impresso na presença de componentes eletrónicos em funcionamento. São também expostas as condições de fronteira e fenómenos considerados nos diferentes casos. É ainda descrito o parâmetro principal cuja influência, no domínio de estudo, se procura determinar. A análise e comentário dos resultados obtidos nos casos estudados são apresentados segundo vários prismas e contextos.

Finalmente, no Capítulo 6, são apresentadas algumas considerações finais, conclusões e perspectivas futuras.

Capítulo 2

Estado da arte

As placas de circuito impresso desempenham um papel essencial em qualquer circuito eletrônico, permitindo a ligação entre os diversos componentes nele existentes. A evolução, ao longo do tempo, dos circuitos eletrônicos favoreceu o desenvolvimento de meios de montagem e de construção. Neste capítulo será feita uma pequena resenha histórica das placas de circuito impresso e serão apresentados os conceitos básicos associados a circuitos impressos, bem como os materiais utilizados na sua construção. Por fim é feita uma análise da literatura existente no contexto da simulação térmica de PCB.

2.1 Resenha histórica

O desenvolvimento dos métodos utilizados em placas de circuito impresso começou no início do século XX. Patentes, que remontam a essa altura, mostram evidências que os primeiros trabalhos conhecidos procuravam formas de imprimir condutores planos entre camadas de materiais isolantes, para traçar circuitos elétricos que seriam aplicados às primeiras comutações telefônicas.

Foram precisos 50 anos para que as placas de circuito impresso se tornassem comuns na eletrônica. A transformação das placas iniciais nas que estão atualmente disponíveis, representa um avanço tecnológico notável.

Descrevem-se, de seguida, as principais etapas da evolução das placas de circuito impresso, de acordo com [1]:

1903 o alemão *Albert Hanson* descreve condutores laminados em alumínio, com uma placa de isolamento, entre múltiplas camadas.

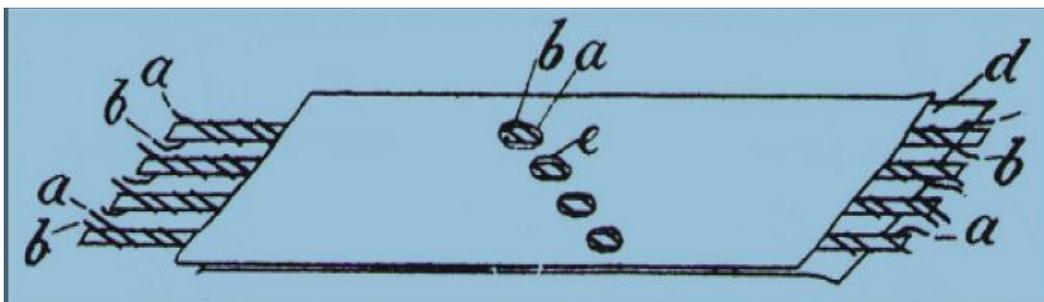


Figura 2.1 Conceito de PCB, segundo Albert Hanson [2].

2. Estado da arte

1904 Thomas Edison, pouco depois de iniciar a comercialização da primeira lâmpada elétrica, sugere um processo químico para a implementação de pistas condutoras num dielétrico de papel.

1913 Arthur Berry patenteia, em Inglaterra, um método de impressão e gravação. Max Schoop obtém, nos Estados Unidos, uma patente relativa ao processo de metalização.

1936 Paul Eisler inventa a placa de circuito impresso como parte de um aparelho de rádio. Na Figura 2.2, apresenta-se o primeiro rádio a usar uma placa de circuito impresso.

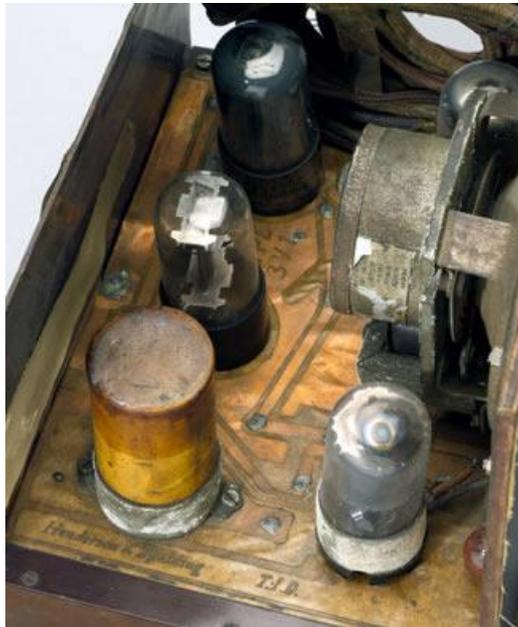


Figura 2.2 Rádio com a primeira placa de circuito impresso.
(© Science Museum/ Science and Society Picture Library)

1947 Surgem as primeiras placas impressas de ambos os lados e com vias verticais revestidas.

1950-60 Começam a ser utilizadas diferentes resinas e outros materiais para a placa, embora esta só pudesse ser impressa de um único lado. O circuito é impresso de um lado e os componentes elétricos colocados do outro. Nesta altura, o circuito é fotografado numa placa de zinco, sendo esta depois utilizada como negativo para desenhar o padrão numa placa de

2. Estado da arte

cobre. O processo é concluído submetendo a placa de cobre a um banho ácido, corroendo superficialmente o material e deixando intacta a zona desenhada.

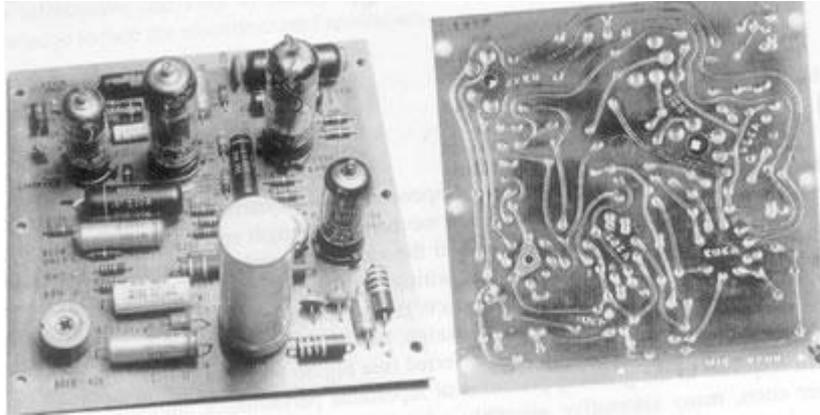


Figura 2.3 Primeiros circuitos impressos: componentes numa face e circuito de cobre na outra.

1960 Inicia-se a produção de placas multicamadas (4 ou mais camadas).

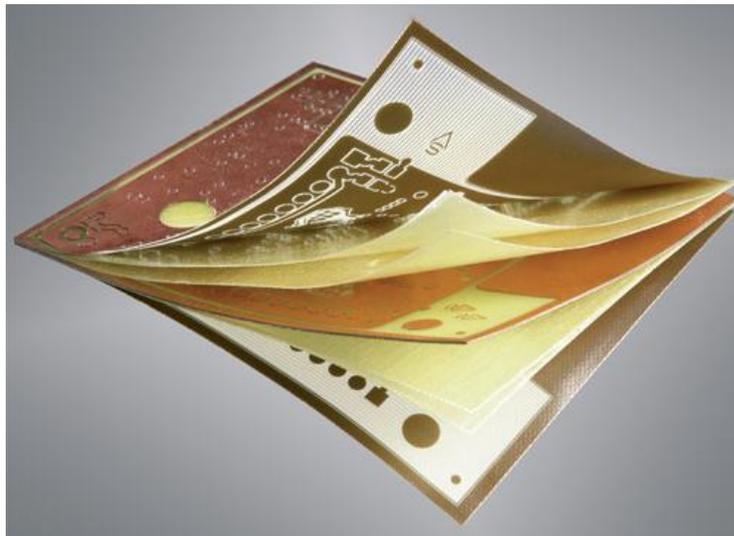


Figura 2.4 PCB com 5 camadas.

1980 Começam a ser utilizadas com frequência, componentes de ligação superficial, em detrimento de componentes *through-hole*, permitindo o fabrico de circuitos mais compactos e com menor custo de produção.

2. Estado da arte

2000 Passa a ser possível a utilização de circuitos com espessuras de 35-40 μm , até então impossíveis de executar.

Atualmente, existem PCB com 32 camadas, sendo possível encontrar, dependendo do processo de fabrico, um número ainda maior. O número de camadas implica que a área de superfície da placa pode ser reduzida e muito mais componentes podem ser montados sobre uma área menor. O tipo e a forma dos componentes usados no *design* das placas estão a ser constantemente reduzidos e novas funcionalidades a ser adicionadas. Assim, o processo de projeto da placa deve ser adaptável para estar em sintonia com estas mudanças. Salienta-se, finalmente, que o nível de complexidade atingido pelos PCB tende a recorrer a ferramentas de projeto baseadas em modelação computacional (CAD- *Computer-aided design*).

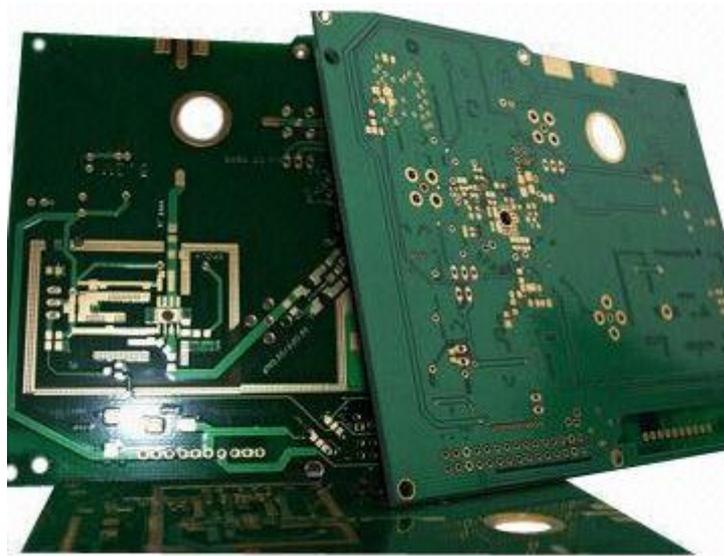


Figura 2.5 Protótipo de uma placa de circuito com 32 camadas à base de FR-4 e cobre-estanho.

No futuro, é previsível que a indústria de projeto e construção de PCB permaneça dinâmica e em crescimento. É opinião de vários autores que a evolução das placas passe por uma construção em blocos tridimensionais de plástico moldado, acompanhado de um aumento do uso de *chips* de circuitos integrados, *POP* (*package on package*), bem como componentes embutidos.

2.2 Constituição de um PCB

As placas de circuito impresso são constituídas por uma ou mais películas de material condutor separadas por material não condutor. O material não condutor não só separa as diferentes camadas nos circuitos com mais que uma camada, como fornece o suporte para o próprio circuito em si e para os componentes.

O cobre é o material predileto para condução de corrente elétrica e calor, pelo que este é o material base mais comum de encontrar nas chamadas “pistas” de um PCB. Esta designação é atribuída a cada circuito impresso numa placa. Ligas de estanho, prata e ouro podem também ser usadas para efeitos de condução de eletricidade, embora sejam menos frequentes.

Já nas camadas que conferem o isolamento entre pistas e a integridade estrutural à placa, o material mais frequentemente utilizado é o FR-4, um material polimérico e, portanto, com fracas propriedades condutoras tanto de eletricidade como de calor. Paralelamente, é possível encontrar outros materiais poliméricos e/ou compósitos no papel de isolador.

As placas circuito impresso podem apresentar diversas estruturas:

- placas com circuito impresso num só lado (ver Figura 2.6 [3]);

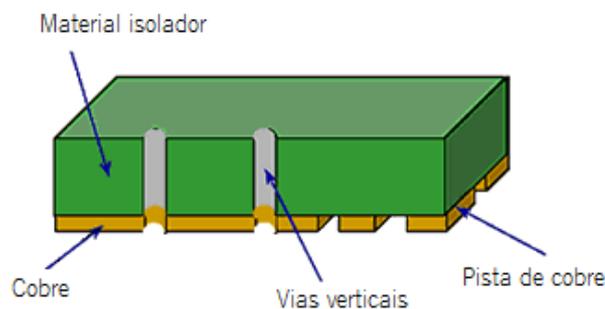


Figura 2.6 Secção transversal de um PCB com um único circuito impresso.

- placas com circuitos impressos em ambos os lados, como ilustrado na Figura 2.7 (MacCallum & Edgar);
- placas multicamada, com circuitos impressos em camadas internas (Figura 2.8 (MacCallum & Edgar)).

2. Estado da arte

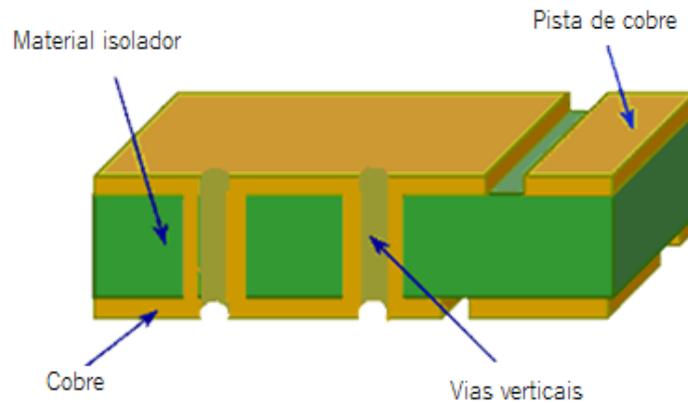


Figura 2.7 Secção transversal de um PCB com circuito impresso em ambos os lados.

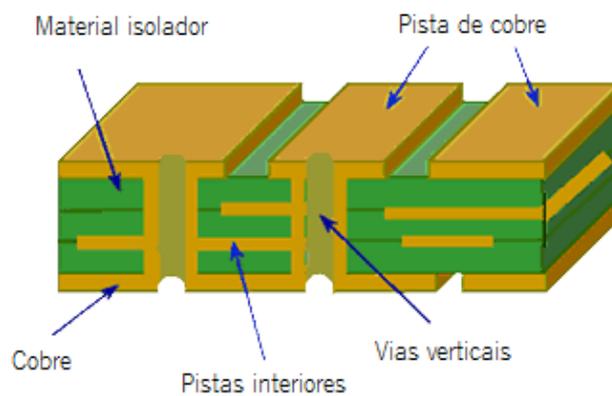


Figura 2.8 Vista em corte de um PCB multicamadas.

2.3 Fabrico de PCB

A produção de placas de circuito impresso, sejam estas com um ou mais circuitos, envolve um processo um tanto ou quanto complexo. Na verdade, os processos utilizados na indústria são de tal forma vastos e específicos de cada caso que seria impossível oferecer uma compilação de todos.

A variedade de processos e a personalização das técnicas empregues por parte dos fabricantes provém da motivação própria associada à otimização de custo e de tempo de produção de um PCB. Tendo em conta estes fatores, nesta secção procurou-se incluir informação sobre os processos

2. Estado da arte

disponíveis na indústria e salientar os pontos base em comum que os fabricantes, à parte das especificações próprias, utilizam no seu processo de produção.

Antes de entrar na descrição dos métodos produtivos utilizados neste ramo da indústria, justifica-se incluir alguma referência sobre a categorização utilizada para estes. Os processos de construção de PCB são categorizados por um parâmetro fundamental: meio de criação das pistas do circuito. Existem dois processos (químicos) distintos de construção destas pistas: o processo aditivo e processo subtrativo.

O processo **aditivo** é pouco frequente na indústria e prevê a deposição do elemento condutor sob uma base isoladora. Tecnicamente, é um processo simples e fácil de aplicar. No entanto, a cadeia de produção, o rigor e o custo associado a este processo tornam-no inviável para as grandes escalas presentes na indústria de PCB.

Em contrapartida, nos processos considerados **subtrativos**, a construção das pistas condutoras dá-se por um processo de extração de material previamente depositado. Nestes processos, em vez de trabalhar com uma base isoladora, utiliza-se uma base já laminada com o par isolador/condutor já interligado. Estas bases são constituídas por uma camada de substrato revestida de um ou de ambos os lados com uma fina camada de cobre (entre 35-70 μm). O traçado do circuito pretendido é marcado na camada de cobre e, posteriormente, remove-se o cobre das zonas que não pertencem ao circuito elétrico.

O processo de gravação do circuito no cobre pode também ser feito de diversas formas e varia de fabricante para fabricante consoante o tipo de aplicação, a escala pretendida, a resolução presente no desenho do circuito, entre outros. De entre o leque de técnicas utilizadas, salienta-se a gravação fotográfica, a serigrafia e a gravação térmica.

No caso da gravação de circuitos por meio **fotográfico**, são utilizadas placas vulgarmente chamadas de sensibilizadas. Esta terminologia provém da sensibilidade que o revestimento presente nas superfícies da placa tem à luz ultravioleta (UV). Dada esta reatividade do revestimento com a luz ultravioleta, a gravação do circuito inicia-se com uma impressão em negativo do mesmo numa película transparente. Nesta impressão, as pistas do circuito deverão ser opacas e os espaços previstos entre vias translúcidos. Esta película funcionará como filtro e protegerá zonas dedicadas (as do circuito) da reação do revestimento na presença de raios UV. Quando exposta a radiação UV, na presença do filtro,

2. Estado da arte

toda a placa exceto as pistas terão reagido e ficado fragilizadas. Esta gravação pode, por vezes, ser difícil de visualizar à vista desarmada.

A alternativa por meios **serigráficos**, prevê uma criação de uma máscara com o desenho do circuito em tela recortada nas zonas dedicadas às pistas de cobre. Esta máscara permitirá a aplicação de uma tinta temporária para proteção parcial do cobre. Assim, o circuito fica gravado na placa, estando protegida a área reservada ao circuito e a restante exposta.

Por último, a gravação **térmica** é um processo idêntico ao da gravação fotográfica. Neste caso, o revestimento, em vez de sensível à radiação UV, é sensível à temperatura. À parte desta diferença, todo o processo de gravação é idêntico.

Feita a gravação do circuito na placa pré-fabricada, inicia-se a etapa de remoção do material excedente. Em todos os métodos expostos de gravação de circuito, obtém-se uma placa com zonas protegidas (partes do circuito) e zonas não protegidas (espaço entre pistas). Para a remoção do material excedente e não protegido, é vulgar a utilização de um banho ácido. Este ácido, quando em contacto com o cobre não protegido, corrói-o, deixando na placa apenas as zonas de cobre protegidas previamente no processo de gravação.

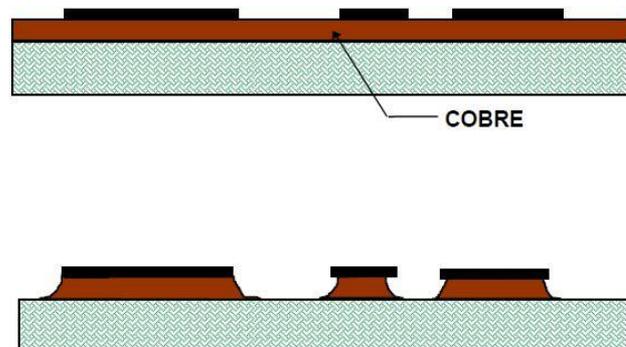


Figura 2.9 Vista em corte da placa antes (em cima) e depois (em baixo) do processo de corrosão parcial.

2.4 Revisão bibliográfica

Nesta secção é feita referência ao trabalho desenvolvido por diversas pessoas que se dedicam ao estudo da simulação térmica de PCB. É importante referir que, embora este tema não se apresente vastamente documentado, é possível encontrar diversos documentos envolvendo problemas específicos associados a esta temática.

A literatura encontrada em simulação térmica de PCB pode ser considerada a dois níveis distintos: o nível fundamental e o aplicado. Ao nível fundamental, encontram-se trabalhos que incidem particularmente no desenvolvimento de métodos numéricos para resolução das equações de conservação. Estando esta vertente fora do âmbito desta dissertação, será dado maior destaque ao trabalho desenvolvido ao nível aplicado, concretamente no que diz respeito à modelação do fenómeno associado à geração e troca de calor em placas de circuito impresso.

Nos últimos anos tem-se assistido a um enorme desenvolvimento de técnicas de simulação numérica, naturalmente motivado pela evolução das ferramentas computacionais disponíveis para os investigadores. Esta evolução reflete-se, naturalmente, num aumento progressivo da capacidade de cálculo e de armazenamento de dados, permitindo que a modelação numérica de problemas com maior complexidade física se torne uma ferramenta viável do ponto de vista temporal e económico. Paralelamente, o constante aumento da complexidade dos PCB justifica também que a previsão numérica de cenários específicos seja um campo em crescimento evidente.

Um dos primeiros fatores a ter em conta na simulação térmica de PCB diz respeito à definição das propriedades do material em questão. Tal como foi referido anteriormente, embora a constituição das placas varie de fabricante para fabricante, é possível afirmar que todas elas são constituídas por dois grandes elementos: o material isolador (ou dielétrico) e o material condutor. Sendo o material dielétrico mais frequentemente utilizado o FR-4, as propriedades deste material podem variar, dada a

2. Estado da arte

sua natureza enquanto compósito. A definição das propriedades das placas, e mais especificamente do FR-4, foi alvo de estudo de diversos investigadores ao longo dos anos, sendo possível encontrar valores bastante diversificados para as propriedades térmicas deste material. No que à condutividade térmica diz respeito, conseguem-se registar valores entre 0.34 [W/(m.K)] [4] e 0.13 [W/(m.K)] defendido por alguns fabricantes como a *ET Industries*. De uma forma geral, de entre os vários valores encontrados na literatura, é possível estreitar este intervalo de valores para 0.25-0.30 [W/(m.K)] como o intervalo mais comum de valores utilizados em estudos numéricos.

Sarvar, Poole e Witting analisaram ainda a anisotropia inerente às propriedades deste material por meios experimentais. O seu estudo foi realizado em placas de um só fabricante, não referenciado, tendo obtido resultados que foram tomados como referência durante anos. Para a condutividade transversal foi registado o valor de 0.343 [W/(m.K)], enquanto para a condutividade no plano observou-se o valor de 1.058 [W/(m.K)]

Para além da definição do material, há diversas formas de definir geometricamente o domínio de estudo. Neste caso pode-se distinguir a chamada modelação detalhada da modelação simplificada.

Genericamente, a forma detalhada apresenta como vantagens ser a melhor e mais fidedigna representação do fenómeno real, bem como produzir um maior rigor nos resultados obtidos. No entanto, este maior grau de precisão é obtido à custa de uma grande quantidade de recursos computacionais bem como tempos de processamento extremamente elevados, tempos estes que podem ultrapassar facilmente o intervalo diário ou até semanal, dependendo dos casos.

Nos últimos anos, têm sido desenvolvidos trabalhos e modelos que procuram simplificar este tipo de problemas, em certos pormenores específicos, de forma a que a realidade possa ser aproximada num problema ou geometria mais simples de modelar e mais rápida de simular.

O pormenor mais pertinente a destacar neste âmbito é a representação geométrica das pistas de cobre e pormenores internos da placa, como por exemplo as vias térmicas. É claro que se na

2. Estado da arte

definição do domínio forem consideradas as geometrias e propriedades específicas destas camadas, é expectável que o resultado atingido seja mais fiel ao replicado experimentalmente. Vários modelos desenvolvidos procuram ponderar o efeito das camadas condutoras, sem no entanto prescindir da definição de um domínio geometricamente simples e homogéneo. Entre outras vertentes propostas na literatura, podem ser considerados materiais teóricos, obtidos pela ponderação de massas e volumes dos materiais em jogo.

De entre as várias estratégias encontradas, é possível destacar o procedimento obtido em [5], onde é apresentada uma proposta para estimar a condutividade efetiva normal e no plano de um PCB multi-camada. As ideias defendidas por este autor foram validadas com resultados experimentais e simulações numéricas onde foram representadas geométrica e fisicamente as camadas internas ao PCB. Nestas simulações com elevado detalhe, é, inclusive, considerada a anisotropia inerente às propriedades características dos materiais constituintes da placa de circuito impresso. São analisadas várias placas e circuitos por forma a procurar testar o algoritmo defendido, permitindo uma análise de sensibilidade do modelo proposto e ainda uma reflexão crítica do comportamento por este registado em diferentes condições. Esta abordagem é defendida também em [6] sem, no entanto, apresentar uma proposta de validação experimental.

Em [7], os autores propõem uma análise com séries de Fourier, em regime estacionário, apoiada num PCB teórico por forma a analisar a influência das camadas condutoras desta placa. Paralelamente, é esboçada também uma análise bidimensional de um PCB multi-camada usando uma estimativa de condutividade efetiva com o intuito de comparar os resultados obtidos por este e os resultados previstos para uma placa de camada única. De referir que estes resultados não foram, neste registo, confrontados com levantamentos experimentais.

Rencz e Skely, em [8], propõem uma abordagem semelhante para a modelação de componentes eletrónicos de geometria complexa e com múltiplos pontos/meios de escoamento de

2. Estado da arte

calor. Os autores defendem uma aproximação segundo um modelo fundamentado em simulações e registos experimentais em regime transiente, obtendo uma proposta de algoritmo de simplificação para componentes heterogéneos, designados de pacotes, com mais que um ponto de escoamento de calor e em regime transiente.

De uma forma análoga, em [9], é desenvolvido um modelo de simplificação capaz de ponderar a influência da presença de vias térmicas entre camadas interiores. Estes elementos procuram favorecer a condução de calor na direção normal à placa, combatendo, assim, a baixa condutividade térmica associada ao material dielétrico base. Mais uma vez, o método defendido pelos autores passa por um algoritmo de cálculo de uma condutividade efetiva da placa permitindo a modelação matemática de um meio homogéneo, simplificando o sistema e minimizando os recursos computacionais necessários para a resolução do problema.

Finalmente, em [10], é proposta uma análise inversa do problema estudado, analisando a influência de diferentes PCB no comportamento térmico de determinados componentes eletrónicos. Para tal, considerou vários PCB teóricos, modelados homogeneamente, com diferentes valores de condutividade efetiva, e analisou o comportamento registado nos componentes face a estas alterações. Neste estudo, foi considerada a influência quer da convecção natural quer da convecção forçada do ar. A metodologia de cálculo utilizada para a estimativa da condutividade efetiva não é explicitada, pelo que os dados obtidos por este autor podem ser usados para uma análise preliminar, mas requerem dados adicionais por forma a avaliar o real impacto da condutividade da placa na performance dos componentes.

Capítulo 3

Modelação do problema

Neste capítulo é abordado o fundamento físico do fenómeno associado à geração e troca de calor em placas de circuito impresso. Numa primeira análise é exposta a caracterização e descrição da componente física da transferência de calor sendo, depois, abordada a perspetiva matemática que fundamenta a resolução de um problema de transferência de calor entre dois meios

3.1 O fenómeno físico

A troca de calor é um fenómeno físico com presença permanente na natureza. Pode definir-se transferência de calor como "energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperaturas no espaço" [11]. Assim, sempre que houver uma diferença de temperaturas num meio ou entre meios, a tendência natural é que estes troquem energia térmica por forma a atingirem uma situação de equilíbrio, situação esta que pode ou não ser alcançada.

A transferência de calor pode ser categorizada consoante a natureza dos meios que registam o gradiente de temperatura que a origina. Caso a diferença de temperatura se registre num meio em repouso, seja este sólido ou fluido, a transferência de calor é designada por **condução**. Sempre que a troca de calor se efetue entre uma superfície e um fluido em movimento, é utilizado o termo **convecção** para categorizar esta permuta. Por último, como todos os corpos com temperatura não nula emitem energia sob a forma de ondas eletromagnéticas, esta troca de calor, designada por **radiação**, não é dependente do meio entre os dois corpos para a transmissão de calor, podendo, no entanto, ser influenciada por este.

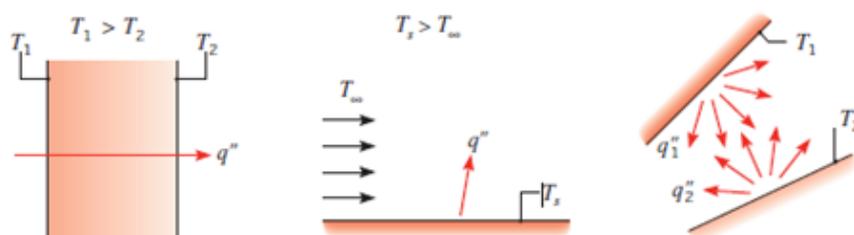


Figura 3.1 Mecanismos de transferência de calor: condução, convecção e radiação.
(adaptado de [11])

3. Modelação do problema

Focando no caso dos PCB será feita alusão à influência dos mecanismos condução e convecção de calor dado serem estes os mecanismos primordiais de troca de calor quer dentro da placa (por condução) quer desta com o ambiente circundante (por convecção).

Independentemente do mecanismo de troca de calor, esta é quantificada pelas mesmas grandezas físicas. Normalmente, quando não é ponderada a variável tempo, fala-se em energia trocada, sendo comum utilizar a unidade do sistema internacional Joule para quantificar a troca de calor. Caso se entre com a variável tempo em consideração, a troca de calor será quantificada como uma potência. Paralelamente, é também comum definir a troca de calor por meio de um fluxo térmico, definido como potência por unidade de área perpendicular à troca de calor.

3.1.1 Condução

Tal como já descrito anteriormente, este mecanismo de troca de calor está associado à troca de energia dado um gradiente térmico num meio em repouso. Numa escala atômica, esta transferência de calor pode ser vista como a transmissão de energia das partículas mais energéticas de um meio para as partículas menos energéticas deste mesmo. Dado o movimento molecular, os átomos chocam entre si trocando, desta forma, energia. A este mecanismo de troca de calor pode também ser atribuída a designação de difusão.

Este fenómeno pode ser traduzido matematicamente como uma relação entre o fluxo térmico, o gradiente térmico numa determinada direção e a condutividade térmica do meio. Esta relação, no caso unidimensional, é expressa pela Equação (3.1).

$$q = k \frac{dT}{dx}, \quad (3.1)$$

onde q representa o fluxo térmico, $\frac{dT}{dx}$ é o gradiente térmico na direção x e k é a condutividade térmica. A Figura 3.2 ilustra a transferência de calor por condução através de uma parede sólida submetida a uma diferença de temperatura entre as suas faces.

3. Modelação do problema

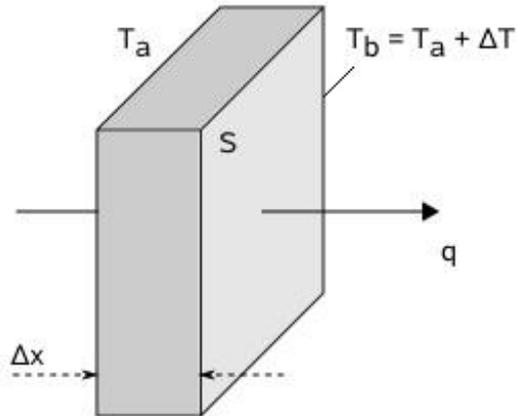


Figura 3.2 Transferência de calor unidimensional por condução.

A condutividade térmica de uma substância é uma grandeza que mede a capacidade que esta tem de conduzir calor. É, por isso, uma propriedade física característica do material, cujo valor pode ser determinado experimentalmente. Para diversos materiais comuns os valores da condutividade estão listados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Condutividade térmica de alguns materiais (a 27°C).

Material	Condutividade térmica $\left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$
Prata	426
Cobre	398
Alumínio	237
Vidro	0.72 a 0.86
Água	0.61
Madeira (pinho)	0.11 a 0.14
Ar	0.026

3. Modelação do problema

3.1.2 Convecção

Paralelamente à troca de calor associada ao movimento microscópico das partículas, esta pode ser fundamentada também no movimento macroscópico de um fluido. A convecção é um mecanismo de troca de calor que pode ter duas tipologias distintas consoante a natureza do escoamento do fluido.

Quando o escoamento do fluido é causado por um meio externo, seja este um ventilador ou uma bomba, por exemplo, utiliza-se o termo **convecção forçada**. No prisma oposto, caso não haja nenhuma fonte exterior responsável pelo escoamento, utiliza-se o termo **convecção natural**. Neste último caso, o escoamento é desenvolvido dadas as forças de impulsão associadas às diferenças de densidade locais no seio do fluido, consequência do gradiente térmico registado no mesmo.

Estas duas variantes de convecção não são mutuamente exclusivas, pelo que é comum haver um mecanismo misto, onde o fluido tem um escoamento desenvolvido por fonte externa mas, simultaneamente, o gradiente térmico conduz a gradientes de densidade tais que as forças de impulsão alteram o escoamento prévio à troca de calor. No entanto, é frequente estudar estes dois fenómenos de forma isolada, dado que, frequentemente, a componente natural pode ser desprezada face à grandeza da componente forçada.

Tal como indicado para a condução, existe também uma relação matemática para este mecanismo. Independente da natureza do escoamento do fluido, o fluxo de calor trocado entre uma superfície e um fluido pode ser obtida pela Equação (3.2).

$$q = h \Delta T, \quad (3.2)$$

onde h representa o coeficiente de transferência de calor por convecção, q o fluxo de calor e ΔT a diferença entre a temperatura do fluido e a temperatura da superfície.

Na Figura 3.3 está representada uma parede plana de temperatura superficial T_S em contacto com um fluido de temperatura T_F num local próximo da superfície.

No caso da convecção, o valor do parâmetro h pode também ser obtido experimentalmente. No entanto, este parâmetro não é uma propriedade específica de um material, pelo que depende quer do fluido quer do material e geometria da superfície. Na Tabela 3.2 apresenta-se a ordem de grandeza de h para gases e líquidos em diferentes processos de troca de calor.

3. Modelação do problema

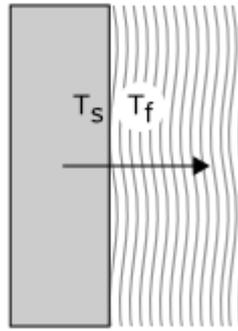


Figura 3.3 Esquema representativo da troca de calor por convecção.

Tabela 3.2 Ordem de grandeza do coeficiente de transferência de calor por convecção em função do meio fluido e do processo.

Processo	$h \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$
<i>Convecção natural</i>	
Gases	2 – 25
Líquidos	50 – 1.000
<i>Convecção forçada</i>	
Gases	25 – 250
Líquidos	100 – 20.000

A convecção, como foi já referido, está estreitamente ligada à natureza do escoamento e, embora a relação matemática seja a mesma para a convecção natural ou forçada, os métodos de cálculo do coeficiente de transferência de calor não o são. Para cálculo deste parâmetro são utilizadas correlações empíricas consoante a geometria e as condições de fronteira que serão exploradas e reproduzidas mais à frente.

Quer na convecção natural quer no caso da forçada, a interdependência do fenómeno térmico e do fenómeno mecânico (o escoamento) é evidente, pelo que na resolução de um problema é importante abordar as duas vertentes em simultâneo.

De uma forma análoga ao conceito de camada limite usado na mecânica dos fluidos, onde esta é definida como a curva que delimita o volume de fluido influenciado pela presença da superfície, usa-

3. Modelação do problema

se também o conceito de camada limite térmica. A Figura 3.4 ilustra o volume de fluido que troca calor com a parede, bem como o perfil térmico do mesmo na direção perpendicular à superfície.

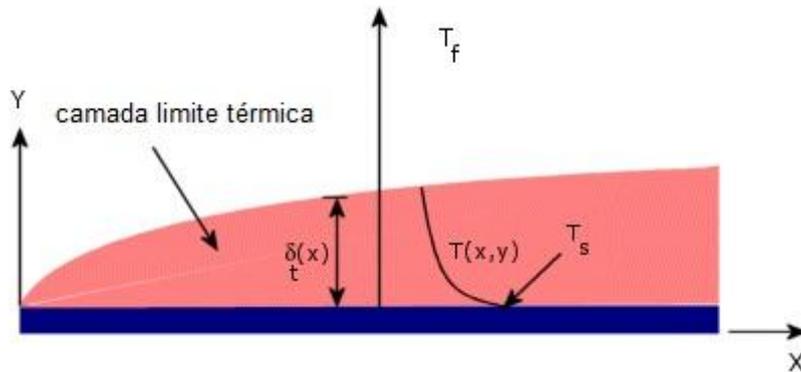


Figura 3.4 Representação gráfica da camada limite térmica.

3.2 Modelação matemática do problema

3.2.1 Volume de controlo

Tal como foi já visto, o fenómeno térmico de troca de energia entre dois meios ou no seio de um só, pode ser traduzido matematicamente. No decorrer desta secção procurar-se-á enunciar as equações gerais que definem um problema de transferência de calor quer em regime estacionário quer em regime transiente. Da mesma forma, serão expostas as equações associadas à mecânica dos fluidos, componente que tanto influencia a permuta de calor como é influenciada por esta mesma.

As equações que governam o escoamento de um fluido representam uma formulação matemática das leis de conservação da física [12]:

- a massa de um fluido conserva-se;
- a taxa de variação do *momentum* é igual à soma das forças que atuam numa partícula do fluido (2ª lei de Newton);
- a taxa de variação da energia é igual à soma da taxa de calor ganho com a taxa de trabalho das forças que atuam numa partícula do fluido (1ª lei da Termodinâmica).

Estas equações podem ser derivadas considerando o fluido numa certa região fixa do espaço, o chamado volume de controlo (ver Figura 3.5), reescrevendo as equações de conservação na forma correspondente. A aplicação direta dos princípios fundamentais da física a um volume de controlo dá

3. Modelação do problema

origem a equações na forma integral, as quais podem ser manipuladas para obter equações de derivadas parciais. As equações que se obtêm usando esta técnica dizem-se na forma conservativa.

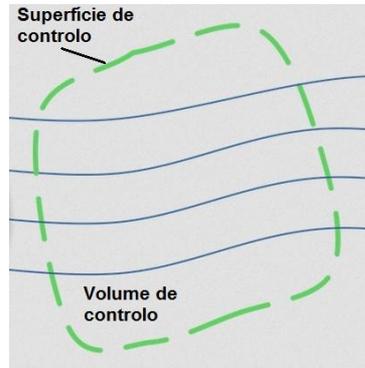


Figura 3.5 Fluxo num volume de controle.

3.2.2 Leis fundamentais

A dedução das equações na forma conservativa pode ser encontrada em livros clássicos de dinâmica dos fluidos (por exemplo, [13], [11], [12]), pelo que se apresentam, sem grandes pormenores, as equações necessárias à realização deste trabalho.

Considere-se um meio homogêneo no qual existem gradientes de temperatura e no qual a distribuição de temperatura T está expressa em coordenadas cartesianas.

Conservação da massa

A forma geral da equação da conservação da massa de um fluido tridimensional compressível, em regime transiente, é dada por [12]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0, \quad (3.3)$$

onde t representa o tempo, ρ é a massa volúmica do fluido e u_i representa a componente do vetor velocidade \mathbf{u} no sistema cartesiano x_i . Aqui, bem como ao longo deste capítulo, adota-se a notação de

3. Modelação do problema

Einstein para simplificação de escrita dos somatórios. Assim sendo, a equação anterior pode ser então expandida para:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_1)}{\partial x_1} + \frac{\partial(\rho u_2)}{\partial x_2} + \frac{\partial(\rho u_3)}{\partial x_3} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0, \quad (3.4)$$

identificando as direções 1, 2 e 3 com x , y e z e o vetor \mathbf{u} com (u, v, w) . A Equação (3.4), simplifica-se, no caso de um fluido incompressível (ρ constante) bidimensional, para:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0. \quad (3.5)$$

Conservação do *momentum*

Na Física clássica existem dois tipos básicos de forças:

- as **forças de corpo** que atuam num determinado volume sem que haja contacto físico (por exemplo, força de gravidade, força elétrica, força magnética);
- as **forças de superfície** que atuam num determinado volume através do contacto direto com as superfícies que o envolvem. As forças que atuam sobre as superfícies do volume de controlo, mesmo que não exista movimento a ele associado, dizem-se **forças estáticas** (por exemplo, forças de pressão). As forças que existem apenas quando o volume do fluido estudado se encontra em movimento são as chamadas **forças dinâmicas** (por exemplo, forças de arraste).

A equação da lei da conservação do *momentum*, dentro de um volume de controlo arbitrário fixo no espaço, é dada pela expressão[12]:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + S_{u_i}, i = 1,2,3, \quad (3.6)$$

onde p é a pressão, τ_{ij} é a componente ij do tensor das tensões e S_{u_i} representa o efeito das forças de corpo.

No caso de um fluido incompressível bidimensional, em regime estacionário, a equação da conservação do *momentum* pode escrever-se, em coordenadas cartesianas, como [11]:

3. Modelação do problema

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + S_x, \quad (3.7)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + S_y, \quad (3.8)$$

onde μ é a viscosidade dinâmica do fluido e S_x e S_y são as componentes x e y da força de corpo total, respetivamente.

Conservação da energia térmica

A equação da energia para fluidos genéricos apresenta-se em muitos textos (por exemplo, [12], como

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho c_p u_i T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \tau_{ij} S_{ij} + S_i, \quad (3.9)$$

onde k é a condutividade térmica, T é a temperatura do fluido, S_{ij} é o gradiente de deformação e S_i representa o termo fonte de energia interna ou termo geração.

A Equação (3.9) simplifica-se ainda, no caso de um fluido incompressível bidimensional, em regime estacionário, para [11]:

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \mu \left(\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right) \right) + \dot{q}, \quad (3.10)$$

onde μ é a viscosidade dinâmica do fluido e \dot{q} é a taxa volumétrica de geração de energia térmica.

As equações de conservação apresentadas anteriormente ((3.3), (3.6) e (3.9)) podem ser reescritas de uma forma genérica para uma grandeza ϕ como

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \phi)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) + S_\phi, \quad (3.11)$$

3. Modelação do problema

onde Γ representa a difusividade molecular da quantidade transportada ϕ . Note-se que as Equações (3.3), (3.6) e (3.9) obtêm-se de (3.11) fazendo $\phi = 1$, $\phi = u_j$ e $\phi = T$, respetivamente.

3.3 Simulação computacional

3.3.1 Métodos numéricos para resolução de EDP

Há três passos importantes na modelação computacional de qualquer processo físico:

- i. a definição do problema;
- ii. a modelação do problema;
- iii. a simulação computacional.

Uma vez encontrada a equação diferencial parcial (EDP) ou o sistema de EDP que modela um problema físico, é necessário proceder à implementação de técnicas numéricas para que a modelação matemática seja resolvida computacionalmente.

Para grande parte dos problemas físicos envolvendo EDP, não é possível encontrar uma solução analítica, ou, mesmo quando tal solução existe, a sua expressão pode ser de tal modo complicada que o cálculo dos seus valores se torna muito trabalhoso e, do ponto de vista dos recursos computacionais, pouco atrativo. Há assim necessidade de resolver numericamente as equações, obtendo aproximações para as suas soluções. A forma tradicional de encontrar tais aproximações passa pela discretização do domínio geométrico do problema numa coleção de pontos, elementos, células ou volumes elementares. A esta coleção dá-se o nome de malha.

Os métodos frequentemente utilizados para esta finalidade são três: método das diferenças finitas (MDF), método dos elementos finitos (MEF) e método dos volumes finitos (MVF). Cada um desses métodos discretiza as equações parciais de uma forma diferente gerando, portanto, cada um uma malha específica e resolvendo o sistema de equações localmente.

Método das diferenças finitas

3. Modelação do problema

O método das diferenças finitas é dos métodos de resolução de sistemas de EDP mais antigos e é também o mais tradicionalmente usado na resolução de problemas associados a geometrias simples. O domínio computacional é coberto por uma malha, a forma diferencial das equações é mantida, sendo cada derivada parcial aproximada por uma fórmula de diferenças finitas, geralmente obtida a partir da expansão em série de Taylor. Deste processo provém uma equação algébrica por cada nó da malha, onde o valor dos nós vizinhos aparece como variável.

Uma desvantagem do MDF prende-se com o facto de não se verificar a conservação das quantidades físicas. As diferenças finitas são, no entanto, usadas em combinação com outros procedimentos que asseguram a conservação das grandezas físicas, como é o método dos volumes finitos.

Método dos elementos finitos

O MDF, embora de fácil compreensão e aplicação, regista outros inconvenientes para além da não conservação das grandezas físicas. Em particular, torna-se difícil a sua aplicação em sistemas com geometria irregular, condições de fronteira não usuais ou composição heterogénea. O Método dos Elementos Finitos fornece uma alternativa melhor a tais sistemas.

O MEF divide o domínio computacional em formas simples ou “elementos”. Uma solução aproximada da EDP é desenvolvida para cada um destes elementos. No MEF, a solução das equações diferenciais governantes do problema físico pode ser obtida através de funções de aproximação que satisfazem condições descritas por equações integrais no domínio do problema. Essas funções de aproximação podem ser funções polinomiais com grau razoável de ajuste em elementos discretizados a partir da geometria do problema, satisfazendo as equações integrais em cada elemento discreto ou elemento finito. O MEF resulta em soluções descritas por polinómios conhecidos em todo o domínio e não apenas nos nós da malha, como no caso do MDF.

O método dos elementos finitos também pode assegurar a conservação das propriedades do escoamento, distinguindo-se dos volumes finitos pelo facto das equações de balanço serem multiplicadas por um fator de ponderação antes da respetiva integração

Método dos volumes finitos

3. Modelação do problema

A discretização no método dos volumes finitos é baseada na forma integral da EDP a ser resolvida (por exemplo, conservação da massa, quantidade de movimento ou energia). O domínio computacional é dividido num número finito de subdomínios, neste caso, volumes de controlo contíguos e as equações são inicialmente integradas em cada um destes volumes, por forma a assegurar a conservação das grandezas físicas e só posteriormente se procede à discretização das equações resultantes. No centróide de cada volume localiza-se o nó computacional, onde são calculadas as variáveis em estudo. Os valores destas mesmas nas faces do volume de controlo são calculados através de interpolação com base no valor nodal.

Do ponto de vista da engenharia, o MVF é o mais utilizado, dado que todos os termos que precisam de ser aproximados têm significado físico. Cada um dos métodos referidos apresenta vantagens e desvantagens face aos restantes, não estando no âmbito desta tese uma análise mais detalhada destas (ou outras) metodologias. Para uma explicação mais detalhada de métodos numéricos de resolução de equações de derivadas parciais, sugere-se, por exemplo, [14]; [15] e [16].

3.3.2 Condições iniciais e condições de fronteira

Quando se resolve um sistema de equações diferenciais parciais, as condições de fronteira, juntamente com as condições iniciais, determinam a solução particular do problema que está sendo estudado.

Na simulação dos casos estudados, os valores iniciais fornecidos ao modelo são propriedades físicas como a velocidade do escoamento e temperaturas iniciais da superfície e do fluido.

Relativamente às condições de fronteira, na maioria dos problemas envolvendo o escoamento de fluidos e transferência de calor, as duas condições mais comumente empregadas são as de Dirichlet e de Neumann.

Nas condições de fronteira do tipo de **Dirichlet**, um valor constante e conhecido para a variável φ (velocidade, pressão, temperatura, etc) é imposto na fronteira do domínio de cálculo. Já nas condições de **Neumann**, a derivada de φ na fronteira é imposta, ou seja a derivada normal à fronteira é especificada. Desta forma, φ na fronteira também é uma incógnita, que deve ser determinada como parte do processo de solução do problema. Podem ainda ser usadas simultaneamente condições de

3. Modelação do problema

fronteira do tipo de Dirichlet e de Neumann em partes diferentes da fronteira do domínio. Estas condições de fronteira são normalmente designadas condições **mistas**.

3.3.3 Malhas

A discretização do domínio de estudo é um dos passos fundamentais da resolução computacional de um sistema de EDP. Nesta secção procura-se expor o leque de classificações comuns para as malhas na resolução de uma ou mais EDP.

De uma maneira geral, pode definir-se uma malha numérica como uma representação discretizada do domínio geométrico onde se procura resolver uma equação ou um sistema de EDP. Esta discretização subdivide o domínio de cálculo num número finito de subdomínios, onde serão resolvidas as equações em jogo, como já foi referido anteriormente. Estes subdomínios tomam como geometria usual triângulos e quadriláteros (no caso 2D) ou tetraedros e hexaedros (no caso 3D).

O processo de geração da malha varia de caso para caso, dado que consoante a geometria do domínio de estudo pode adequar-se um ou outro tipo de malha. Podem distinguir-se malhas estruturadas de não estruturadas. O critério que fundamenta esta classificação é a organização de cada elemento em relação aos elementos vizinhos. Caso o número de elementos vizinhos seja regular em toda a malha (excetuando as fronteiras do domínio), a malha classifica-se como **estruturada**. Neste tipo de malha, a numeração dos volumes ou elementos deve seguir uma “estrutura fixa”, de forma que o número de cada volume seja consecutivo ao seu vizinho. Do ponto de vista do armazenamento em memória no computador, este modelo é altamente eficiente.

Nos casos em que o número de células vizinhas varia de elemento para elemento, utiliza-se a designação de malha **não estruturada**. Comparado com malhas estruturadas, este modelo de malha representa um custo enorme de memória, uma vez que exige o armazenamento explícito das relações de vizinhança.

É ainda possível encontrar também a **designação de malha híbrida**, sempre que se combinam zonas de malha estruturada e zonas de malha não-estruturada. Este modelo integra as malhas estruturadas e as malhas não estruturadas de uma forma eficiente: nas partes da geometria que são regulares pode definir-se uma malha estruturada e naquelas que são complexas pode optar-se por uma não estruturada.

A Figura 3.6 procura ilustrar estes três tipos de malha enunciados.

3. Modelação do problema

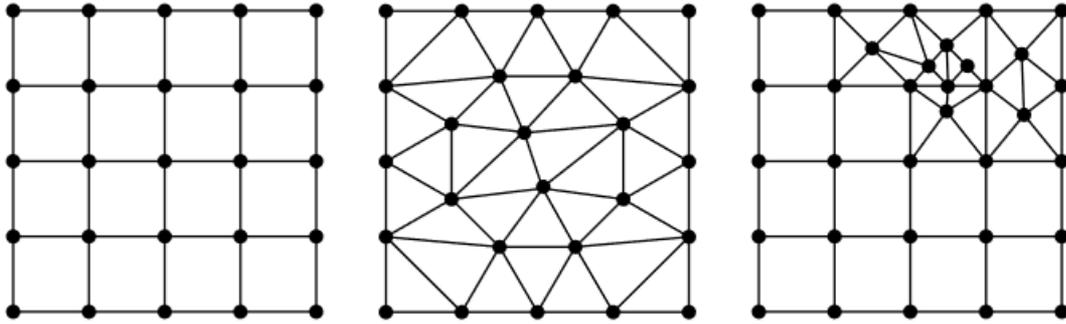


Figura 3.6 Exemplos de malhas: a) Malha estruturada; b) malha não estruturada; c) malha híbrida.

É também frequente encontrar a classificação de uma malha como **uniforme** ou não uniforme. Neste caso, uma malha é considerada uniforme quando a dimensão e geometria dos seus elementos é constante em todo o domínio de cálculo. Pela mesma ordem de ideias, uma malha numérica é não-uniforme quando não é respeitada esta condição. A malha ilustrada na Figura 3.6 a) é uniforme, enquanto as restantes são não uniformes.

3.3.4 *Software* para simulação numérica

Atualmente, está disponível um vasto leque de ferramentas computacionais capazes de implementar os métodos de resolução de EDP descritos neste capítulo. No contexto da transferência de calor, tal como já enunciado, é corrente a utilização do método dos volumes finitos. A título de exemplo é possível citar o *Abaqus*, o *Caedmium* ou o *Ansys Fluent*, sendo a versão 15.0 deste último, a ferramenta computacional escolhida para o desenvolvimento dos resultados expostos no decorrer deste trabalho.

O desenvolvimento de *software* de simulação que permite realizar o *design* de um produto e a sua análise em ambiente virtual, automatizando a solução, mesmo para problemas que são numericamente exigentes, revolucionou a dinâmica dos fluidos.

O *Ansys Fluent* é um *software* comercial que oferece uma interface gráfica simples e intuitiva e possui um algoritmo de cálculo robusto e estável. Salieta-se também a possibilidade de permitir, de uma forma integrada, definir/desenhar a geometria do domínio de estudo, gerar a malha numérica pretendida para o mesmo, resolver o modelo matemático pretendido e ainda fazer o tratamento de dados obtidos, sem ser necessário recorrer a *software* adicional [17].

3. Modelação do problema

Do ponto de vista dos problemas considerados neste trabalho, é importante referir certos aspectos específicos do *Fluent* e justificar algumas opções tomadas[18]

O *Fluent* tem por base o método dos volumes finitos, sendo as equações de conservação consideradas na forma integral.

- O *Fluent* apresenta dois tipos de solução das equações que governam o escoamento, um *baseado na pressão* e outro *baseado na densidade*. O método baseado na pressão usa como variáveis primárias, o *momentum* e a pressão (ou pressão corrigida) e é tradicionalmente utilizado para escoamentos incompressíveis. Para escoamentos compressíveis, o método baseado na densidade apresenta, em geral, melhores resultados.
- O algoritmo baseado na pressão pode ser aplicado a uma vasta gama de regimes de escoamento, sendo mais flexível e menos exigente em termos de recursos de memória. Este método apresenta dois tipos de algoritmos: segregado (onde as equações são resolvidas sequencialmente e segregadas umas das outras) e acoplado (onde as equações são resolvidas de forma acoplada).
- A solução segregada das equações de conservação do *momentum* e da equação de conservação da massa, para problemas incompressíveis, gera o problema do acoplamento pressão-velocidade.
- O *Fluent* tem cinco algoritmos disponíveis para resolver o problema de acoplamento. Neste estudo foi usado o método SIMPLE - *Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*[19][17]. Este algoritmo utiliza uma relação entre a velocidade e a pressão para reforçar a conservação de massa e obter o campo da pressão. Este esquema usa uma abordagem preditor-corretor.
- Os tipos de condições de fronteira impostas nos modelos computacionais são os vulgarmente utilizados em simulações numéricas. O *Fluent* possibilita ao utilizador a definição das condições de fronteira igualando diversas variáveis dependentes a uma constante ou a uma expressão algébrica. Nas condições de fronteira de parede sólida pode ser especificado o material, bem como as suas propriedades mecânicas e térmicas, enquanto nas condições de fronteira de entrada e saída de massa podem definir-se o fluido de trabalho, a sua velocidade ou caudal, temperatura e outras propriedades mecânicas e térmicas.

3.4 Pressupostos do modelo

3. Modelação do problema

No decorrer deste trabalho foi utilizado um modelo simplificado do sistema de equações até aqui descrito. Foram avaliadas as situações de equilíbrio de diversos casos não tendo sido considerada a progressão de cada situação no tempo tendo as análises sido fundamentadas e corridas num regime estacionário. Como consequência direta, todas as equações de conservação vêm simplificados/anulados todos os termos com derivada em ordem ao tempo, t .

Por outro lado, nas situações e cenários estudados foi desprezado o efeito da radiação, pelo que o termo da equação da energia associado a este mecanismo de troca de calor tomou, também, o valor nulo.

No que à variação da massa volúmica dos fluidos diz respeito, foi considerado um meio incompressível pelo que a variação desta variável física no espaço e no tempo foi tomada como nula.

Relativamente às condições de fronteira adotadas, serão mais à frente abordadas as considerações tomadas para cada um dos casos bem como o tratamento dado ao método de resolução do sistema e, ainda, o método de acoplamento utilizado entre as grandezas velocidade, pressão e densidade.

—

Capítulo 4

Validação teórica

Neste capítulo procurou-se testar e validar o modelo referido no capítulo anterior, examinando cada mecanismo de troca de calor separadamente. Para tal foram selecionados cenários específicos para analisar o comportamento dos mecanismos. A validação de um modelo matemático é um passo fundamental quando se procura simular um conjunto complexo de fenómenos físicos e térmicos em conjunto. Desta forma, é possível confrontar e fundamentar os resultados obtidos numericamente com soluções teóricas ou experimentalmente levantadas.

4.1 Parâmetros adimensionais

A troca de calor pelo mecanismo convectivo é dos fenómenos mais complexos de fundamentar matematicamente. Este facto deve-se à interdependência entre o meio fluido e a superfície envolvida assim como às geometrias e propriedades dos mesmos. Conforme já referido anteriormente, o coeficiente matemático que rege a troca de calor por condução não é uma propriedade intrínseca do material (como a condutividade). Na verdade, este parâmetro varia com uma diversidade de parâmetros físicos e mecânicos das entidades responsáveis pela permuta térmica.

Anos de investigação experimental tornaram possível a obtenção de correlações matemáticas capazes de traduzir o comportamento deste fenómeno com base em propriedades fundamentais. Este processo é intermediado pelo recurso a manipulação matemática de grandezas físicas com o intuito de as tornar adimensionais.

Nesta metodologia, muito usual também na mecânica dos fluidos, as relações matemáticas envolvem exclusivamente parâmetros adimensionais, parâmetros estes que, embora não tenham unidade de medida, têm interpretação física no contexto de um problema.

As correlações aqui expostas têm como finalidade permitir uma estimativa do coeficiente de transferência de calor por convecção num dado problema. De notar que estas correlações são apenas válidas dentro de um campo delimitado de valores pelo que foi procurado que as condições numericamente testadas fossem de encontro às abrangidas pelas correlações conhecidas da literatura.

4. Validação do modelo

A previsão teórica de um problema de convecção forçada sobre uma placa é das mais estáveis e com menos erro de cálculo. As relações matemáticas são construídas em função de três parâmetros adimensionais fundamentais: o número de *Reynolds*, Re , o número de *Prandtl*, Pr ; e o número de *Nusselt*, Nu .

O número de *Reynolds* traduz a relação entre as forças de inércia e viscosas associadas ao escoamento. O cálculo deste parâmetro é regido pela Equação (4.1).

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu}, \quad (4.1)$$

onde ρ é a massa volúmica, U é a velocidade do fluido, L é a dimensão característica do domínio de cálculo e μ é a viscosidade dinâmica.

Já o número de *Prandtl* representa a razão entre as difusividades viscosa e térmica. Por outras palavras, o número de *Prandtl* confronta a facilidade da propagação de movimento com a facilidade da propagação de calor. Este parâmetro é frequentemente encontrado em tabelas dado que o seu cálculo provém de grandezas físicas características de cada fluido. A expressão matemática que permite obter o número de *Prandtl* é apresentada pela Equação (4.2).

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} = \frac{\nu}{\alpha}, \quad (4.2)$$

onde c_p é o calor específico a pressão constante, μ é a viscosidade dinâmica, k é a condutividade térmica, ν é viscosidade cinemática e α é a difusividade térmica.

A interpretação física do número de *Nusselt* provém da sua definição matemática - cociente entre a transferência de calor por convecção e por condução. Este é o parâmetro que permite estimar o valor de h para vários problemas de transferência de calor por convecção. Este número é matematicamente obtido através da Equação (4.3).

$$Nu = \frac{kL}{h}, \quad (4.3)$$

onde k é a condutividade térmica, L é o comprimento característico do domínio e h é o coeficiente de transferência de calor por convecção.

4. Validação do modelo

Por outro lado, a previsão teórica de um problema de convecção natural envolve correlações construídas com recurso a dois outros parâmetros adimensionais em conjunto com os números de *Prandtl* e de *Nusselt*: o número de *Rayleigh*, Ra e o número de *Grashof*, Gr .

O número de *Grashof* desempenha, na convecção natural, o mesmo papel que o número de *Reynolds* na convecção forçada. Este parâmetro é vulgarmente definido como o quadrado do número de *Reynolds*. Neste caso, a interpretação física associada é a razão entre as forças de impulsão (ao invés de forças de inércia) e as forças viscosas que atuam no fluido. A Equação (4.4) revela a expressão matemática que permite o cálculo do número de *Grashof*.

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2}, \quad (4.4)$$

onde g é a aceleração da gravidade, β é o coeficiente de expansão térmica, T_s é a temperatura da superfície, T_∞ é a temperatura do fluido, L é o comprimento característico do domínio e ν é a viscosidade cinemática do fluido.

O número de *Rayleigh* pode ser sumariamente definido como o produto dos números de *Grashof* e de *Prandtl*. Este número permite categorizar o escoamento consequente da troca de calor como laminar ou turbulento. A expressão matemática que define este parâmetro é dada pela Equação (4.5).

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha}. \quad (4.5)$$

4.2 Convecção forçada num escoamento sobre uma placa plana

Nesta secção ilustra-se a interação térmica entre uma superfície e um escoamento previamente desenvolvido, deduzindo a solução teórica/analítica e confrontando-a com a obtida pelo modelo numérico.

Tal como já referido, o fenómeno em estudo é fortemente influenciado pela natureza do escoamento bem como pela geometria da superfície adjacente ao mesmo. Desta forma, será fixa a variável geométrica da superfície considerando-a uma placa plana. Quanto ao escoamento, serão abordados os regimes laminar e turbulento. Neste caso específico, a transição Laminar-Turbulento ocorre a uma distância x tal que $Re_x = 500\,000$.

4. Validação do modelo

A correlação matemática dada pela Equação (4.6), é considerada válida para o intervalo $0.6 < Pr < 50$, e traduz a interação térmica local entre uma placa plana e um escoamento laminar adjacente.

$$Nu_x = 0.332Re_x^{1/2}Pr^{1/3}. \quad (4.6)$$

No contexto global, a análise poderá ser feita através do valor médio de Nu_x no comprimento L , com recurso à Equação (4.7).

$$\overline{Nu}_L = 0.664 Re_L^{1/2} Pr^{1/3}. \quad (4.7)$$

Caso o escoamento adjacente à placa seja turbulento ($Re_x > 500\,000$), as relações presentes nas Equações (4.6) e (4.7) sofrem ligeiras alterações, sendo utilizadas, para o mesmo fim, as Equações (4.8) e (4.9), respetivamente, mantendo-se o intervalo de validade associado ao número de *Prandtl*.

$$Nu_x = 0.0296Re_x^{4/5}Pr^{1/3}, \quad (4.8)$$

$$\overline{Nu}_L = 0.037Re_L^{4/5}Pr^{1/3}. \quad (4.9)$$

4.2.1 Previsão teórica

Para efeitos de simulação, foi considerada uma placa de comprimento $L = 1$ m, a uma temperatura constante $T_w = 313$ K. O fluido considerado foi ar, com uma velocidade $U_\infty = 0.1$ m/s e $T_\infty = 293$ K. Como propriedades do ar foram tomados os valores presentes na biblioteca do *Ansys Fluent*.

A Figura 4.1 procura ilustrar a situação de cálculo considerada e simulada.

4. Validação do modelo

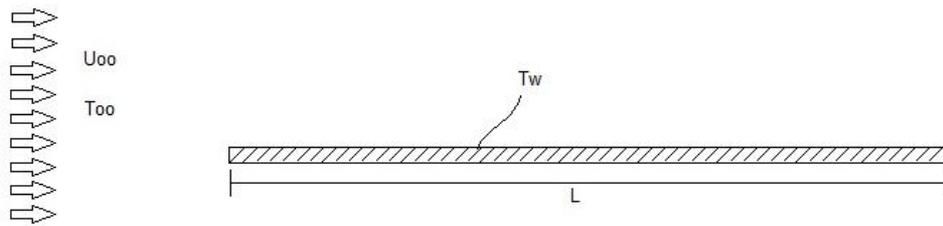


Figura 4.1 Representação gráfica do problema considerado.

A previsão teórica deste cenário é apresentada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Valores de referência obtidos teoricamente.

Parâmetro	Valor teórico	Unidade
Re_L	6846	Adimensional
Nu_L	24.89	Adimensional
\overline{Nu}_L	49.79	Adimensional
h_L	0.60	$\frac{W}{m^2 K}$
\overline{h}_L	1.21	$\frac{W}{m^2 K}$

4.2.2 Simulação numérica

A metodologia adotada para replicar os resultados enunciados nas previsões teóricas pode ser descrita da seguinte forma:

Primeiramente foi desenhada a geometria do domínio, conforme ilustra a Figura 4.2.

4. Validação do modelo

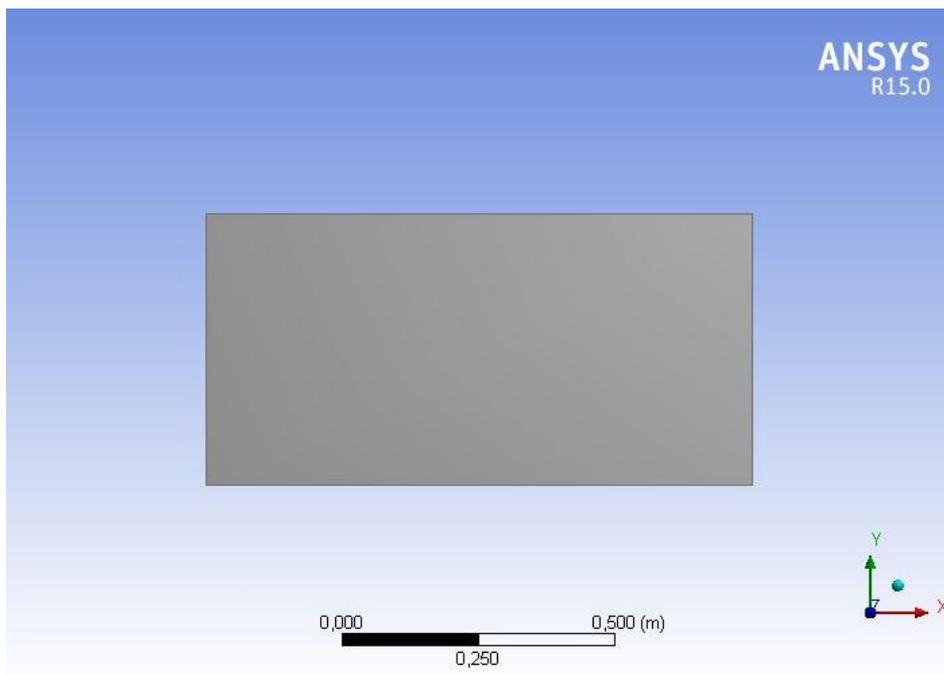


Figura 4.2 Geometria do domínio considerado.

Definida a geometria do problema, foi necessário gerar e configurar a malha numérica associada a essa geometria.

Na Figura 4.3 é possível observar a opção por uma malha maioritariamente uniforme, com refinamento local na zona onde se prevê a troca de calor.

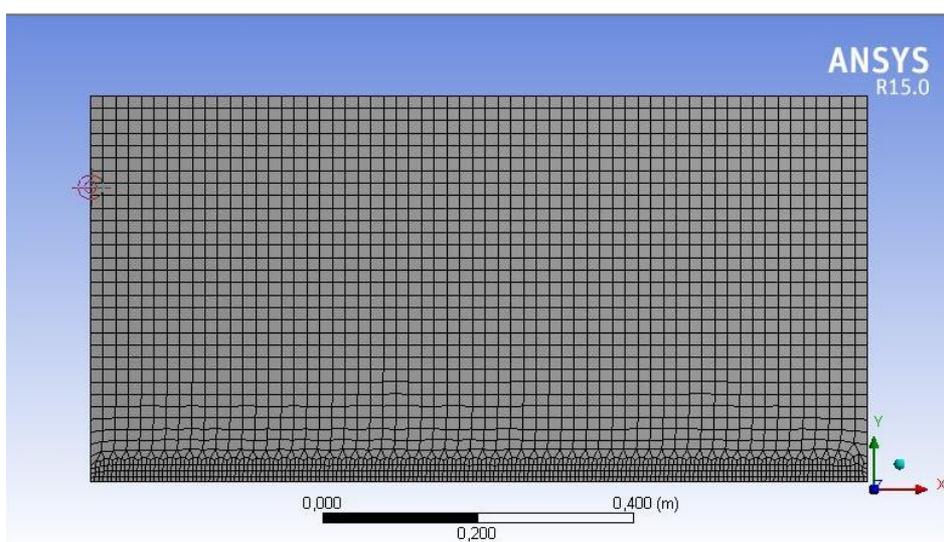


Figura 4.3 Representação gráfica da malha numérica utilizada para simulação.

4. Validação do modelo

Na definição do problema, foi considerado o domínio fluido e com as propriedades do ar disponíveis na biblioteca de material dos *Ansys Fluent*.

As condições de fronteira escolhidas, utilizando como vista de referência a presente nas figuras anteriores, foram as seguintes:

- *Velocity-inlet* – na fronteira esquerda;
- *Pressure-outlet* – na fronteira direita;
- *Stationary Wall* – sem escorregamento e com temperatura constante – na fronteira inferior;
- *Stationary Wall* – com escorregamento e com fluxo de calor nulo constante – na fronteira superior.

O *solver* utilizado, neste caso, foi o *pressure-based* implícito juntamente com os parâmetros de relaxação predefinidos no *software* dado que estes se revelaram suficientes para garantir a estabilidade do método.

A Figura 4.4 e a Figura 4.5 traduzem a representação gráfica dos padrões de velocidade e temperatura obtidos, respetivamente.

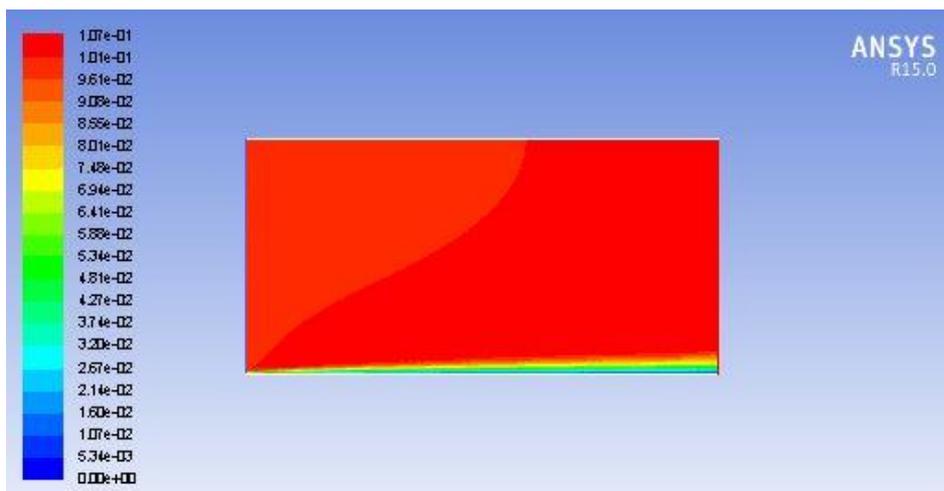


Figura 4.4 Distribuição de velocidade obtida no domínio de estudo.

4. Validação do modelo

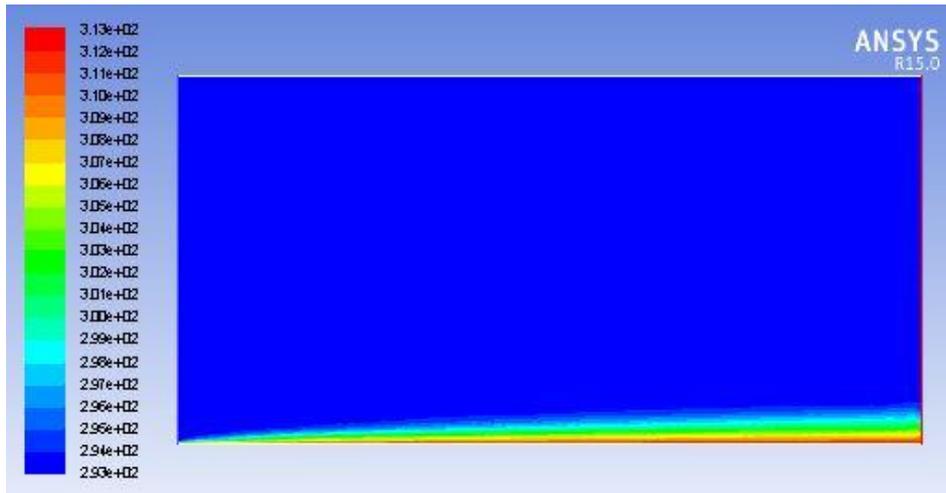


Figura 4.5 Distribuição térmica obtida no domínio de estudo.

Os parâmetros de comparação com a previsão teórica podem também ser obtidos diretamente do *software*. Neste caso, é possível obter quer o valor local de h e de Nu , quer os valores médios destes no comprimento da placa. Na Tabela 4.2, é possível observar os valores obtidos numericamente bem como o desvio percentual face à previsão teórica.

Tabela 4.2 Resultados obtido numericamente para os parâmetros de cálculo previstos.

Parâmetro	Valor obtido	Unidade	Desvio [%]
Nu_L	30.65	Adimensional	23.2
\overline{Nu}_L	55.63	Adimensional	11.7
h_L	0.74	$\frac{W}{m^2 K}$	21.6
\overline{h}_L	1.35	$\frac{W}{m^2 K}$	11.3

4.3 Convecção forçada num escoamento interno em conduta

De uma forma similar à apresentada na secção anterior, será analisado o comportamento térmico de um fluido em escoamento no interior de uma conduta cilíndrica. A metodologia em nada difere da utilizada na Secção 4.2, utilizando-se novamente os números adimensionais já expostos no início deste capítulo.

Nesta geometria específica, a transição laminar-turbulento ocorre para $Re_D = 2100$ e as correlações matemáticas para a estimativa do número de *Nusselt* apresentam uma estrutura semelhante às utilizadas no caso da placa plana.

Neste caso, surge o conceito de **escoamento completamente desenvolvido**, dada a influência da entrada da tubagem neste mesmo. À distância entre a entrada da tubagem e a zona de escoamento completamente desenvolvido chama-se **comprimento de entrada** $x_{cd,v}$.

Em regime laminar, este comprimento de entrada é dado pela Equação (4.10).

$$x_{cd,v} \approx 0.05 Re_D D. \quad (4.10)$$

Para $x > x_{cd,v}$, o número de *Nusselt* toma um valor constante, dado que, a partir deste ponto, o perfil de velocidades permanece inalterado, pelo que o perfil térmico apresenta o mesmo comportamento.

O valor de *Nusselt* irá depender das considerações assumidas. Assim, em condições laminares, na zona de escoamento totalmente desenvolvido e para uma temperatura de superfície constante, tem-se:

$$Nu_D = \frac{hD}{k} = 4.36. \quad (4.11)$$

Por outro lado, em condições laminares, na zona de escoamento totalmente desenvolvido e para um fluxo de calor constante, verifica-se:

$$Nu_D = \frac{hD}{k} = 3.66. \quad (4.12)$$

4. Validação do modelo

Nas Equações (4.11) e (4.12), é possível concluir que, neste caso, o número de *Nusselt*, neste caso, é independente, quer do número de *Prandtl*, quer do número de *Reynolds*.

Na zona de desenvolvimento de escoamento, ou no comprimento de entrada, o caso já é diferente dado que os números de *Prandtl* e de *Reynolds* têm influência no número de *Nusselt*. A correlação matemática que permite estimar, localmente, este último parâmetro é dada pela Equação (4.13) e é válida para o intervalo $0.48 < Pr < 16700$.

$$Nu_D = 1.86(Re Pr)^{1/3} \left(\frac{D}{L}\right)^{1/3}. \quad (4.13)$$

Em regime turbulento, é também separada a zona de escoamento totalmente desenvolvido e a zona de desenvolvimento do mesmo, mas as equações tomam estruturas ligeiramente diferentes.

Na zona de escoamento totalmente desenvolvido, a correlação matemática utilizada para estimar o número de *Nusselt* local é dada pela Equação (4.14), onde f representa o fator de atrito associado à tubagem.

$$Nu_D = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) (Re_D - 1000) Pr}{1 + 12.7 \left(\frac{f}{8}\right)^{1/2} (Pr^{2/3} - 1)}. \quad (4.14)$$

Neste caso, é frequente a utilização de uma correlação mais simples (Equação (4.15)):

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{4/5} Pr^n, \quad (4.15)$$

onde $n = 0.4$ para o processo de aquecimento do fluido e $n = 0.3$ para o processo de arrefecimento do mesmo. Embora (4.15) tenha associado um erro ligeiramente superior, no contexto do problema abordado, a precisão revelou-se suficiente e satisfatória.

Esta correlação foi experimentalmente validada para as seguintes condições:

- $0.7 \lesssim Pr \lesssim 160$
- $Re \gtrsim 10000$
- $\frac{L}{D} \gtrsim 10$

4. Validação do modelo

Dado que em regimes de turbulência o comprimento de entrada é relativamente curto, é vulgar aproximar o valor médio de *Nusselt* no comprimento da tubagem pelo valor deste mesmo na zona de escoamento totalmente desenvolvido.

4.3.1 Previsão teórica

Para efeitos de simulação, foi considerada uma tubagem de comprimento $L = 0.3$ m, com diâmetro $d = 0.005$ m, a uma temperatura constante $T_w = 313$ K. O fluido considerado foi ar, com uma velocidade $U_\infty = 1$ m/s e $T_\infty = 293$ K.

Estes valores de entrada correspondem a um fluxo laminar, pelo que foram utilizadas, para efeitos de cálculo, as correlações associadas a este tipo de regime.

Como propriedades do ar foram tomados os valores presentes na biblioteca do *Ansys Fluent*. A zona da tubagem estudada foi a respeitante à zona de escoamento totalmente desenvolvido.

A Figura 4.6 procura ilustrar a situação de cálculo considerada e simulada.

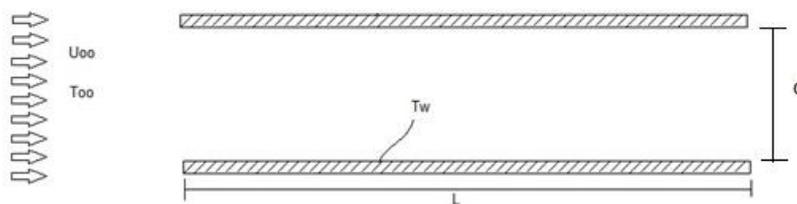


Figura 4.6 Representação gráfica do problema considerado.

A previsão teórica deste cenário é apresentada na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 Valores de referência obtidos teoricamente.

Parâmetro	Valor teórico	Unidade
Re_L	343	Adimensional
\overline{Nu}_L	3.01	Adimensional
\overline{h}_L	14.58	$\frac{W}{m^2K}$

4. Validação do modelo

4.3.2 Simulação numérica

A geometria do domínio deste cenário foi feita de forma idêntica ao anterior. No entanto, no que concerne à malha numérica, optou-se por manter uma estrutura maioritariamente uniforme mas com duas zonas de refinamento nas fronteiras superior e inferior, tal como ilustrado na Figura 4.7

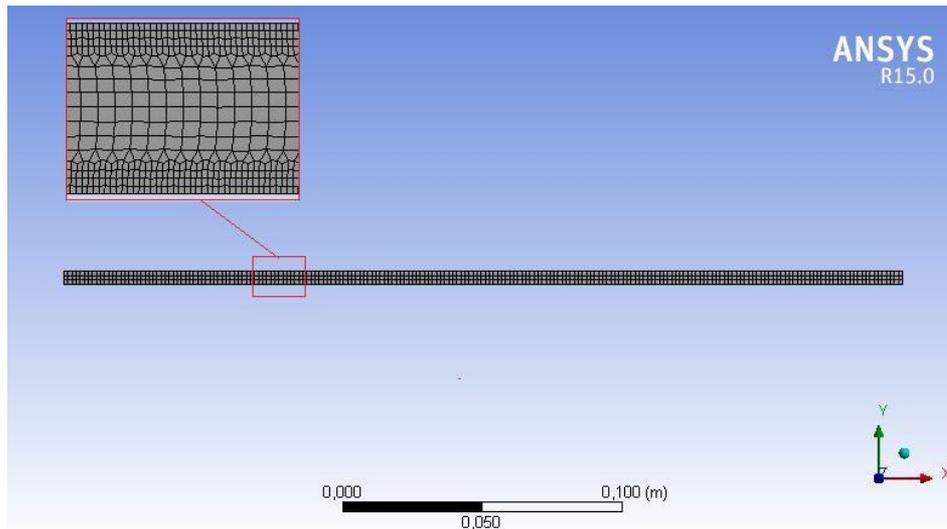


Figura 4.7 Representação gráfica da malha numérica utilizada para simulação.

Manteve-se o domínio do fluido com propriedades características do ar, presentes na biblioteca do *software*.

As condições de fronteira escolhidas, utilizando como vista de referência a presente nas figuras anteriores, foram as seguinte:

- *Velocity-inlet* – na fronteira esquerda;
- *Pressure-outlet* – na fronteira direita;
- *Stationary Wall* – com escorregamento e temperatura constante – na fronteira inferior;
- *Stationary Wall* – com escorregamento e temperatura constante – na fronteira superior.

4. Validação do modelo

O *solver* utilizado, também neste caso, foi o *pressure-based* com o algoritmo de acoplamento *coupled*. Paralelamente, os parâmetros de relaxamento associados ao método de resolução do sistema foram considerados iguais a 0.1.

De uma forma análoga ao exemplo anterior, foi possível perfilar a dispersão de velocidades e temperaturas no seio do domínio, tal como é possível observar na Figura 4.8 e na Figura 4.9, respetivamente.

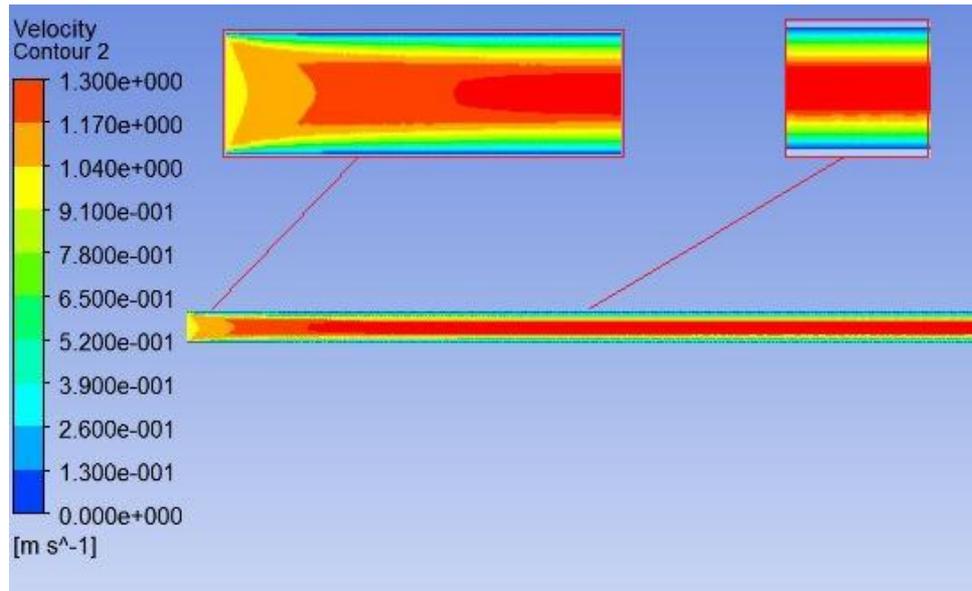


Figura 4.8 Distribuição de velocidade obtida no domínio de estudo.

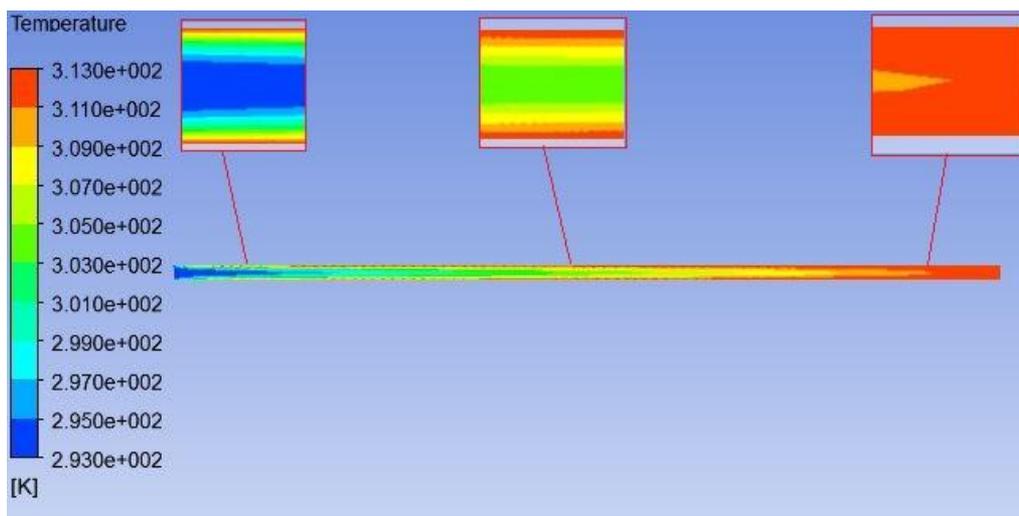


Figura 4.9 Distribuição térmica obtida no domínio de estudo.

4. Validação do modelo

A Tabela 4.4 apresenta os valores obtidos numericamente para os parâmetros estimados teoricamente na subsecção anterior.

Tabela 4.4 Resultados obtido numericamente para os parâmetros de cálculo previstos

Parâmetro	Valor obtido	Unidade	Desvio [%]
\overline{Nu}_L	3.64	Adimensional	20.9
\overline{h}_L	17.64	$\frac{W}{m^2K}$	21

4.4 Convecção natural sobre uma placa vertical

Nesta secção são abordadas as aproximações matemáticas que tornam possível a previsão deste fenómeno de convecção natural numa placa plana e vertical.

O estudo deste caso específico leva à utilização de números adimensionais ligeiramente diferentes dos apresentados até agora. Neste caso, as correlações matemáticas permitem estimar o valor de *Nusselt* em função dos números de *Grashoff* e de *Prandtl*, conforme é possível ver na Equação (4.16).

$$Nu_x = \left(\frac{Gr_x}{4}\right)^{\frac{1}{4}} g(Pr), \quad (4.16)$$

onde $g(Pr)$ é dado pela Equação (4.17).

$$g(Pr) = \frac{0.75 Pr^{0.5}}{(0.609 + 1.221 Pr^{0.5} + 1.238 Pr)^{0.25}}. \quad (4.17)$$

Para a estimativa do valor médio de *Nusselt* numa placa de comprimento L , é apresentada a Equação (4.18).

$$\overline{Nu}_L = \frac{4}{3} Nu_L. \quad (4.18)$$

4. Validação do modelo

4.4.1 Previsão teórica

Para efeitos de simulação, foi considerada uma placa de comprimento $L = 0.1$ m, a uma temperatura constante $T_w = 313$ K. O fluido considerado foi ar e $T_\infty = 300$ K. Como propriedades do ar foram tomados os valores presentes na biblioteca do *Ansys Fluent*.

Na Figura 4.10 é possível observar a estrutura do problema considerado, bem como os valores de entrada considerados.

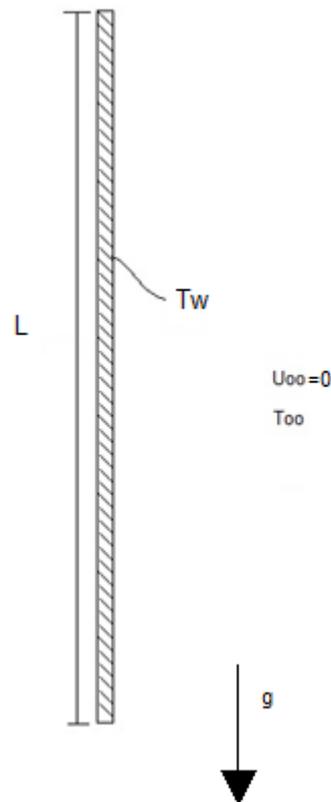


Figura 4.10 Representação gráfica do problema considerado.

Tabela 4.5 Valores de referência obtidos teoricamente.

Parâmetro	Valor teórico	Unidade	Parâmetro	Valor teórico	Unidade
Nu_L	13.52	Adimensional	h_L	3.27	$\frac{W}{m^2 K}$
\overline{Nu}_L	18.03	Adimensional	\overline{h}_L	4.36	$\frac{W}{m^2 K}$

4. Validação do modelo

4.4.2 Simulação numérica

A conceção da geometria para este domínio foi feita de forma análoga à apresentada anteriormente, alterando-se apenas as dimensões do mesmo. Para a malha foi mantida a mesma estratégia, com uma estrutura uniforme com refinamento local na fronteira do lado esquerdo, conforme ilustra a Figura 4.11.

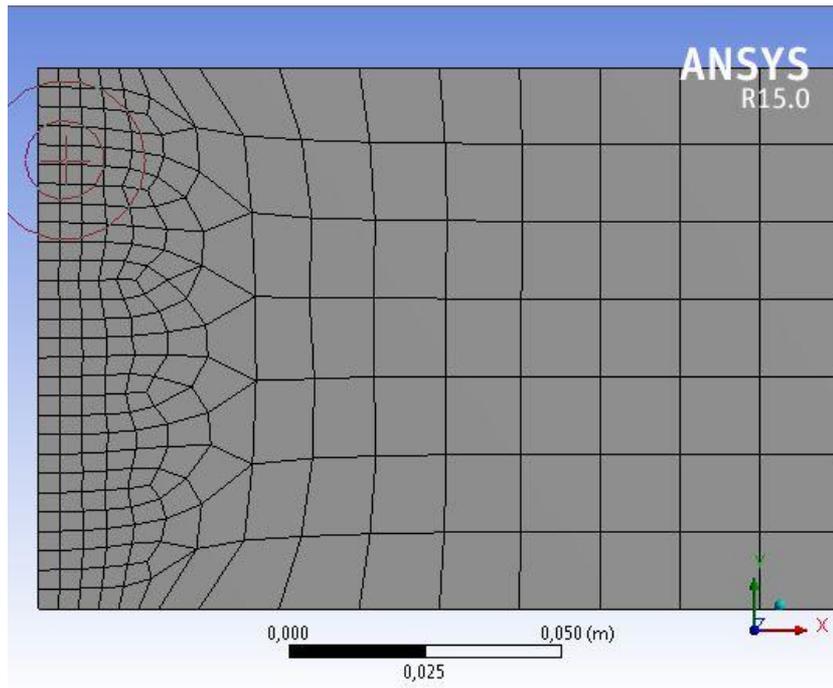


Figura 4.11 Representação gráfica da malha numérica utilizada para simulação.

As características físicas do domínio consideradas foram as já expostas nos exemplos anteriores.

As condições de fronteira fixadas, utilizando como vista de referência a presente nas figuras anteriores, foram as seguintes:

- *Pressure-inlet* – na fronteira inferior;
- *Pressure-outlet* – na fronteira superior;
- *Stationary Wall* – com escorregamento e temperatura constante – na fronteira do lado esquerdo;
- *Stationary Wall* – sem escorregamento e fluxo térmico nulo – na fronteira do lado direito.

4. Validação do modelo

O *solver* utilizado, neste caso, foi o *density-based* implícito, dada a forte dependência entre a velocidade e a densidade. Por forma a garantir a estabilidade deste método de resolução, foi utilizado um coeficiente de relaxação igual a 0.1.

Nas figuras seguintes, é possível observar as distribuições de velocidades e temperatura obtidas, respetivamente.

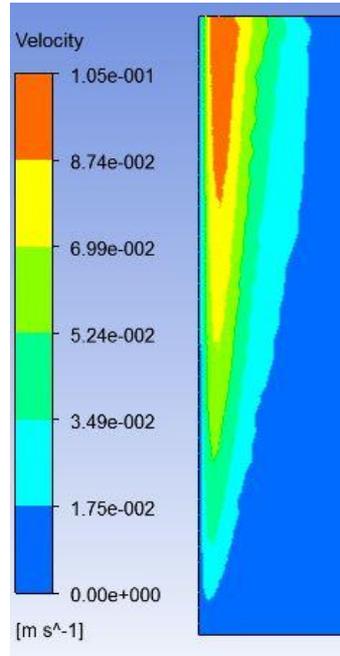


Figura 4.12 Distribuição de velocidade obtida no domínio de estudo.

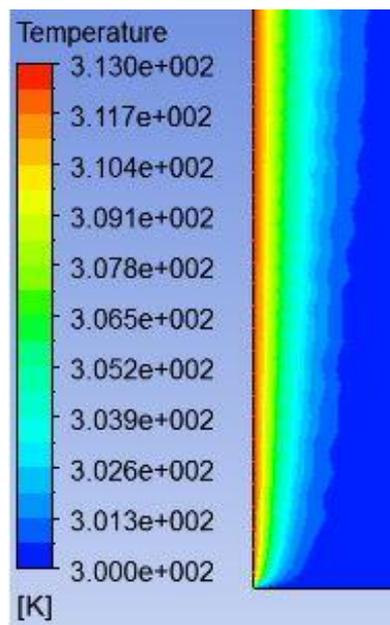


Figura 4.13 Distribuição térmica obtida no domínio de estudo.

4. Validação do modelo

A Tabela 4.6 apresenta os valores obtidos numericamente para os parâmetros estimados teoricamente na subsecção anterior.

Tabela 4.6 Resultados obtido numericamente para os parâmetros de cálculo previstos.

Parâmetro	Valor obtido	Unidade	Desvio [%]
Nu_L	15.14	Adimensional	12.0
\overline{Nu}_L	19.20	Adimensional	6.1
h_L	3.67	$\frac{W}{m^2 K}$	12.2
\overline{h}_L	4.65	$\frac{W}{m^2 K}$	6.5

Uma nota breve para a sensibilidade que este caso revelou para a malha aplicada dado que a descrição da pluma se tornou estritamente dependente da dimensão do volume de controlo na zona adjacente à parede.

As Figuras Figura 4.14 e Figura 4.15 ilustram os resultados obtidos para uma malha ortogonal sem refinamento local.

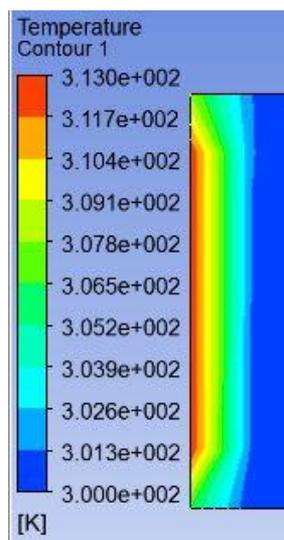


Figura 4.14 Distribuição térmica obtida no domínio de estudo com malha sem refinamento local.

4. Validação do modelo

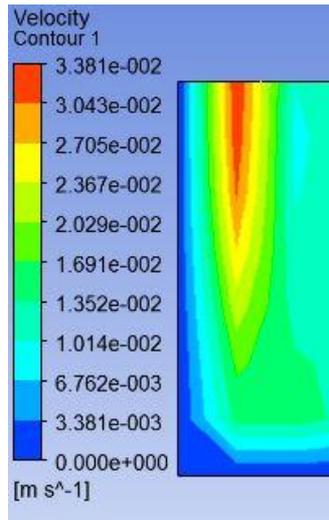


Figura 4.15 Distribuição de velocidade obtida no domínio de estudo com malha sem refinamento local

Note-se que a ausência de resolução na zona da troca de calor não impede a resolução do sistema nem devolve qualquer tipo de erro numérico associado à resolução do mesmo. No entanto, é visível que o resultado devolvido ficou longe da pluma que se esperaria, quer em termos geométricos (dado o afastamento desta em relação à parede) quer em termos de dimensão (pois o volume de ar com movimento induzido é muito maior, sendo quase a totalidade do domínio de estudo), pelo que foram prontamente recusados e avaliada a melhor forma de contornar o problema.

4.5 Convecção natural numa cavidade horizontal

Procurando aproximar o caso teórico da situação que se pretende estudar, o comportamento de um PCB, revelou-se interessante o estudo da troca de calor por convecção natural no interior de cavidades horizontais, visto ser esta a condição em que grande parte dos PCB se encontra, dado estarem enclausuradas por uma envolvente.

A troca de calor nesta geometria é regida, tal como as outras, por um gradiente térmico. A orientação deste gradiente térmico ditará se é induzido ou não um movimento na massa de fluido adjacente.

A relação matemática que procura traduzir este fenómeno particular é expressa pela Equação (4.19) e é válida para $3 \times 10^5 \lesssim Ra_L \lesssim 7 \times 10^9$.

$$\overline{Nu}_L = 0.069 Ra_L^{1/3} Pr^{0.074}. \quad (4.19)$$

4. Validação do modelo

4.5.1 Previsão teórica

Para efeitos de simulação, foi considerada uma cavidade de comprimento $L = 1$ m, com altura $H = 0.05$ m, com a face superior à temperatura $T_1 = 293$ K e a face inferior a uma temperatura $T_2 = 298$ K. O fluido considerado foi ar e para as propriedades deste foram tomados os valores presentes na biblioteca do *Ansys Fluent*.

Na Figura 4.16 é possível observar a estrutura do problema considerado bem como os valores de entrada considerados.

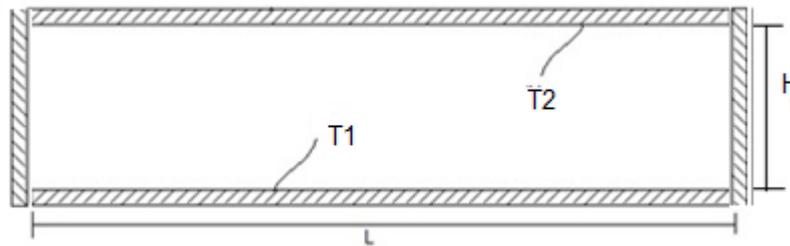


Figura 4.16 Representação gráfica do problema considerado.

Tabela 4.7 Valores de referência obtidos teoricamente.

Parâmetro	Valor teórico	Unidade
\overline{Nu}_L	54.29	Adimensional
\overline{h}_L	1.40	$\frac{W}{m^2 K}$

4.5.2 Simulação numérica

A conceção da geometria para este domínio foi feita de forma análoga à apresentada anteriormente, alterando-se apenas as dimensões do mesmo.

Para a malha foi mantida a mesma metodologia, com uma estrutura uniforme com refinamento local nas fronteiras superior e inferior, conforme ilustra a Figura 4.17.

4. Validação do modelo

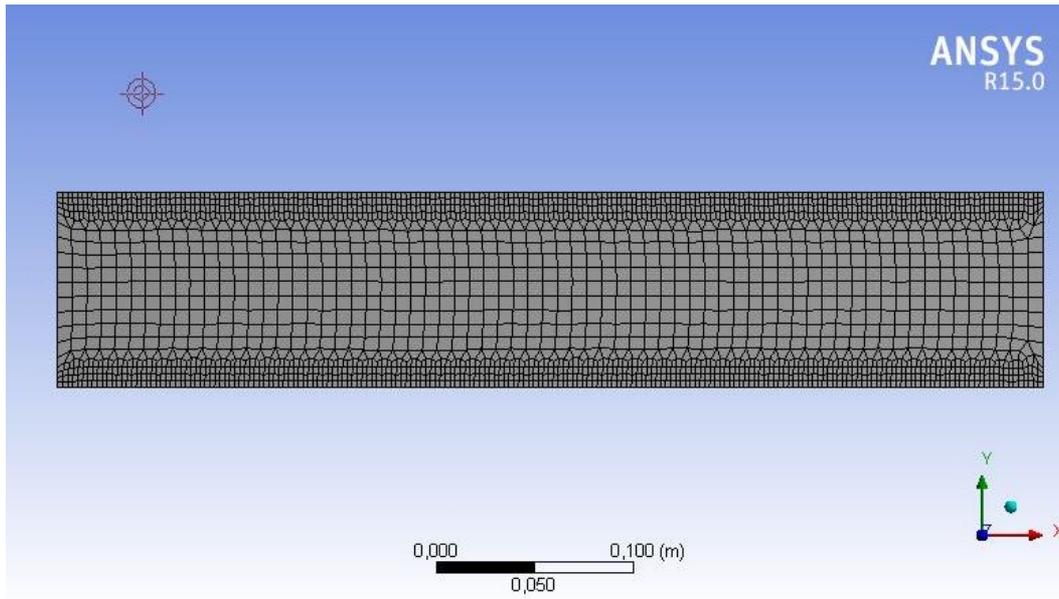


Figura 4.17 Representação gráfica da malha numérica utilizada para simulação.

As características físicas do domínio consideradas foram as mesmas face aos exemplos anteriormente expostos.

As condições de fronteira escolhidas, utilizando como vista de referência a presente nas figuras anteriores, foram as seguintes:

- *Stationary Wall* – com escorregamento e fluxo térmico nulo – na fronteira do lado direito;
- *Stationary Wall* – com escorregamento e fluxo térmico nulo – na fronteira do lado esquerdo;
- *Stationary Wall* – com escorregamento e temperatura constante – na fronteira superior;
- *Stationary Wall* – com escorregamento e temperatura constante – na fronteira inferior.

O *solver* utilizado, neste caso, foi o *pressure-based*, com o algoritmo de acoplamento SIMPLE. Por forma a garantir a estabilidade deste método de resolução, foram utilizados os coeficientes de relaxação presentes na Tabela 4.8.

Nas Figuras 4.18 e 4.19, é possível observar as distribuições de velocidades e temperatura obtidas, respetivamente.

4. Validação do modelo

Tabela 4.8 Parâmetros de relaxamento utilizados para estabilizar o método de resolução.

Parâmetro de relaxamento	Valor utilizado
Pressão	0.3
Densidade	0.01
Força de corpo	0.01
Momento	0.7
Energia	0.01

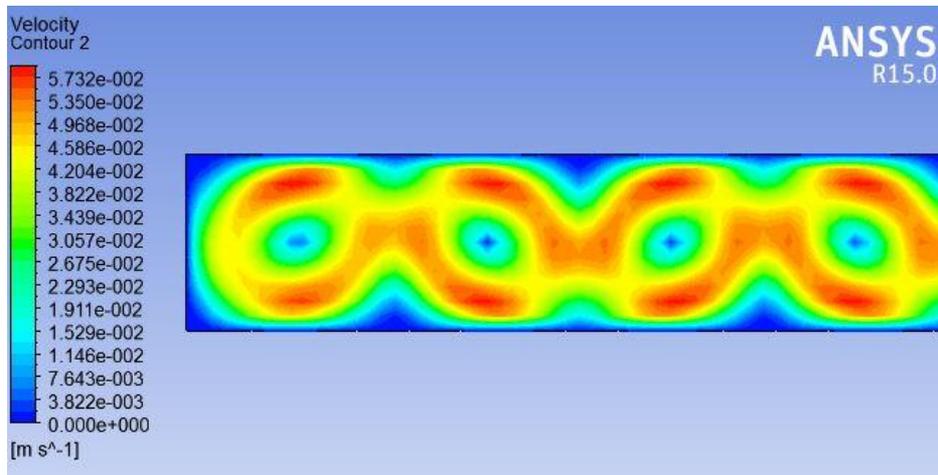


Figura 4.18 Distribuição de velocidade obtida no domínio de estudo.

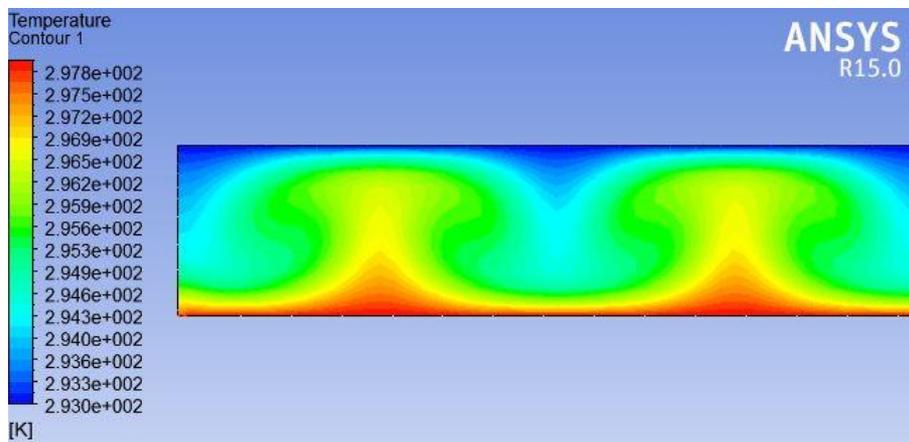


Figura 4.19 Distribuição térmica obtida no domínio de estudo.

4. Validação do modelo

A Tabela 4.9 apresenta os valores obtidos numericamente para os parâmetros estimados teoricamente na subsecção anterior.

Tabela 4.9 Resultados obtidos numericamente para os parâmetros de cálculo previstos.

Parâmetro	Valor obtido	Unidade	Desvio [%]
\overline{Nu}_L	61.31	Adimensional	12.9
\overline{h}_L	1.58	$\frac{W}{m^2 K}$	12.8

Capítulo 5

Casos de estudo

Neste capítulo é feita a apresentação e dos cenários estudados e simulados numericamente com o intuito de perceber o comportamento de uma placa de circuito impresso na presença de componentes eletrónicas em funcionamento. Paralelamente, são também expostas as condições de fronteira e fenómenos considerados nos diferentes cenários. É ainda descrito o parâmetro principal cuja influência se procura averiguar no domínio de estudo. A análise e comentário dos resultados obtidos nos casos estudados são feitos apresentando os resultados alcançados formatados segundo vários prismas, de acordo com o contexto interpretativo.

5.1 Cenário A

Nesta secção, é feita a análise do comportamento e a dispersão térmica de uma placa na presença de uma resistência elétrica em funcionamento.

A escolha deste componente recai na sua simplicidade quer física quer construtiva. O comportamento térmico desta família de componentes é relativamente simples dado que o seu funcionamento consiste na transformação direta de corrente elétrica em calor numa relação direta. Por outras palavras, a potência elétrica deste componente é numericamente igual à potência térmica dado que toda a potência é dissipada sob a forma de calor.

Assim, foi considerada uma resistência isolada, em contacto com uma placa, e testou-se diferentes valores de potência gerada internamente por forma a avaliar quer o pico de temperatura registado, quer a dimensão da zona de influência deste último.

A placa de circuito impresso foi considerada como homogénea, tendo sido utilizadas as propriedades térmicas do FR-4, material que corresponde à maior parte da composição das PCB. A Tabela 5.1 enquadra as propriedades utilizadas para a caracterização da placa nas simulações associadas a este cenário.

Note-se que, embora o *software* permita a inclusão de propriedades anisotrópicas, para efeitos de simulação, foi desprezada, neste caso, a anisotropia que se verifica em algumas propriedades.

5. Casos de estudo

Tabela 5.1 Propriedades consideradas na definição do FR-4.

Propriedade	Valor considerado
Massa volúmica [kg/m^3]	1900
Condutividade [$\frac{\text{W}}{\text{m.K}}$]	0.39
Calor específico [$\frac{\text{J}}{\text{kg.K}}$]	1150

Tal como já referido, procurou-se fazer um teste de sensibilidade associada à potência elétrica da resistência. Para tal, foram testados três valores: 1 W; 2 W; e 3 W.

Como fenómenos considerados, pretende-se salientar a contribuição dos seguintes mecanismos:

- convecção natural entre o conjunto placa/resistência e o ar envolvente (faces superior e inferior da placa);
- condução de calor no interior da placa;
- condução de calor entre a resistência e a placa.

Note-se que foi desprezada a troca de calor entre as faces laterais da placa e o ar dada a sua área ser muito inferior à área das restantes faces. É também de referir, ainda, a simplificação do comportamento térmico da resistência, na medida em que a geração de calor foi associada à massa de uma forma uniforme, pelo que o gradiente térmico neste componente é expectável que não evidencie uma grande amplitude dentro do domínio da resistência

A geometria do domínio considerado é relativamente simples, tendo sido modelados dois corpos separadamente. As Figuras 5.1 e 5.2, juntamente com a Tabela 5.2, permitem consultar os avanços considerados na modelação geométrica destes dois domínios.

5. Casos de estudo

Tabela 5.2 Parâmetros geométricos considerados para o domínio de estudo.

Corpo	Dimensão [mm]	
Placa	L	140
	H	120
	e	2
Resistência	D	1
	L	10
	d	0.5

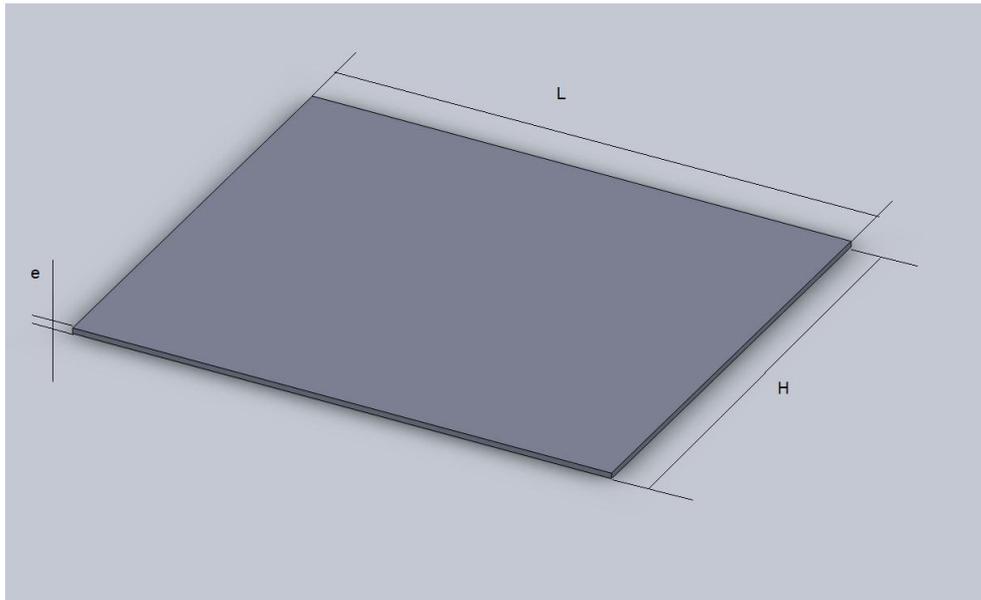


Figura 5.1 Dimensões características da definição geométrica do domínio da placa.

5. Casos de estudo

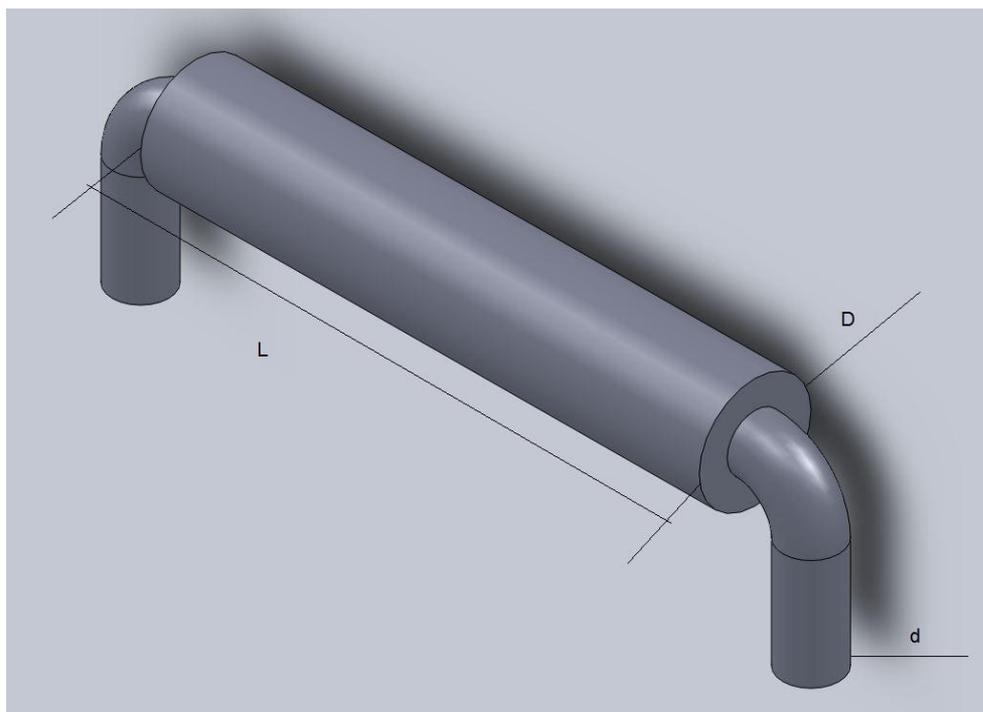


Figura 5.2 Dimensões características da definição geométrica do domínio da resistência.

Note-se também que no desenrolar das simulações aqui expostas, os parâmetros geométricos foram tomados como fixos, pelo que a geometria descrita é válida para todos os resultados discutidos.

Para uma potência de 1 W, o gradiente térmico obtido não é muito acentuado, conforme seria expectável. Da simulação numérica é possível ver graficamente a dispersão da temperatura no domínio de estudo e ainda analisar dados como o pico de temperatura. A Figura 5.3 ilustra a distribuição da temperatura no domínio considerado.

Na Tabela 5.3 são sumarizados os valores obtidos e calculados a partir dos da simulação numérica. A área indicada é uma estimativa da área influência numa base percentual com referência a área da placa. Foi considerado sob influência toda a área com temperatura compreendida entre $T_{amb} + 0.01\Delta T$ e T_{max} .

5. Casos de estudo

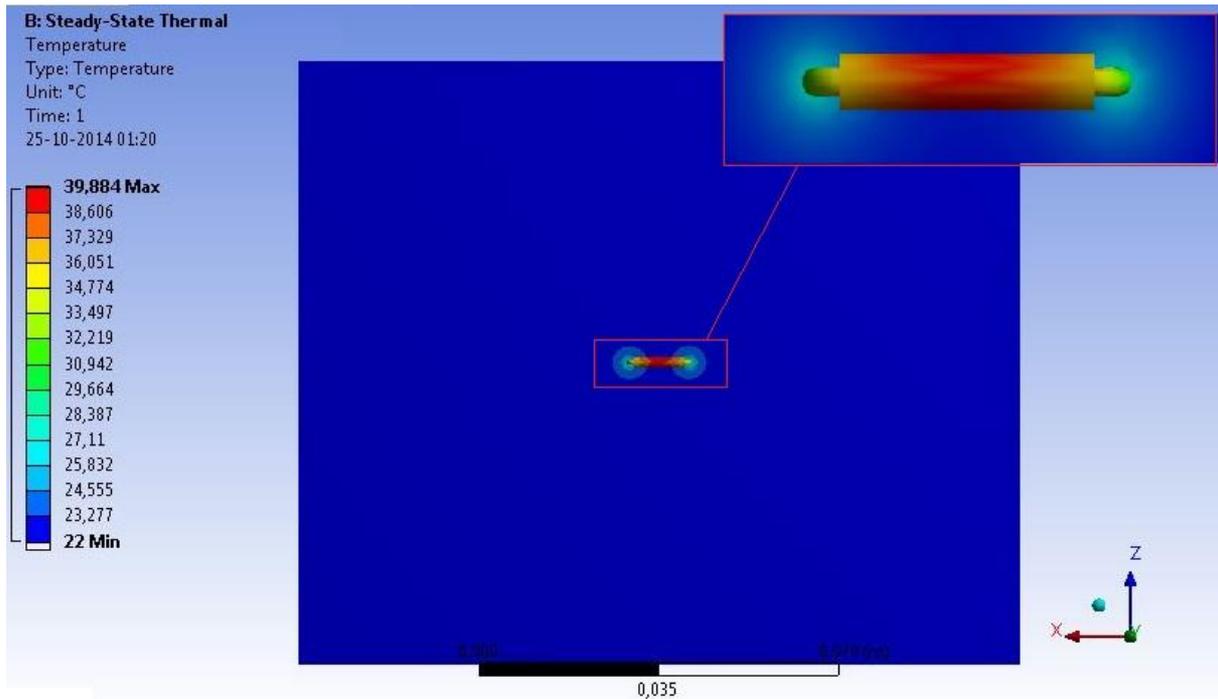


Figura 5.3 Dispersão da temperatura no domínio placa+resistência para 1W dissipado.

Tabela 5.3 Resultados obtidos da simulação do cenário A com 1W de potência dissipada.

Propriedade	Valor obtido/calculado
T_{max} [°C]	39.88
A [%]	0.52

Utilizando o valor de potência de 2 W, foi possível registrar uma maior área de influência térmica associada à geração de calor por parte da resistência. Como esperado, foram registrados um maior pico de temperatura assim como um maior valor médio da temperatura.

A Figura 5.4 procura ilustrar a dispersão térmica obtida nesta simulação e a Tabela 5.4 reúne os resultados obtidos de uma forma idêntica à anteriormente exposta.

5. Casos de estudo

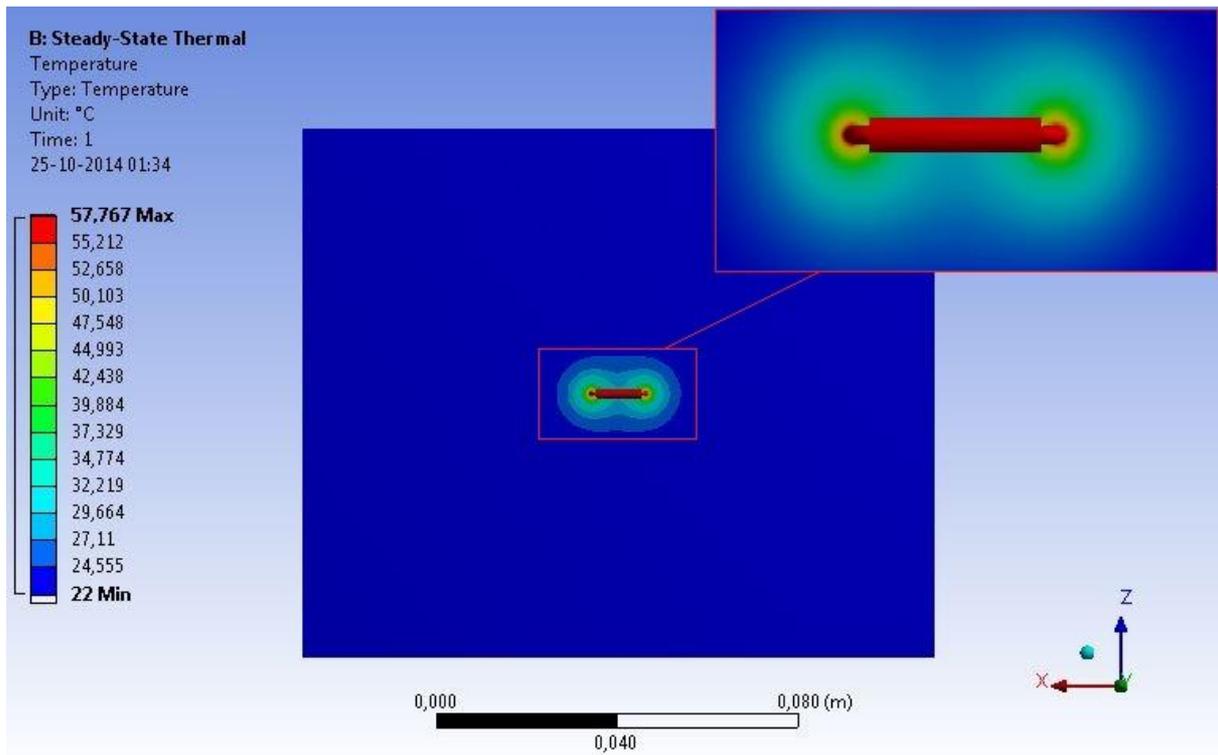


Figura 5.4 Dispersão da temperatura obtida no domínio placa+resistência para 2W dissipados.

Tabela 5.4 Resultados obtidos da simulação do cenário A com 2W de potência dissipada.

Propriedade	Valor obtido/calculado
T_{max} [°C]	57.76
A [%]	2.30

Por último, foi também avaliado o comportamento térmico do conjunto para uma potência dissipada de 3 W. Os resultados obtidos são ilustrados pela Figura 5.5 a par da Tabela 5.5.

5. Casos de estudo

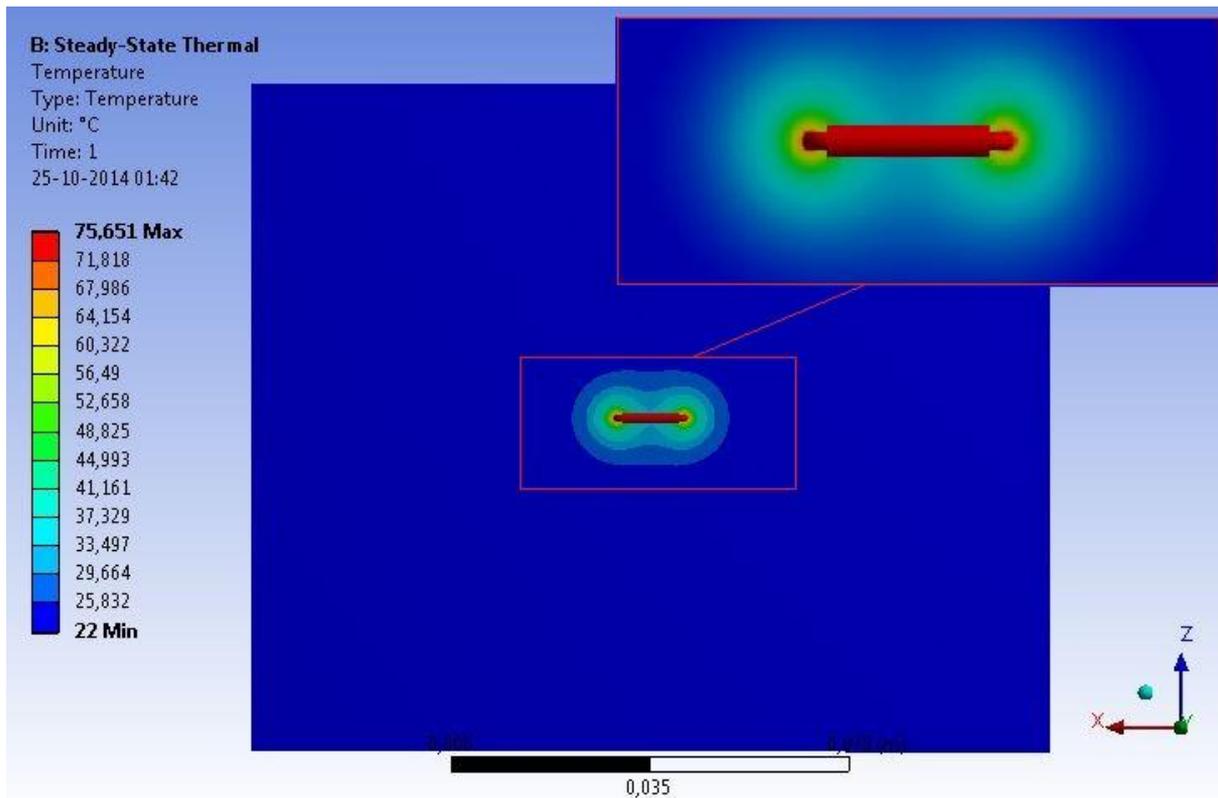


Figura 5.5 Dispersão da temperatura obtida no domínio placa+resistência para 3W dissipados.

Tabela 5.5 Resultados obtidos da simulação do cenário A com 3W de potência dissipada.

Propriedade	Valor obtido/calculado
T_{max} [°C]	75.65
A [%]	2.67

É possível salientar que uma resistência, isoladamente, tem muito pouca influência na temperatura média registada no domínio. No entanto, este tipo de comportamento é aceitável, dado que as potências em jogo são relativamente baixas e a área de contacto entre os dois corpos é também reduzida. Paralelamente, é de registar ainda a grande diferença de volumetria e de massa entre os dois corpos considerados.

Porém, não é demais referir que em casos reais, este tipo de componentes não se encontra desta forma isolada, pelo que há que considerar o efeito conjunto dos diferentes componentes

5. Casos de estudo

montados no mesmo PCB. Pode-se também considerar satisfatória a sensibilidade obtida na medida em que foi possível vislumbrar perfis térmicos idênticos ao previsível, evidenciando assim ser possível a previsão numérica da interação entre dois domínios distintos como é o caso da placa e da resistência.

Comparando com valores padrão de temperaturas máximas em funcionamento, é possível verificar que os valores obtidos registam-se dentro do intervalo “típico” de funcionamento, abaixo do máximo recomendado (algures próximo dos 150°C, para a resistência de carvão padrão).

Por último, salienta-se o facto de que ter sido considerada uma potência dissipada constante, independente da temperatura, retira algum realismo aos resultados obtidos uma vez que o valor da resistência elétrica deste tipo de componentes diminui com o aumento da temperatura e, conseqüentemente, a potência gerada diminui da mesma forma. Esta variação é característica de cada componente e, normalmente, é fornecida a curva resistência-temperatura na documentação técnica do componente elétrico.

Baseado nos resultados obtidos, foi possível concluir que as temperaturas registadas variam de uma forma muito próxima do linear com a potência dissipada na resistência. A Figura 5.6 sustenta esta afirmação com bastante clareza.

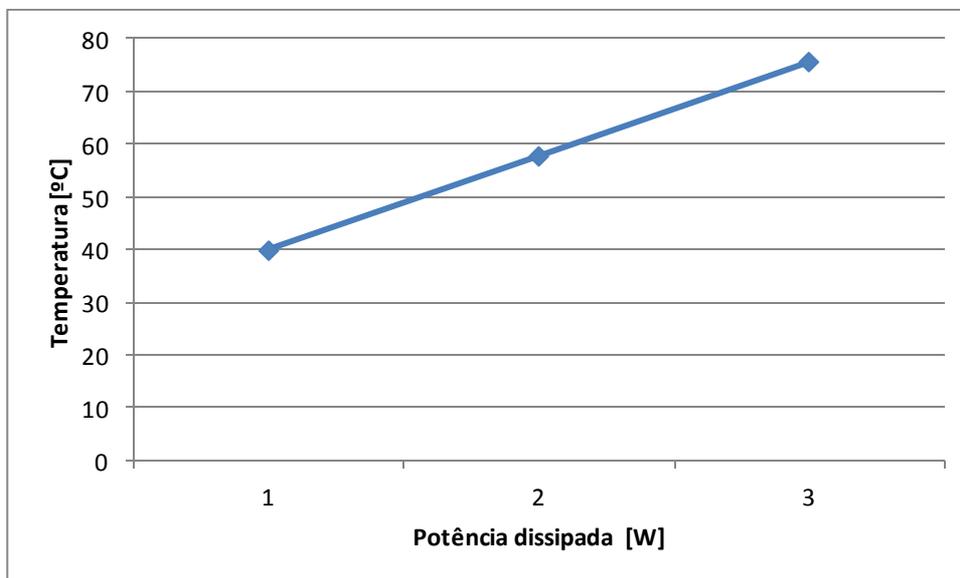


Figura 5.6 Relação obtida entre temperatura máxima registada e a potência dissipada.

5.2 Cenário B

Neste cenário, procura-se simular uma placa com mais que uma resistência elétrica por forma a avaliar a interação entre estas no contexto térmico.

Paralelamente, tentou-se comparar o comportamento registado num conjunto de resistências com uma dada potência dissipada total e o comportamento obtido por uma só resistência com um valor de potência equivalente ao total considerado nesta simulação.

Como confronto interpretativo, foram comparados os valores de temperaturas máximas registadas em ambos os casos bem como a área de influência obtida em ambos os casos.

A resistência de referência utilizada para o estudo deste cenário partilha a geometria da utilizada anteriormente e dissipa calor numa potência de 1W. A geometria da placa permanece inalterada, bem como as condições de fronteira atrás descritas.

Os resultados obtidos na secção anterior relativos à distribuição de temperatura para uma resistência de 1W de potência dissipada foram tomados como base de comparação para os dados obtidos neste cenário. Desta forma, para este cenário foram realizadas simulações para um conjunto de duas resistências (ambas de 1W) montadas em conjunto na mesma placa e para um conjunto de três resistências idênticas nas mesmas circunstâncias.

No caso da bateria de duas resistências, é visível a influência de cada resistência no perfil térmico induzido na placa em torno destas. A Tabela 5.6 sumariza os resultados alcançados nesta simulação. Paralelamente, a Figura 5.1 ilustra a dispersão de temperaturas obtida na simulação de duas resistências em bateria.

Tabela 5.6 Resultados obtidos da simulação do cenário B com 2x1W de potência dissipada.

Propriedade	Valor obtido/calculado
T_{max} [°C]	41.70
A [%]	4.35

5. Casos de estudo

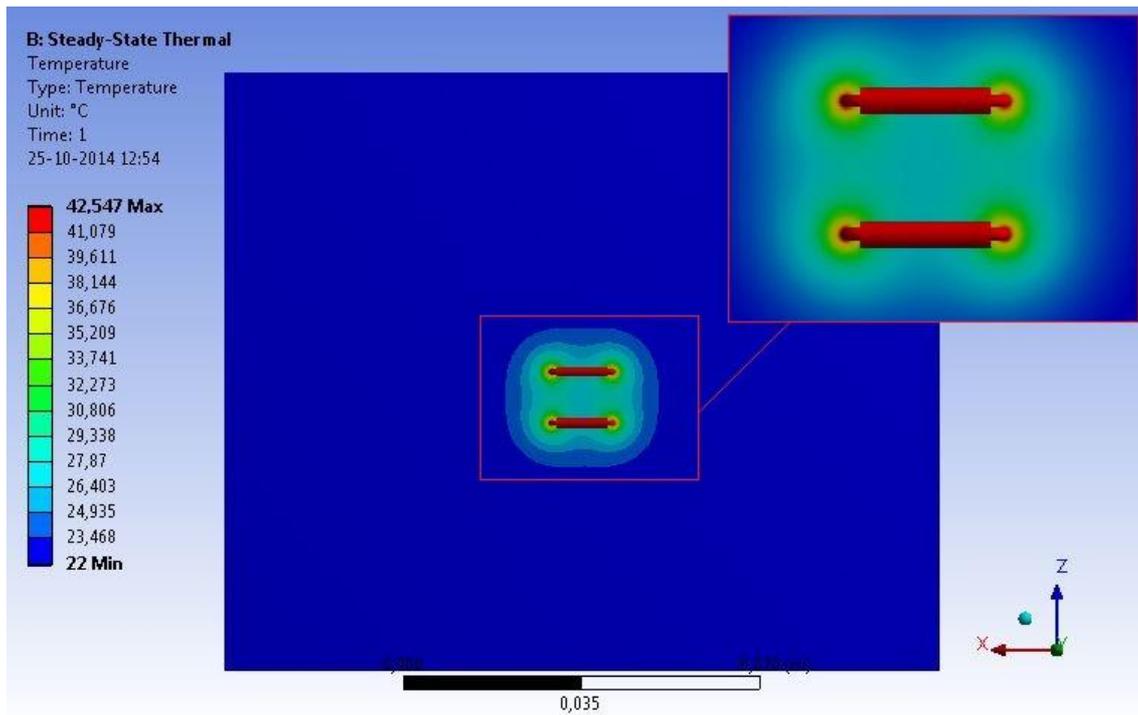


Figura 5.7 Dispersão da temperatura obtida no domínio placa+resistências para 2x1W dissipados.

Os resultados obtidos para a bateria de três resistências denotam ainda mais claramente a influência que a dissipação de calor de uma resistência tem sobre o perfil térmico induzido na placa pela resistência “vizinha”. Note-se que, quando conjugados os perfis térmicos induzidos das três resistências, são visíveis zonas de acumulação entre estas, com temperatura superior à verificada na simulação destas resistências isoladamente. Da mesma forma, é possível observar que a presença de duas resistências próximas, conforme ilustrado, induz em ambas um pico de temperatura mais elevado do que o que ocorre quando simuladas isoladamente, conforme seria previsível.

Na Figura 5.8 é possível visualizar o perfil térmico obtido na montagem de três resistências de 1W numa mesma placa complementado pelo sumário de resultados presente na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 Resultados obtidos da simulação do cenário B com 3x1W de potência dissipada.

Propriedade	Valor obtido/calculado
T_{max} [°C]	42.56
A[%]	5.94

5. Casos de estudo

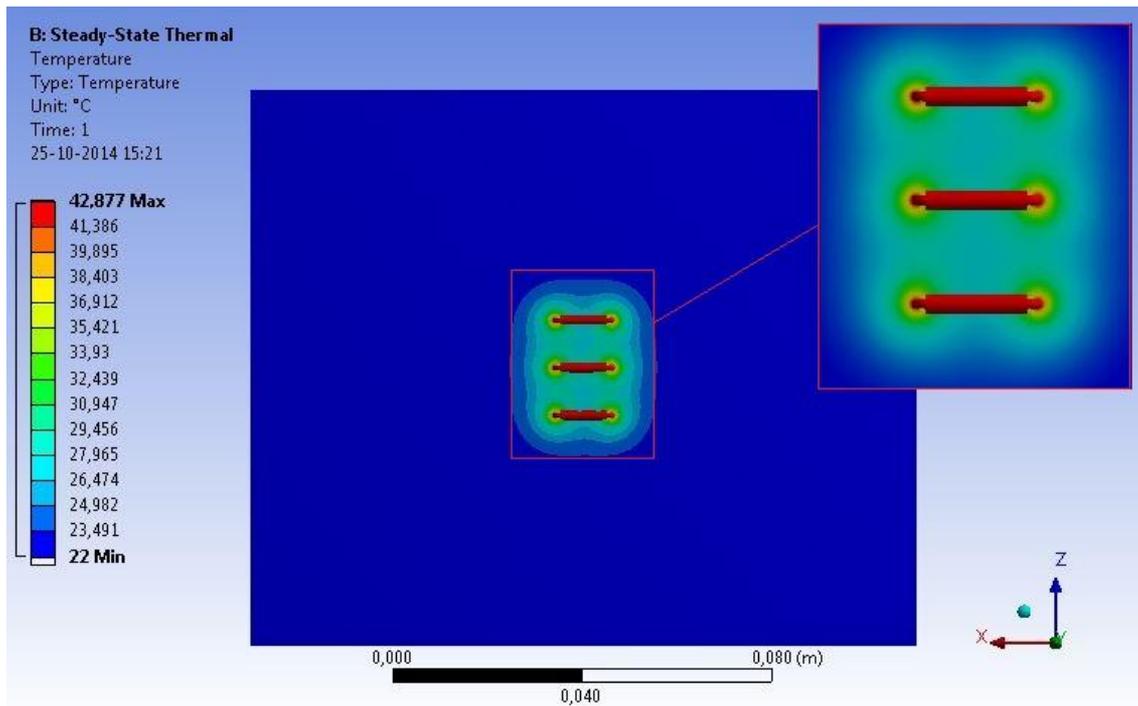


Figura 5.8 Dispersão da temperatura obtida no domínio placa+resistências para 3x1W dissipados.

De salientar o facto de o pico de temperatura não ser muito mais elevado que o registado na bateria de duas resistências. Desta forma, conclui-se que a adição da terceira resistência, com um espaçamento igual ao considerado na bateria anterior, não acentua tão vincadamente a acumulação térmica local.

Com os dados obtidos e expostos até aqui, foi possível fazer uma análise comparativa do efeito térmica provocado por uma resistência elétrica e por uma bateria de resistências com a mesma potência total, como é visível na Figura 5.9.

A conclusão mais evidente a tirar desta análise é que, do ponto de vista térmico, é sempre preferível utilizar um conjunto de resistências individualmente menos potentes pois para a mesma potência dissipada (e conseqüentemente queda de tensão, dado ser a principal função elétrica deste tipo de componente eletrônico), a distribuição de temperaturas é menos afunilada. No entanto, este tipo de solução implica um maior espaço ocupado o que, em situações práticas, pode ser visto como uma desvantagem, uma vez que, tal como já anteriormente referido, a dimensão é um critério importante no desenho e projeto da placa.

5. Casos de estudo

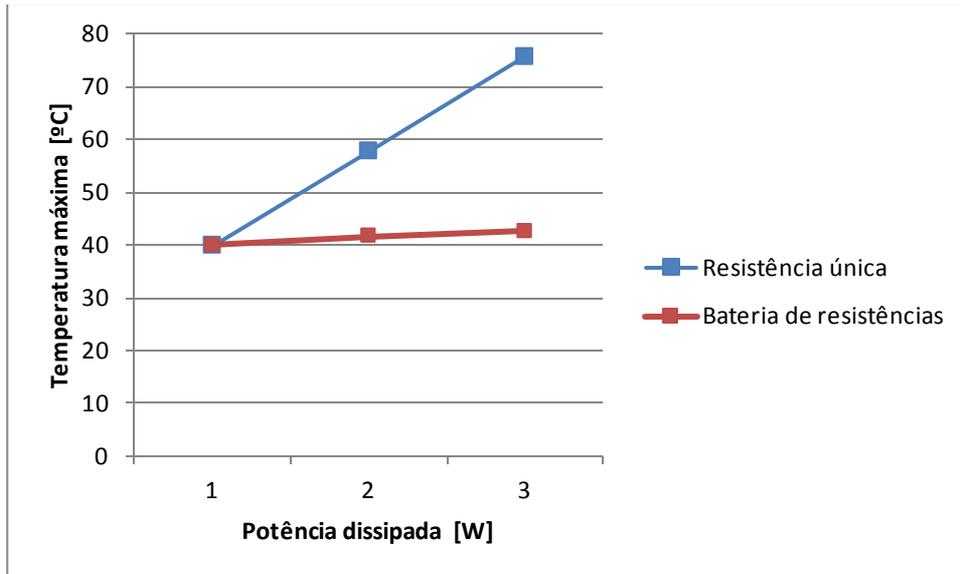


Figura 5.9 Comparação de temperaturas máximas em função da temperatura para resistências isoladas ou baterias de resistências com a mesma potência total.

5.3 Cenário C

Neste caso estuda-se a influência da composição da placa no escoamento de calor dissipado por uma resistência genérica. Para tal, foi considerada uma só resistência com dissipação de calor constante, alterando como parâmetro de entrada os valores de condutibilidade térmica da placa. A variação desta propriedade traduz a influência do número de pistas de cobre presentes na PCB e prevê-se que uma maior fração de cobre favoreça o escoamento de calor no seio da placa.

A geometria da placa foi a dos casos anteriores bem como a resistência. Quanto ao valor de potência, foi adotado o valor de 1 W, ao passo que a condutibilidade térmica da placa tomou valores que serão explicitados mais à frente.

As condições de fronteira assumidas para este cenário não diferem das utilizadas nos cenários anteriores, tendo sido tomada em consideração a convecção entre as superfícies inferior e superior da placa com o meio envolvente, a convecção entre a superfície da resistência e o ar circundante e ainda a condução de calor quer no seio dos dois domínios quer na interface entre estes.

Para fazer um teste de sensibilidade à composição material do PCB, foram consideradas três constituições possíveis: PCB sem pistas (FR-4 apenas); PCB com pistas nas faces superior e inferior e PCB multicamada (neste caso, 6 camadas de pistas).

5. Casos de estudo

Os resultados referentes ao PCB sem pistas são comuns aos apresentados na Secção 6.1, pelo que aqui será focada a atenção nos casos que procuram incluir a influência inerente ao cobre presente nas placas de estudo.

Na caracterização das placas, é importante referir que, geométrica e numericamente, as placas são idênticas. O processo de ponderação do cobre será inculido na condutividade térmica e massa volúmica do material constituinte da placa. Desta forma, a placa é considerada igualmente homogénea mas com propriedades de um material teórico, propriedades estas ponderadas em função do número e espessura das camadas de cobre consideradas.

Por uma questão de organização, será utilizada a designação de PCB-2 para a placa com duas camadas de cobre (faces superior e inferior) e de PCB-6 para a placa multicamada estudada.

No decorrer desta simulação foram considerados três materiais distintos: FR4, Cobre 7% (usual nas camadas superficiais) e Cobre 98% (para as camadas interiores). A Tabela 5.8 reúne as propriedades básicas destes três materiais considerados.

Tabela 5.8 Propriedades dos materiais considerados.

Material	Condutividade térmica	Massa volúmica
FR-4	0.30	1900
Cobre 7%	28	8000
Cobre 95%	380	8900

Para efeitos de ponderação, foi utilizada a metodologia sugerida em [5].

Feita a ponderação dos materiais e considerada a anisotropia que as camadas de cobre induzem, as propriedades equivalentes das placas de estudos podem ser consultadas na Tabela 5.9.

5. Casos de estudo

Tabela 5.9 Propriedades equivalentes calculadas para as placas de estudo.

Placa	Condutividade térmica (no plano)	Condutividade térmica (normal ao plano)	Massa volúmica
PCB-2	0.40	2.17	2146
PCB-6	0.45	8.83	2369

Concluída a definição do material constituinte da placa, é possível a simulação do seu comportamento térmico na presença de uma resistência geometricamente idêntica às utilizadas anteriormente e com uma potência dissipada de 1W.

Os resultados obtidos para o PCB-2 são ilustrados na Figura 5.10 e registados na Tabela 5.10.

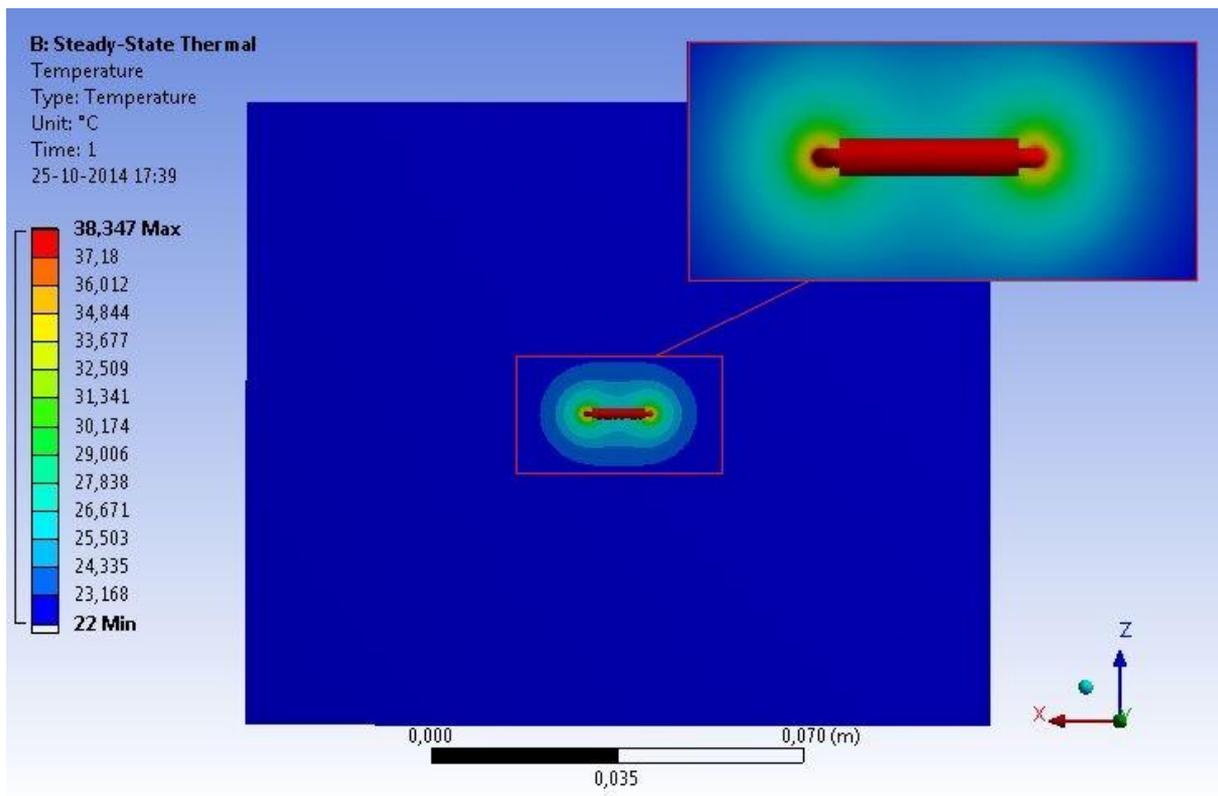


Figura 5.10 Dispersão da temperatura obtida para o PCB-2.

5. Casos de estudo

Tabela 5.10 Resultados obtidos da simulação do PCB-2.

Propriedade	Valor obtido/calculado
T_{max} [°C]	38.35
A [%]	2.07

Note-se que, considerando o efeito das camadas superficiais de cobre, o pico de temperatura registada é inferior ao obtido quando desprezada a contribuição deste material. Este facto é justificado pela muito maior condutividade do cobre bem como pela maior facilidade com que este troca calor com o ar envolvente.

Assim, para a mesma potência dissipada, a placa desempenha uma papel mais ativo no processo de extração de calor da resistência elétrica, permitindo que esta estabilize a uma temperatura inferior, ainda que apenas ligeiramente.

De forma análoga, a Tabela 5.11 e a Figura 5.11 representam e compilam os resultados obtidos na simulação referente ao PCB-6.

Tabela 5.11 Resultados obtidos da simulação do PCB-6.

Propriedade	Valor obtido/calculado
T_{max} [°C]	37.22
A [%]	3.59

Mais uma vez, o efeito condutivo do cobre favorece o escoamento de calor. Neste caso, dado o número de camadas considerado ser superior, regista-se uma maior diminuição do pico de temperatura bem como uma maior diluição desta mesma no domínio de estudo, conforme seria expectável.

5. Casos de estudo

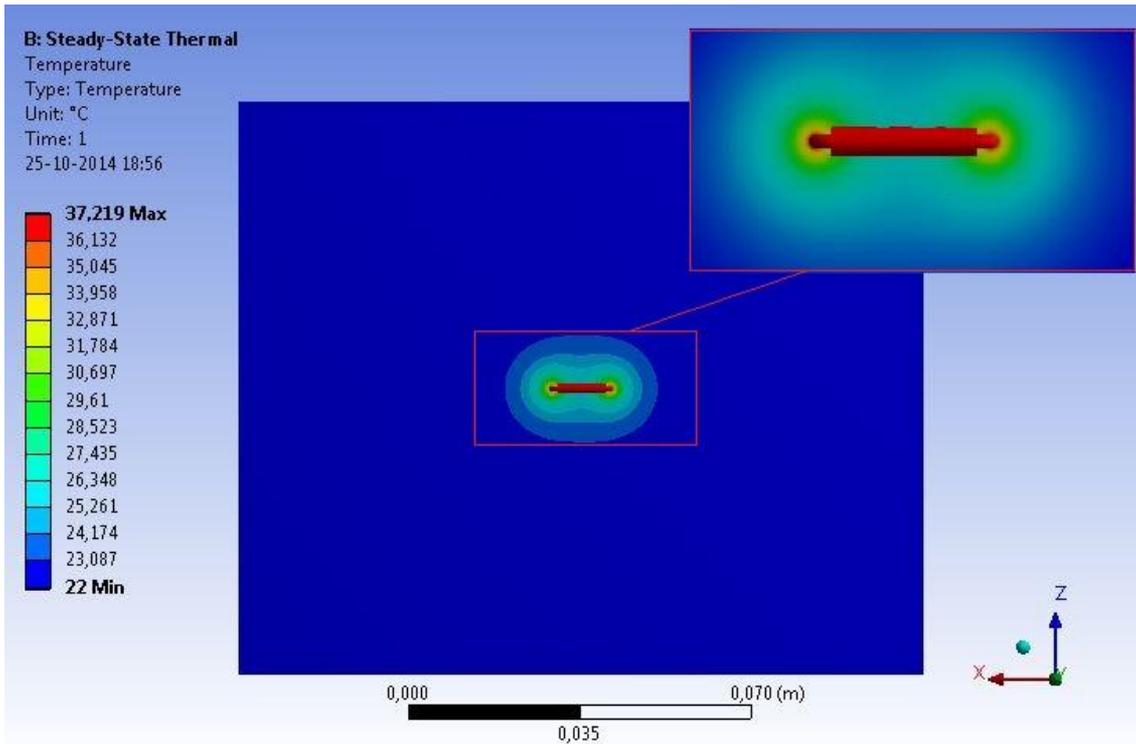


Figura 5.11 Dispersão da temperatura obtida para o PCB-6.

Posto isto, é possível esboçar um gráfico de dispersão extrapolando uma relação entre o número de vias e a temperatura máxima registada, conforme presente na Figura 5.12.

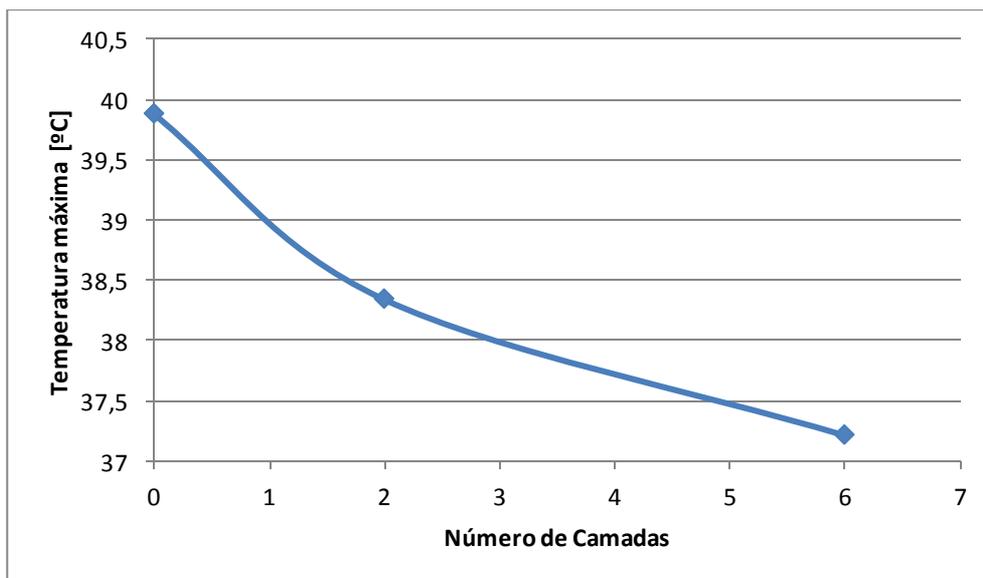


Figura 5.12 Relação obtida entre o número de vias e a temperatura máxima registada.

5.4 Cenário D

Por forma a avaliar a influência da composição do PCB no fenómeno global térmico, foram simuladas diferentes placas com diferentes resistências com o intuito de avaliar a influência da composição da placa no gráfico obtido do confronto entre temperatura máxima registada e potência dissipada na resistência elétrica.

Para tal, consideraram-se duas resistências distintas com 1 e 3 W, respetivamente, mantendo-se a geometria das resistências de caso para caso.

No ponto de vista da placa, foi considerada uma placa sem cobre, uma outra com duas pistas (inferior e superior) de cobre e uma última com seis camadas.

Relativamente às condições de fronteira, é importante realçar que pese embora a tipologia das condições utilizadas neste cenário serem idênticas às utilizadas nos cenários anteriores, foi contabilizado o efeito da pista de cobre na convecção de calor desta para o ar envolvente.

Para este efeito, dado que já eram conhecidos os dados obtidos para as resistências indicadas no PCB simples (resultados expostos na Secção 5.1), nesta secção foi necessário averiguar o comportamento térmico de uma resistência térmica de 3W montada no designado PCB-6.

Os resultados obtidos são expostos na Figura 5.13 complementada pela Tabela 5.12.

Tabela 5.12 Resultados obtidos da simulação do PCB-6 na presença de uma resistência de 3W.

Propriedade	Valor obtido/calculado
T_{max} [°C]	37.22
A [%]	4.62

5. Casos de estudo

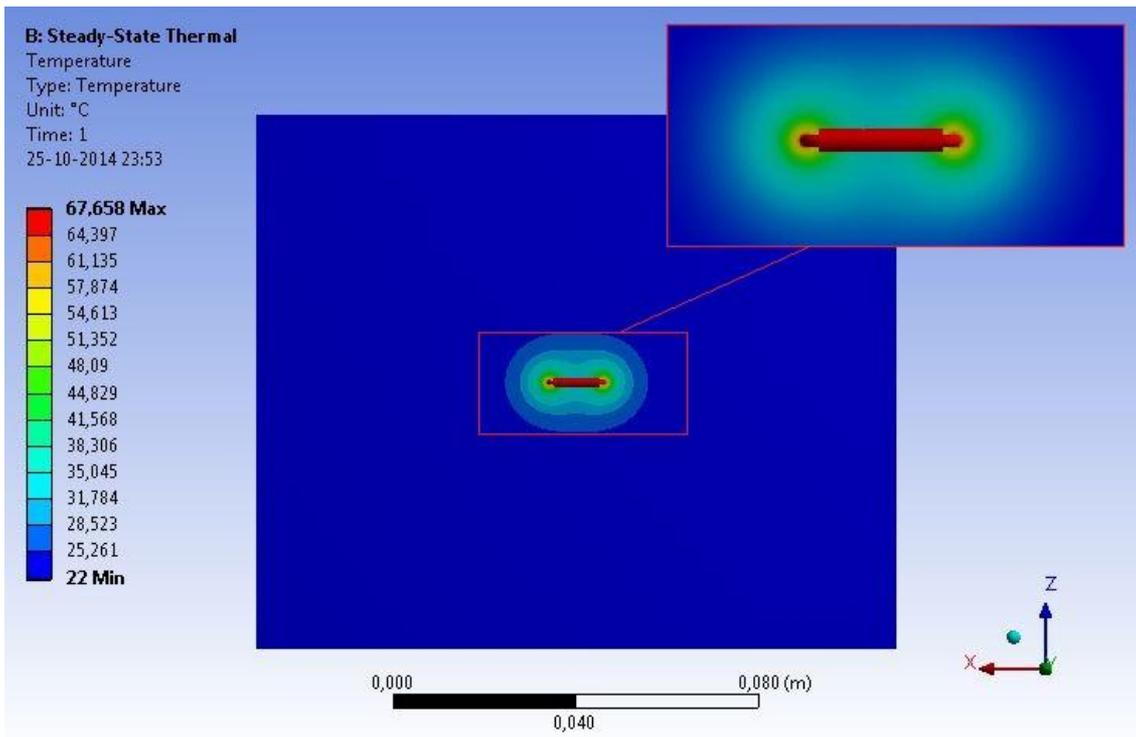


Figura 5.13 Dispersão da temperatura obtida para o PCB-6 na presença de uma resistência de 3W.

Esta análise tornou possível a comparação das curvas potência-temperatura da placa simples (sem pistas de cobre) e a placa já designada de PCB-6.

Esta comparação é apresentada na Figura 5.14 e a Tabela 5.13 resume os resultados obtidos utilizados neste confronto.

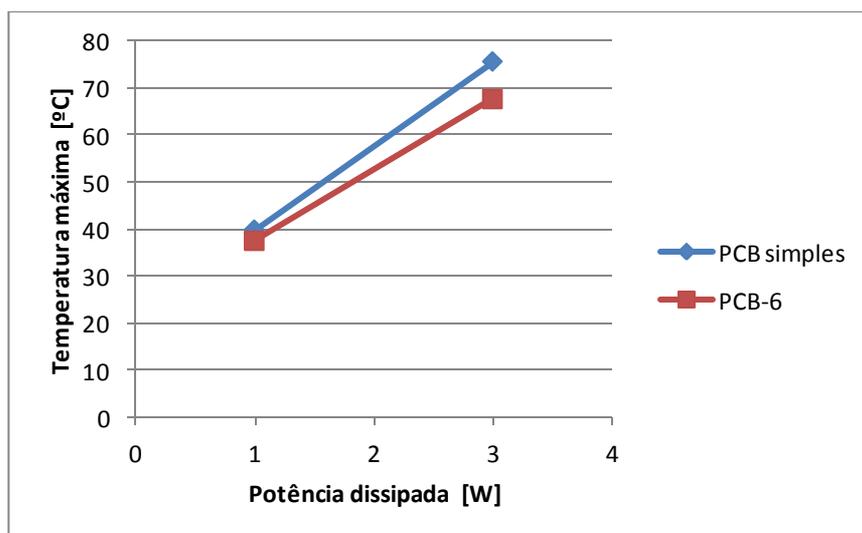


Figura 5.14 Relações obtidas entre a potência dissipada e o pico de temperatura registado para diferentes composições do PCB.

5. Casos de estudo

Tabela 5.13 Sumário dos resultados obtidos e utilizados para construção das curvas potência-temperatura.

Potência	1 W	3 W
PCB-simples	39.88 °C	75.65 °C
PCB-6	37.52 °C	67.66 °C

Tal como esperado, o aumento da condutividade térmica da placa teve influência direta na relação de proporcionalidade entre potência dissipada e temperatura máxima verificada, fundamentada pelos mesmos argumentos já expostos na análise do Cenário C.

Capítulo 6

Considerações finais

No decorrer deste trabalho foram realizados testes de sensibilidade em diferentes cenários de PCB com resistências elétricas. Estes testes permitiram avaliar o comportamento térmico do conjunto e analisar o impacto que certos parâmetros podem ter no contexto global.

As previsões teóricas revelaram-se simples e práticas de aplicar em casos de geometria simples e condições de fronteira bem definidas. No entanto, em problemas mais complexos, com trocas de calor com mecanismos mistos, as correlações matemáticas revelam uma aplicabilidade restrita e menos prática.

O erro associado a estas previsões teóricas não é tão baixo quanto desejável quando se pretende fazer uma previsão mais precisa do comportamento térmico de um conjunto como o estudado. No entanto, tendo estas sido utilizadas como referência, considerou-se que a replicação numérica das mesmas foi feita com um grau de precisão satisfatório.

Com os resultados obtidos, é possível sustentar a capacidade de modelos matemáticos aliados a *software* de CFD para previsão de defeitos de projeto dos circuitos presentes nestas placas. Esta previsão permite reduzir o tempo de projeto, valor que tem um grande e direto impacto no preço e funcionamento do mercado dos PCB.

O modelo utilizado mostrou-se numericamente estável e robusto em todos os cenários e conjugações de condições de fronteira estudadas. Porém, foi notória a grande sensibilidade deste à natureza das condições adotadas nas fronteiras do domínio bem como a refinamentos locais de malha. Desta forma, é reforçada a importância de um planeamento prévio da simulação por forma a garantir uma correta definição das condições de fronteira para otimizar o desempenho e comportamento do modelo assim como a sua versatilidade.

No desenvolver deste trabalho foi possível analisar o comportamento térmico de um PCB em regime estacionário na presença de um elemento dissipador de calor. Num contexto de análise de sensibilidade, procurou-se testar diferentes cenários e averiguar a influência do valor da potência

6. Considerações finais

dissipada em jogo, o número de elementos dissipadores presentes na placa, a constituição base da placa e ainda a conjugação da potência dissipada com as propriedades da placa. Como valores obtidos, deu-se especial relevo às temperaturas máximas registadas e à área de influência do(s) componente(s) dissipadores em cada cenário estudado.

O trabalho realizado permitiu a obtenção de perfis térmicos do PCB em diversas situações. Esta informação possibilita a identificação prévia de pontos de possível falha por concentração de temperatura. Outro prisma interessante, possível de desenvolver futuramente, seria o enquadramento da distribuição das tensões térmicas induzidas na placa por estes gradientes térmicos obtidos.

As análises aqui apresentadas compreendem o efeito da troca térmica entre um PCB e um elemento gerador de calor como é exemplo da resistência elétrica. No entanto, a geometria deste componente não foi tomada como variável, pelo que se sugere, como trabalho futuro, um estudo da influência desta característica do domínio. Paralelamente, poderá ter também interesse analisar o comportamento térmico induzido por uma resistência elétrica numa placa na presença de um elemento dedicado à dissipação de calor no sentido PCB-envolvente.

Bibliografia

- [1] R. PCB, "Rapid PCB," 2014. [Online]. Available: <http://www.rapidpcb.com/history-of-printed-circuit-boards.html>. [Acedido em 15 outubro 2014].
- [2] R. Soares, "Produção de PCB recorrendo a tecnologia laser," Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2011.
- [3] M. MacCallum e A. Edgar, "Concepts of PCB Design," 2014. [Online]. Available: http://www.ami.ac.uk/courses/ami4809_pcd/unit_01/#5. [Acedido em 15 outubro 2014].
- [4] F. Sarvar, N. Poole e P. Witting, "PCB glass-fiber laminates: thermal conductivity measurements and their effect on simulation," *Journal of Electronic Materials*, vol. 19, n.º 12, pp. 1345-1350, 1990.
- [5] R. L. Costa, "Estudo teórico e experimental da condutividade térmica efetiva de placas de circuito impresso para aplicações espaciais," Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil, 2012.
- [6] J. Graebner e K. Azar, "Thermal Conductivity Measurements in Printed Wired Boards," *Journal of Heat Transfer*, vol. 119, n.º 3, pp. 401-405, 1997.
- [7] P. Teerstra, J. Culham e M. Yovanovich, "An Investigation Relationship between Packing Density and Effective Thermal Conductivity in Laminated Printed Circuit Boards," *XXth International Electronic Packaging Society, San Diego*, 1995.
- [8] M. Rencz e V. Szekely, "Dynamic thermal multiport modeling of IC packages," *Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions*, vol. 24, n.º 4, pp. 596-604, 2002.
- [9] Y. Koito, Y. Kubo e T. Tomimura, "Numerical Analysis of Printed Circuit Board with Thermal Vias: Heat Transfer Characteristics under Nonisothermal Boundary Conditions," *Journal of Electronics Cooling and Thermal Control*, 2013.
- [10] V. Manno, N. Kurita e K. Azar, "Experimental characterization of board conduction sheets," em

Bibliografia

Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 1993.

- [11] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman e A. S. Lavine, Fundamentos de Transferência de calor e de massa, Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- [12] H. K. Versteeg e W. Malalasekera, An introduction to Computacional Fluid Dynamics - The finite volume method, Longman Scientific & Technical, 1995.
- [13] J. H. Ferziger e M. Peric, Computational Methods for Fluid Dynamics, Springer-Verlag Berlim Heidelberg New York, 2002.
- [14] R. Eymard, T. Gallouët e R. Herbin, The Finite Volume Method in Ph. Ciarlet and J.L. Lions (eds.), Handbook of Numerical Analysis, North-Holland, 2000.
- [15] C. Johnson, Numerical Solution of Partial Differential Equations by the Finite Element Method, Dover Publications, 2009.
- [16] R. J. LeVeque, Finite Difference Methods for Ordinary and Partial Differential Equations, Philadelphia: SIAM, 2007.
- [17] FLUENT, Ansys Fluent User's Guide, Fluent Inc., 2013.
- [18] FLUENT, Ansys Fluent Theory Guide, Fluent Inc., 2009.
- [19] S. V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, New York: Hemisphere Publishing, 1980.
- [20] J. Blazek, Computational fluid dynamics: principles and applications, Elsevier Science, 2001.
- [21] Y. Cengel e A. Ghajar, Transferência de calor e massa, McGraw-Hill, Inc., 2001.
- [22] B. Massey, Mechanics of Fluids, 8^a ed., Taylor & Francis, 2006.
- [23] D. Pinjala, M. Iyer, C. S. Guan e I. Rasiah, "Thermal characterization of vias using compact models," em *Electronics Packaging Technology Conference, (EPTC 2000). Proceedings of 3rd*, 2000.
- [24] J. C. Teixeira, "Correlações em transferência de calor," Universidade do Minho, 2011.
- [25] Y. Zhang e P. Bagnoli, "A modeling methodology for thermal analysis of the PCB structure," *Microelectronics Journal*, vol. 45, pp. 1033-1052, 2014.

Bibliografia

- [26] B. Blackmore, J. Parry e R. Bornoff, "PCB thermal design developments," *Printed Circuit Design and Fab/Circuits Assembly*, vol. 27, pp. 30-32, 2010.
- [27] J. M. A. Lopes, "Guia para elaboração de placas de circuito impresso," Centro de Competência de Ciências Exactas e da Engenharia, Universidade da Madeira.
- [28] G. Leonida, *Handbook of Printed Circuit Design, Manufacture, Components and Assembly*, Escócia: Electrochemical Publications Ltd.
- [29] T. Lemczyk, B. Mack, J. Culham e M. Yovanovich, "PCB Trace Thermal Analysis and Effective Conductivity," em *SEMI-THERM VII. Proceedings., Seventh Annual IEEE.*, 1991.
- [30] Q. Luo, S. Zhang e X. Zhang, "Study on the influence of temperature and stress field to PCB's modal," *Applied Mechanics and Materials*, Vols. %1 de %2271-272, pp. 1441-1445, 2013.
- [31] W. Nakayama, "Heat Conduction in Printed Circuit Boards: a Mesoscale Modeling Approach," em *International Conference on Thermal Issues in Emerging Technologies; Theory and Application*, 2007.
- [32] Y. Zhan e A. Sapatnekar, "A High Efficiency Full-chip Thermal Simulation Algorithm," *International Conference on Computer-Aided Design*, pp. 635-638, 2005.
- [33] E. P. S. Bob Willis, "Basic Printed Circuit Board Manufacture," 2014. [Online]. Available: <http://www.smartgroup.org/downloads/Basic%20PCB%20Manufacture.pdf>. [Acedido em 15 outubro 2014].