



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2012/02.15.18.37-TDI

**ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DA  
CONDUTIVIDADE TÉRMICA EFETIVA DE PLACAS  
DE CIRCUITO IMPRESSO PARA APLICAÇÕES  
ESPACIAIS**

Rafael Lopes Costa

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Mecânica Espacial e Controle, orientada pelo Dr. Valeri Vlassov Vladimirovich, aprovada em 28 de fevereiro de 2012.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3BCD7Q8>>

INPE  
São José dos Campos  
2012

## **PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

## **CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):**

### **Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **Membros:**

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr<sup>a</sup> Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

### **BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Deicy Farabello - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

### **REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Vivéca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2012/02.15.18.37-TDI

**ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DA  
CONDUTIVIDADE TÉRMICA EFETIVA DE PLACAS  
DE CIRCUITO IMPRESSO PARA APLICAÇÕES  
ESPACIAIS**

Rafael Lopes Costa

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Mecânica Espacial e Controle, orientada pelo Dr. Valeri Vlassov Vladimirovich, aprovada em 28 de fevereiro de 2012.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3BCD7Q8>

INPE  
São José dos Campos  
2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Costa, Rafael Lopes.

C823e      Estudo teórico e experimental da condutividade térmica efetiva de placas de circuito impresso para aplicações espaciais / Rafael Lopes Costa. – São José dos Campos : INPE, 2012.

xxvi + 221 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/02.15.18.37-TDI)

Dissertação (Mestrado em Mecânica Espacial e Controle) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.

Orientador : Dr. Valeri Vlassov Vladimirovich.

1. placas de circuito impresso. 2. projeto térmico. 3. condutividade térmica. I.Título.

CDU 629.783

---

Copyright © 2012 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2012 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

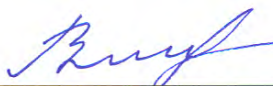
Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de Mestre em  
Engenharia e Tecnologia Espaciais/Mecânica  
Espacial e Controle

Dr. Issamu Muraoka



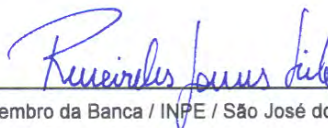
Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. Valeri Vlassov Vladimirovich



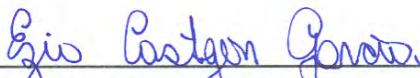
Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

Dra. Rosângela Meireles Gomes de Leite



Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Ézio Castejon Garcia



Convidado(a) / ITA / São José dos Campos - SP

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples

unanimidade

Aluno (a): Rafael Lopes Costa

São José dos Campos, 28 de fevereiro de 2012

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente gostaria de agradecer ao meu orientador Prof. Valeri Vlassov pelo apoio e motivação, ainda por tornar possível a execução deste trabalho. Agradecimento especial a meus pais e à minha esposa Fernanda pelo apoio e compreensão em todas as horas. Agradecimentos à CAPES pela concessão da bolsa e ao INPE pela infraestrutura fundamental para a pesquisa. Agradeço também aos meus amigos e colegas Batista, Gitsuzo, Jorge, Olga e Pedrinho pela amizade e auxílio técnico.



## RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia baseada em testes experimentais e simulação numérica para determinação da condutividade térmica efetiva de placas de circuito impresso (PCBs) multicamadas utilizadas em equipamentos de uso aeroespacial. Testes experimentais de três tipos são realizados: regime permanente em ambiente convectivo, regime transiente em ambiente convectivo e regime transiente em vácuo. Expressões adaptadas com fatores de ajuste experimentais são propostas para o cálculo das condutividades térmicas efetivas anisotrópicas  $k_{p,eff}$  e  $k_{s,eff}$ , assim como suas faixas de incerteza. Um total de 88 modelos numéricos de 11 PCBs são criados usando o pacote comercial SINDA/FLUINT. Estes modelos numéricos, que representam a configuração dos experimentos, são usados para identificação dos valores de condutividades térmicas efetivas em todos os casos de testes. Estudos numéricos confirmam a estabilidade dos resultados em função de parâmetros de malha e escolha de métodos numéricos em conjunto com seus critérios de convergência. Para o cálculo da condutividade térmica efetiva isotrópica  $k_{eff}$ , um estudo sobre a melhor maneira de combinar  $k_{p,eff}$  e  $k_{s,eff}$  é realizado e uma metodologia de cálculo é proposta. Médias ponderadas propostas oferecem expressões para condutividade térmica efetiva com muito mais precisão e menor variação quando comparadas com as médias canônicas simples. São levantadas e avaliadas quantitativamente as incertezas intrínsecas de valores de condutividades efetivas devido à irregularidade na distribuição das trilhas nas camadas condutivas de PCBs. Um teste separado de imageamento infravermelho é realizado para confirmar esta incerteza. Por fim, um guia prático para projetistas térmicos de equipamentos eletrônicos para utilização da metodologia desenvolvida neste trabalho é criado com recomendações e tratamento das incertezas envolvidas.





# THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECTIVE THERMAL CONDUCTIVITY OF PRINTED CIRCUIT BOARDS FOR SPACE APPLICATIONS

## ABSTRACT

This work presents a method based in experimental tests and numerical simulation for the effective thermal conductivity of multi-layer printed circuit boards (PCBs) for aerospace use. Three different types of experimental tests are performed, including steady state with natural convection, transient with natural convection and transient in vacuum. Upgraded expressions with experimentally fitted factors are proposed for calculating the anisotropic effective thermal conductivities  $k_{p,eff}$  and  $k_{s,eff}$  as well as their uncertainty ranges. A total of 88 different numerical models of 11 PCBs are developed using the commercial software SINDA/FLUINT. These models, which represent the same setup conditions of the experimental tests are used to identify the thermal effective conductivity values for all test cases. Numerical investigations are conducted to confirm the results stability as a function of mesh parameters and choice of numerical methods with their convergence criteria. In order to calculate the isotropic effective thermal conductivity  $k_{eff}$ , an investigation about the  $k_{p,eff}$  and  $k_{s,eff}$  best combination are conducted and a calculation method is proposed. The weighted means provide much more accurate  $k_{eff}$  expressions with less variation compared to simplified canonical means. The intrinsic uncertainties of the  $k_{eff}$  values caused by the irregular distribution of the conductive traces are evaluated in a quantitative way. An infrared imaging test is performed to corroborate such uncertainties. Finally, a practical guide for electronic thermal designers is elaborated and explains in detail how to use the methods developed in this research as well as recommendations about the main uncertainties involved.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 - Localização das trilhas no modelo da PCB.....	11
Figura 2.2 – Configuração da PCB com 3 camadas. ....	12
Figura 2.3 – Configuração da placa e do aquecedor usados no estudo. ....	13
Figura 2.4 – Diferentes configurações estudadas e seus resultados. ....	15
Figura 2.5 – Packages (4) e PCBs (6) testados .....	16
Figura 2.6 – Configuração da placa de estudo e resultados da simulação. ....	17
Figura 2.7 – Resultados da simulação para o modelo multi-camadas e o simplificado.....	18
Figura 4.1 – Simulação do estudo dos nós no sentido z. ....	30
Figura 4.2 - Gráfico da temperatura pelo número de nós na direção z. ....	32
Figura 4.3 – Campo de temperaturas gerado pela simulação de estudo da divisão nodal no plano da PCB. ....	34
Figura 4.4 – Gráfico da temperatura pelo número de nós em x e y. ....	35
Figura 4.5 – Modelo detalhado de uma PCB de 6 camadas. ....	37
Figura 4.6 – Campos de temperaturas no modelo detalhado.....	37
Figura 4.7 – Modelo simplificado isotrópico de uma PCB de 6 camadas. ....	38
Figura 4.8 - Campos de temperaturas em um modelo simplificado isotrópico. ....	39
Figura 4.9 - Campos de temperaturas em um modelo simplificado anisotrópico. ....	40
Figura 4.10 – Modelos simplificado isotrópico e detalhado apresentando os resultados da simulação.....	41
Figura 4.11 – Fotos reais das superfícies externas da PCB_01 usada no ajuste. ....	44
Figura 4.12 – Desenho das camadas de cobre da PCB_01. ....	45
Figura 4.13 – 13 posições em que o elemento (com 3 tamanhos) foi colocado. ....	47
Figura 4.14 - Ajuste da $k_{eff}$ pela posição horizontal do elemento dissipativo (eixo vertical no grafico - é condutividade efetiva, W/mK; eixo horizontal - posição relativa, m).....	48
Figura 5.1 – Fios de cobre e constantan para confecção de termopares do tipo T e equipamento de solda.....	54
Figura 5.2 – Confecção de termopar do tipo T. ....	55
Figura 5.3 – Imagem do teste de ajuste com placa de alumínio 5052. ....	57
Figura 5.4 – Esquema de montagem do aquecedor elétrico.....	58
Figura 5.5 – Temperaturas do teste experimental transiente com placa de Al 5052. ....	59
Figura 5.6 – Temperaturas do ajuste com simulação do modelo numérico da placa de Al 5052.....	60
Figura 5.7 – Gráfico das derivadas das curvas de temperaturas em regime de resfriamento. ....	61
Figura 5.8 – Configuração do teste para medir a condutividade do EPS. ....	62

Figura 5.9 – Imagem do aparato de teste para determinação da condutividade do EPS. ....	64
Figura 5.10 – Esquema do teste em regime permanente em ambiente convectivo. ....	66
Figura 5.11 – Configuração do teste em regime permanente em ambiente convectivo. ....	67
Figura 5.12 - Esquema do teste transiente em ambiente convectivo. ....	68
Figura 5.13 – Configuração do teste transiente em ambiente convectivo. ....	69
Figura 5.14 – PCB coberta com fita kapton® e fita de alumínio. ....	70
Figura 5.15 – Esquema do teste transiente em vácuo. ....	71
Figura 5.16 – Configuração do teste transiente em vácuo. ....	72
Figura 6.1 – Esquema de posicionamento da PCB_01 – posição 1. ....	78
Figura 6.2 – Esquema de posicionamento da PCB_01 – posição 2. ....	78
Figura 6.3 – Esquema de posicionamento da PCB_01 – posição 3. ....	79
Figura 6.4 – Curvas de temperatura do teste em regime transiente da PCB_01 com aquecedor na posição 1. ....	82
Figura 6.5 – Curvas de temperatura do teste em regime transiente da PCB_01 com aquecedor na posição 2. ....	82
Figura 6.6 – Curvas de temperatura do teste em regime transiente da PCB_01 com aquecedor na posição 3. ....	83
Figura 6.7 – Curvas de temperatura do teste em regime transiente da PCB_02 com aquecedor na posição 1. ....	83
Figura 6.8 – Curvas de temperatura do teste em regime transiente da PCB_02 com aquecedor na posição 2. ....	84
Figura 6.9 – Curvas de temperatura do teste em regime transiente da PCB_03 com aquecedor na posição 3. ....	84
Figura 7.1 – Esquema da construção do aquecedor utilizado no modelo. ....	89
Figura 7.2 – Ilustração do modelo para simulação em regime permanente. ....	90
Figura 7.3 – Ilustração do modelo para simulação em regime transiente. ....	92
Figura 7.4 – Fluxograma de ajuste para condutividades anisotrópicas. ....	99
Figura 7.5 – Curvas de temperatura do teste com fita de Kapton® e Al e 1 W no aquecedor. ....	107
Figura 7.6 – Curvas de temperatura do teste em vácuo com isolamento de Kapton® e Al e 1 W de potência. ....	108
Figura 7.7 – Curvas de temperatura do teste em vácuo com isolamento de MLI e 1 W de potência. ....	108
Figura 7.8 - Curvas de temperatura do teste em vácuo com isolamento de MLI e 2 W de potência. ....	109
Figura 7.9 – Campo de temperaturas gerado pela simulação com dissipação de 2 W. ....	110
Figura 8.1 - Distribuição normal dos valores calculados de $\xi$ . ....	120
Figura 8.2 – Distribuição normal dos valores calculados de $\zeta$ . ....	122
Figura 10.1 – Câmera de infravermelhos ThermaCAM SC640 utilizada nos testes. ....	142
Figura 10.2 – PCB_12 durante o teste de imageamento infravermelho. ....	143

Figura 10.3 – Imagem infravermelha da PCB_12 de 2 camadas com círculo simétrico a fonte de calor, mostrando as temperaturas máxima e mínima no seu perímetro.....	145
Figura 10.4 - Imagem infravermelha da PCB_08 de 6 camadas com círculo simétrico a fonte de calor, mostrando as temperaturas máxima e mínima no seu perímetro.....	146
Figura 10.5 - Tendência de redução da faixa de incerteza versus número de camadas na placa.....	147
Figura 10.6 - Campo de temperaturas gerado pela simulação para a PCB_08 de 6 camadas.....	148
Figura A.1 – Imagem real da PCB_01.....	161
Figura A.2 – Imagem real da PCB_02.....	162
Figura A.3 – Imagem real da PCB_03.....	163
Figura A.4 – Imagem real da PCB_04.....	164
Figura A.5 – Imagem real da PCB_05.....	165
Figura A.6 – Imagem real da PCB_06.....	166
Figura A.7 – Imagem real da PCB_07.....	168
Figura A.8 – Imagem real da PCB_08.....	169
Figura A.9 – Imagem real da PCB_09.....	170
Figura A.10 – Imagem real da PCB_10.....	171
Figura A.11 – Imagem real da PCB_11.....	172
Figura D.1 - Curvas de temperatura da PCB_01 com aquecedor na posição 1. ....	183
Figura D.2 - Curvas de temperatura da PCB_01 com aquecedor na posição 2. ....	184
Figura D.3 - Curvas de temperatura da PCB_01 com aquecedor na posição 3. ....	185
Figura D.4 - Curvas de temperatura da PCB_02 com aquecedor na posição 1. ....	185
Figura D.5 Curvas de temperatura da PCB_02 com aquecedor na posição 2. ....	186
Figura D.6 - Curvas de temperatura da PCB_02 com aquecedor na posição 3. ....	186
Figura D.7 - Curvas de temperatura da PCB_03 com aquecedor na posição 1. ....	187
Figura D.8 - Curvas de temperatura da PCB_03 com aquecedor na posição 2. ....	187
Figura D.9 - Curvas de temperatura da PCB_03 com aquecedor na posição 3. ....	188
Figura D.10 - Curvas de temperatura da PCB_02 com aquecedor na posição 1. ....	188
Figura D.11 - Curvas de temperatura da PCB_04 com aquecedor na posição 2. ....	189
Figura D.12 - Curvas de temperatura da PCB_04 com aquecedor na posição 3. ....	189

Figura D.13 - Curvas de temperatura da PCB_05 com aquecedor na posição 1.	190
Figura D.14 - Curvas de temperatura da PCB_05 com aquecedor na posição 2.	190
Figura D.15 - Curvas de temperatura da PCB_05 com aquecedor na posição 3.	191
Figura D.16 - Curvas de temperatura da PCB_06 com aquecedor na posição 1.	191
Figura D.17 - Curvas de temperatura da PCB_06 com aquecedor na posição 2.	192
Figura D.18 - Curvas de temperatura da PCB_06 com aquecedor na posição 3.	192
Figura D.19 - Curvas de temperatura da PCB_07 com aquecedor na posição 1.	193
Figura D.20 - Curvas de temperatura da PCB_07 com aquecedor na posição 2.	193
Figura D.21 - Curvas de temperatura da PCB_07 com aquecedor na posição 3.	194
Figura D.22 - Curvas de temperatura da PCB_08 com aquecedor na posição 1.	194
Figura D.23 - Curvas de temperatura da PCB_08 com aquecedor na posição 2.	195
Figura D.24 - Curvas de temperatura da PCB_08 com aquecedor na posição 3.	195
Figura D.25 - Curvas de temperatura da PCB_09 com aquecedor na posição 1.	196
Figura D.26 - Curvas de temperatura da PCB_09 com aquecedor na posição 2.	196
Figura D.27 - Curvas de temperatura da PCB_09 com aquecedor na posição 3.	197
Figura D.28 - Curvas de temperatura da PCB_10 com aquecedor na posição 1.	197
Figura D.29 – Curvas de temperatura da PCB_10 com aquecedor na posição 2.	198
Figura D.30 – Curvas de temperatura da PCB_10 com aquecedor na posição 3.	198
Figura D.31 - Curvas de temperatura da PCB_11 com aquecedor na posição 1.	199
Figura D.32 - Curvas de temperatura da PCB_11 com aquecedor na posição 2.	199
Figura D.33 - Curvas de temperatura da PCB_11 com aquecedor na posição 3.	200

## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 – Valores de $k_{FR4}$ disponíveis na bibliografia.....	10
Tabela 3.1 - Cálculo da densidade efetiva das PCBs. ....	22
Tabela 3.2 – Calor específico efetivo e capacidade térmica das PCBs. ....	23
Tabela 3.3 – Área e percentagem de metelização de furos passantes nas PCBs testadas.....	24
Tabela 3.4 – Cálculo das condutividades através dos métodos analíticos simplificados.....	28
Tabela 4.1 – Resultado do estudo do número de nós na direção transversal..	31
Tabela 4.2 - Resultados do estudo da divisão nodal no plano da PCB.....	35
Tabela 4.3 – Material e espessura (mm) dos 5 casos reproduzidos. ....	42
Tabela 4.4 – Tabela comparativa dos resultados obtidos por Culham et al. (2000) e pela simulação.....	42
Tabela 4.5 – Composição das camadas do modelo detalhado.....	46
Tabela 4.6 – Resultado do ajuste de $k_{eff}$ para as 13 posições. ....	47
Tabela 4.7 – Resultados para todas as posições variando o tamanho do componente.....	49
Tabela 5.1 – Temperaturas medidas.....	62
Tabela 6.1 – Posicionamento do aquecedor e termopares na PCB_01 (coordenadas em metro). ....	77
Tabela 6.2 – Temperaturas medidas em testes de regime permanente .....	80
Tabela 7.1 – Valores ajustados para PCB_01.....	101
Tabela 7.2 – Valores ajustados para PCB_02.....	102
Tabela 7.3 – Valores ajustados para PCB_03.....	102
Tabela 7.4 – Valores ajustados para PCB_04.....	103
Tabela 7.5 – Valores ajustados para PCB_05.....	103
Tabela 7.6 – Valores ajustados para PCB_06.....	104
Tabela 7.7 – Valores ajustados para PCB_07.....	104
Tabela 7.8 – Valores ajustados para PCB_08.....	105
Tabela 7.9 – Valores ajustados para PCB_09.....	105
Tabela 7.10 – Valores ajustados para PCB_10.....	106
Tabela 7.11 – Valores ajustados para PCB_11.....	106
Tabela 7.12 – Ajuste de $k_{eff}$ para testes no vácuo para isolamento com fitas de .....	111
Tabela 7.13 - Médias e desvios padrões dos valores ajustados de $k_{eff}$ , $k_{p,eff}$ e $k_{s,eff}$ .....	112
Tabela 8.1 – Resultados do cálculo dos valores do fator $\xi$ . ....	119
Tabela 8.2 – Resultados do cálculo dos valores do fator $\zeta$ .....	121
Tabela 9.1 – Valores de $\alpha$ e $\beta$ para equação da Média Aritmética Ponderada. ....	127
Tabela 9.2 - Resultados do cálculo de $k_{eff}$ com o uso da MAP para o grupo de placas de 2 camadas. ....	128



Tabela 9.3 – Resultados do cálculo de $k_{eff}$ com o uso da MAP para o grupo de placas de 6 camadas. ....	128
Tabela 9.4 – Resultados do cálculo de $k_{eff}$ com o uso da MAP para o grupo de todas as placas. ....	129
Tabela 9.5 – Valores de $\alpha$ e $\beta$ para equação da Média Geométrica Ponderada. ....	131
Tabela 9.6 – Resultados do cálculo de $k_{eff}$ com o uso da MGP para o grupo de placas de 2 camadas. ....	132
Tabela 9.7 – Resultados do cálculo de $k_{eff}$ com o uso da MGP para o grupo de placas de 6 camadas. ....	132
Tabela 9.8 – Resultados do cálculo de $k_{eff}$ com o uso da MGP para o grupo de todas as placas. ....	133
Tabela 9.9 – Valores de $\alpha$ e $\beta$ para equação da Média Harmônica Ponderada. ....	136
Tabela 9.10 – Resultados do cálculo de $k_{eff}$ com o uso da MHP para o grupo de placas de 2 camadas. ....	136
Tabela 9.11 – Resultados do cálculo de $k_{eff}$ com o uso da MHP para o grupo de placas de 6 camadas. ....	137
Tabela 9.12 – Resultados do cálculo de $k_{eff}$ com o uso da MHP para o grupo de todas as placas. ....	138
Tabela 9.13 – Desvio médio dos valores de $k_{eff}$ experimentais e calculados através das médias. ....	139
Tabela 9.14 – Exemplo de comparação dos resultados obtidos com diferentes métodos para a PCB_11. ....	140
Tabela A.1 - Propriedades da PCB_01. ....	162
Tabela A.2 - Propriedades da PCB_02. ....	163
Tabela A.3 - Propriedades da PCB_03. ....	164
Tabela A.4 - Propriedades da PCB_04. ....	165
Tabela A.5 - Propriedades da PCB_05. ....	166
Tabela A.6 - Propriedades da PCB_06. ....	167
Tabela A.7 - Propriedades da PCB_07. ....	168
Tabela A.8 - Propriedades da PCB_08. ....	169
Tabela A.9 - Propriedades da PCB_09. ....	170
Tabela A.10 - Propriedades da PCB_10. ....	171
Tabela A.11 - Propriedades da PCB_11. ....	172
Tabela B.1 – Informações dos furos metalizados da PCB_01. ....	173
Tabela B.2 - Informações dos furos metalizados da PCB_02. ....	173
Tabela B.3 - Informações dos furos metalizados da PCB_03. ....	173
Tabela B.4 - Informações dos furos metalizados da PCB_04. ....	174
Tabela B.5 - Informações dos furos metalizados da PCB_05. ....	174
Tabela B.6 - Informações dos furos metalizados da PCB_06. ....	174
Tabela B.7 - Informações dos furos metalizados da PCB_07. ....	174
Tabela B.8 - Informações dos furos metalizados da PCB_08. ....	175
Tabela B.9 - Informações dos furos metalizados da PCB_09. ....	175
Tabela B.10 - Informações dos furos metalizados da PCB_10. ....	176
Tabela B.11 - Informações dos furos metalizados da PCB_11. ....	176

Tabela C.1 – Posicionamento do aquecedor e termopares na PCB_01. ....	177
Tabela C.2 – Posicionamento do aquecedor e termopares na PCB_02. ....	177
Tabela C.3 – Posicionamento do aquecedor e termopares na PCB_03. ....	178
Tabela C.4 – Posicionamento do aquecedor e termopares na PCB_04. ....	178
Tabela C.5 – Posicionamento do aquecedor e termopares na PCB_05. ....	179
Tabela C.6 – Posicionamento do aquecedor e termopares na PCB_06. ....	179
Tabela C.7 – Posicionamento do aquecedor e termopares na PCB_07. ....	180
Tabela C.8 – Posicionamento do aquecedor e termopares na PCB_08. ....	180
Tabela C.9 – Posicionamento do aquecedor e termopares na PCB_09. ....	181
Tabela C.10 – Posicionamento do aquecedor e termopares na PCB_10. ....	181
Tabela C.11 - Posicionamento do aquecedor e termopares na PCB_11. ....	182



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
PCB	Printed Circuit Board (Placa de Circuito Impresso)
EPS	Expanded Polystirene (Isopor®)
TCS	Thermal Control Subsystem (Subsistema de Controle Térmico)
MAP	Média Aritmética Ponderada
MGP	Média Geométrica Ponderada
MHP	Média Harmônica Ponderada
MA	Média Aritmética
MG	Média Geométrica
MH	Média Harmônica
AWG	American Wire Gauge



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$	Peso atribuído a $k_{p,eff}$
$\beta$	Peso atribuído a $k_{s,eff}$
$\zeta$	Fator de ajuste devido a influência de furos metalizados
$\xi$	Fator de ajuste devido a irregularidade nas trilhas condutoras
$\rho$	Densidade, $\text{kg/m}^3$
$\tau_0$	Tempo de início de processo em regime transiente, s
$c_p$	Calor específico, $\text{J/kg}^\circ\text{C}$
$D_{h,i}$	Diâmetro do furo passante metalizado, m
$f_a$	Fator de porcentagem de área coberta por cobre para camadas condutivas, ou $f_a=1$ para camadas de FR4
$f_h$	Fator de porcentagem de área coberta metalização de furos
$k_{Cu}$	Condutividade térmica do cobre, $\text{W/m}^\circ\text{C}$
$k_{eff}$	Condutividade térmica efetiva isotrópica, $\text{W/m}^\circ\text{C}$
$k_{FR4}$	Condutividade térmica do FR4, $\text{W/m}^\circ\text{C}$
$k_{ft,i}$	Condutividade térmica efetiva do pé do componente eletrônico, $\text{W/m}^\circ\text{C}$
$k_p$	Condutividade térmica no plano, $\text{W/m}^\circ\text{C}$
$k_{p,eff}$	Condutividade térmica efetiva no plano, $\text{W/m}^\circ\text{C}$
$k_s$	Condutividade térmica transversal, $\text{W/m}^\circ\text{C}$
$k_{s,eff}$	Condutividade térmica efetiva transversal, $\text{W/m}^\circ\text{C}$
$k_{sp}$	Condutividade térmica série-paralelo, $\text{W/m}^\circ\text{C}$
$L$	Espessura, m
$N_\tau$	Número de amostragens
$N_{TC}$	Número de termopares
$N_x$	Número de nós na direção x
$N_{xy}$	Número de nós no plano xy
$N_y$	Número de nós na direção y
$N_z$	Número de nós na direção z
$T_{cd}$	Temperatura do componente no modelo detalhado, $^\circ\text{C}$

$T_{cs}$	Temperatura do componente no modelo simplificado, °C
$t_{Cu}$	Espessura da camada de cobre, m
$t_{FR4}$	Espessura total das camadas de FR4, m
$t_i$	Espessura de camada, seja FR4 ou condutiva, m
$T_{m,i}$	Temperatura obtida no modelo no mesmo local do termopar, °C
$t_{PCB}$	Espessura da PCB, m
$T_{x,i}$	Temperatura medida no experimento, °C

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. Propriedade térmicas de placas de circuito impresso .....	1
1.2. Motivação e contribuição do trabalho proposto .....	5
1.3. Objetivos do trabalho.....	7
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>9</b>
<b>3 LEVANTAMENTO DAS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS BÁSICAS DAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO.....</b>	<b>21</b>
3.1. Propriedades das camadas das PCBs.....	21
3.2. Densidade Efetiva e Capacidade Térmica das PCBs.....	22
3.3. Características de furação das PCBs.....	23
3.4. Cálculo de condutividades canônicas de PCBs .....	24
<b>4 DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA EFETIVA DE PCBs ATRAVÉS DE MÉTODOS NUMÉRICOS .....</b>	<b>29</b>
4.1. Estudo da divisão nodal no sentido normal a PCB.....	29
4.2. Estudo da divisão nodal no plano da PCB .....	33
4.3. Simulação numérica das PCBs utilizando o programa SINDA/FLUINT Thermal Desktop® .....	36
4.3.1. Modelo detalhado .....	36
4.3.2. Modelo simplificado isotrópico.....	38
4.3.3. Modelo simplificado anisotrópico.....	39
4.4. Validação qualitativa do modelo numérico detalhado.....	40
4.5. Identificação da condutividade térmica efetiva para um modelo simplificado utilizando um modelo detalhado .....	43
4.6. Estudo da influência de tamanho de componente.....	49
4.7. Estudos adicionais de influência de parâmetros numéricos de simulação .....	50
<b>5 CONFIGURAÇÃO DOS TESTES EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>53</b>
5.1. Confecção de tempopares do tipo T.....	53
5.2. Ajustes de convecção e contatos com placa de Al 5052.....	55
5.2.1. Ajuste para teste em regime permanente.....	55
5.2.2. Ajuste para testes em regime transiente .....	58
5.3. Medida da condutividade térmica do poliestireno expandido (Isopor®) utilizado nos testes.....	61
5.4. Testes de PCBs em regime permanente em ambiente convectivo ...	65



5.5.	Testes de PCBs transiente em ambiente convectivo .....	67
5.6.	Teste de PCBs transiente em ambiente de vácuo .....	69
<b>6</b>	<b>AQUISIÇÃO DE DADOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>73</b>
6.1.	Incertezas consideradas na escolha do método experimental.....	73
6.1.1.	<i>Incertezas no método em regime permanente em ambiente convectivo .....</i>	<i>73</i>
6.1.2.	<i>Incertezas no método transiente em ambiente convectivo.....</i>	<i>74</i>
6.1.3.	<i>Incertezas no método transiente em vácuo.....</i>	<i>75</i>
6.1.4.	<i>Justificativa da escolha do método experimental mais utilizado no ajuste</i>	<i>75</i>
6.2.	Procedimento dos testes experimentais – posicionamento de aquecedor e sensores.....	76
6.3.	Apresentação dos dados de temperatura obtidos nos testes experimentais .....	79
6.4.	Avaliação qualitativa dos resultados.....	85
<b>7</b>	<b>DETERMINAÇÃO DE CONDUTIVIDADES TÉRMICAS EFETIVAS ISOTRÓPICA E ANISOTRÓPICA DAS PCBs A PARTIR DE DADOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>87</b>
7.1.	Descrição dos modelos numéricos utilizados no ajuste.....	87
7.1.1.	<i>Modelos para simulação dos experimentos em regime permanente .....</i>	<i>87</i>
7.1.2.	<i>Modelo para simulação dos experimentos em regime transiente</i>	<i>91</i>
7.2.	Ajuste da condutividade térmica do FR4 para grupo de PCBs de mesmo fabricante.....	93
7.3.	Descrição do método e procedimento de ajuste de $k_{p,eff}$ , $k_{s,eff}$ e $k_{eff}$ .	96
7.3.1.	<i>Ajuste para método em regime permanente .....</i>	<i>97</i>
7.3.2.	<i>Ajuste para método em regime transiente.....</i>	<i>100</i>
7.4.	Resultados dos valores ajustados.....	101
7.5.	Teste comparativo em vácuo .....	106
7.6.	Análise dos resultados .....	111
<b>8</b>	<b>AJUSTE DE FATORES EM EXPRESSÕES PARA CÁLCULO DE CONDUTIVIDADES TÉRMICAS EFETIVAS ANISOTRÓPICAS.....</b>	<b>115</b>
8.1.	Expressão de $k_{p,eff}$ com fator de ajuste $\xi$ .....	115
8.2.	Expressão de $k_{s,eff}$ com fator de ajuste $\zeta$ .....	116
8.3.	Resultado do ajuste de $\xi$ e $\zeta$ e suas faixas de incerteza .....	118
<b>9</b>	<b>CÁLCULO DA CONDUTIVIDADE EFETIVA ISOTRÓPICA A PARTIR DAS CONDUTIVIDADES EFETIVAS ANISOTRÓPICAS .....</b>	<b>125</b>
9.1.	Média Aritmética Ponderada.....	125
9.2.	Média Geométrica Poderada.....	130

9.3.	Média Harmônica Ponderada.....	134
9.4.	Escolha da melhor média ponderada.....	139
<b>10</b>	<b>ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS TRILHAS CONDUTORAS NO CAMPO DE TEMPERATURAS ATRAVÉS DE IMAGENS OBTIDAS COM CÂMERA INFRAVERMELHA .....</b>	<b>141</b>
10.1.	Configuração e equipamento do teste.....	141
10.2.	Resultados de estimativa da faixa de incerteza na identificação da condutividade térmica devido a irregularidade na distribuição das trilhas condutivas.....	144
10.3.	Comparação com modelo numérico e estimativa da faixa de incerteza adicional da condutividade efetiva.....	147
<b>11</b>	<b>GUIA PRÁTICO PARA DETERMINAÇÃO DAS CONDUTIVIDADES EFETIVAS EM PCBs.....</b>	<b>149</b>
11.1	Dados necessários.....	149
11.2.	Cálculo das condutividades térmicas efetivas anisotrópicas .....	150
11.3.	Cálculo da condutividade térmica isotrópica .....	152
11.4.	Uso das condutividade térmicas efetivas em projetos térmicos .....	153
<b>12</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>155</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>157</b>
	<b>APÊNDICE A – PROPRIEDADES TÉRMICAS BÁSICAS DAS PLACAS TESTADAS.....</b>	<b>161</b>
	<b>APÊNDICE B – PROPRIEDADES DE FURAÇÃO DAS PLACAS .....</b>	<b>173</b>
	<b>APÊNDICE C – POSICIONAMENTO DE SENSORES E AQUECEDOR.....</b>	<b>177</b>
	<b>APÊNDICE D – GRÁFICOS DE TEMPERATURAS DOS TESTES.....</b>	<b>183</b>
	<b>ANEXO A – PUBLICAÇÕES.....</b>	<b>201</b>
A.1	WETE 2011 – 2º Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais ...	201
A.2	DINCON 2011 – 10ª Conferência Brasileira de Dinâmica, Controle e Aplicações.....	207
A.3	COBEM 2011 – 21 <sup>st</sup> International Congress of Mechanical Engineering	



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1. Propriedade térmicas de placas de circuito impresso

A confiabilidade de componentes eletrônicos é fortemente relacionada a sua temperatura de operação. Segundo Remsburg (2001), a taxa de falha do componente aumenta exponencialmente com o aumento de sua temperatura. Quando componentes eletrônicos atingem temperaturas que excedem àquelas especificadas pelas normas aeroespaciais, (ESA-ESTEC, 2008), com limite máximo *derated* de temperatura, o desempenho e vida útil destes componentes são reduzidos significativamente. Se o componente atinge seu limite máximo de temperatura operacional, seja por condições operacionais imprevistas ou por erros no projeto térmico do equipamento eletrônico, as consequências podem ser drásticas, causando até a falha do equipamento, e como consequência, a perda de um subsistema ou até do funcionamento do satélite inteiro.

Nas últimas décadas devido à tendência de redução do tamanho de equipamentos eletrônicos e o aumento da densidade de componentes que dissipam calor em placas de circuito impresso (Printed Circuit Boards – PCBs), o projeto térmico tornou-se uma tarefa mais crítica. Com aumento do número de PCBs por equipamento, assim como o aumento de número de camadas condutivas das PCBs, os equipamentos eletrônicos tornaram-se mais complexos exigindo análises térmicas mais detalhadas.

Nas placas que são usadas em equipamentos para aplicações espaciais, a principal forma de espalhar e rejeitar o calor é por condução térmica ao longo da placa, uma vez que no espaço, em satélites que não são herméticos, não existe ambiente de ar para que técnicas de resfriamento baseadas em convecção sejam aplicadas, tais como dissipadores de calor com aletas e ventiladores para impor convecção forçada nos componentes, (CARCHIA, 2001).

As placas de circuito impresso em equipamentos eletrônicos são fixadas em molduras, que mantêm contato com a caixa do equipamento, a qual é conectada mecânica e termicamente aos painéis da estrutura do satélite, onde a temperatura é mantida pelo Subsistema de Controle Térmico (TCS).

A temperatura no local de montagem do componente é fortemente influenciada pela resistência térmica de contato e pelas propriedades termofísicas da PCB. Termicamente, a PCB é tratada como um material composto, formada por um material dielétrico (usualmente FR4) e por camadas externas e intermediárias com múltiplas trilhas eletricamente condutoras de cobre. O número total de camadas condutoras com trilhas pode variar normalmente de 2 a 6. Além disso, a PCB típica possui vários furos metalizados (centenas ou milhares) que também influem na propriedade térmica efetiva da placa.

A condutividade térmica do FR4 tem valor típico de aproximadamente 0.25 W/mK enquanto a condutividade de cobre é de aproximadamente 400 W/mK. Esta grande diferença nas duas condutividades faz com que as trilhas e a metalização nos furos sejam determinantes no espalhamento do calor na placa e faz com que as propriedades térmicas efetivas da PCB sejam fortemente anisotrópicas. A grande variedade no desenho das trilhas e na porcentagem de área coberta com cobre em cada camada fornecem muita incerteza e complexidade na determinação das propriedades térmicas das placas.

No passado (aproximadamente duas décadas atrás), as PCBs tinham apenas uma ou duas camadas com trilhas de cobre nas superfícies externas, mas tecnologias mais recentes permitiram a confecção de placas bastante complexas com várias camadas intermediárias de cobre. Essa combinação faz com que as propriedades térmicas efetivas das placas sejam ainda de determinação mais complexas.

A temperatura do componente está relacionada a temperatura da PCB no local de montagem, por isso é importante levar em consideração a distribuição de temperaturas ao longo da superfície da PCB durante seu projeto térmico.

O mapa de temperaturas de PCBs pode ser estimado através de métodos numéricos ou analíticos simplificados, (VLASSOV, 2003). Porém, esses métodos são baseados na suposição de que PCBs multicamadas possam ser representadas por uma placa homogênea equivalente com uma certa condutividade térmica efetiva isotrópica  $k_{eff}$  que se for calculada corretamente, permite que esta placa homogênea tenha um comportamento térmico próximo ao da placa multicamadas real a qual possui propriedades anisotrópicas. Neste contexto, o parâmetro  $k_{eff}$  combina influências das camadas condutivas individuais e dos furos metalizados em um único valor que pode ser aplicado como se a placa tivesse uma única camada homogênea, onde sua espessura e área originais são preservadas.

Para calcular o parâmetro  $k_{eff}$  existem várias abordagens simplificadas, baseadas em analogias com sistemas elétricos. Todas são baseadas na combinação de dois parâmetros principais: condutividade térmica no plano da PCB ( $k_p$ , modelo de condução em paralelo) e a através do plano da PCB, ou seja, a condutividade térmica transversal ( $k_s$ , modelo de condução em série). Estes dois valores, por terem características de material com grande anisotropia, são bem diferentes um do outro, e normalmente considerados como os limites inferior ( $k_s$ ) e superior ( $k_p$ ) de condutividade térmica efetiva.

Existem várias abordagens simplificadas que fornecem alguma expressão do tipo  $k_{eff} = f(k_p, k_s)$  para calcular a condutividade térmica efetiva isotrópica a partir de condutividade anisotrópicas.

As abordagens mais usadas, segundo Culham et al. (2000), são média aritmética, média geométrica e média harmônica, mas a diferença entre os valores obtidos pode atingir mais de 10 vezes. Isso reflete uma incerteza na determinação de  $k_{eff}$ , que existe hoje e é considerada inaceitável no cálculo da temperatura dos componentes, considerando-se o alto padrão de confiabilidade requerido e o custo de equipamentos a serem embarcados nos satélites.

Infelizmente até o presente, nenhum dos trabalhos publicados proporciona uma definição clara de um método confiável de como se calcular a  $k_{eff}$  de PCBs.

Recentemente, com o avanço dos programas computacionais especializados em modelamento e simulação térmica, as propriedades anisotrópicas das PCBs podem ser facilmente incluídas no modelo. Neste caso, é necessário inserir os valores das condutividades térmicas efetivas anisotrópicas  $k_{p,eff}$  e  $k_{s,eff}$ . Estas condutividades efetivas anisotrópicas, as quais são funções de  $k_p$  e  $k_s$ , também dependem de parâmetros das PCBs como número de camadas, porcentagem de cobertura de cobre e densidade de furos metalizados. Entretanto, no caso de PCBs não foram realizados estudos para fornecer uma expressão confiável para calcular estes valores efetivos ( $k_{p,eff}$  e  $k_{s,eff}$ ) como funções de todos parâmetros da placa, e também não foram avaliadas as suas faixas de incerteza.

Para evitar estas incertezas, teoricamente é possível tentar criar um modelo da placa altamente detalhado com a introdução das trilhas condutoras a partir do projeto elétrico. Entretanto, a simulação direta de PCBs com modelamento de cada camada se torna inviável para aplicações práticas, uma vez que este detalhamento faz com que o modelo seja muito complexo, o que torna o seu modelamento muito demorado e a simulação exige muito poder computacional, além de muitas horas de um engenheiro para preparar, inserir e verificar dados de entrada para o modelo.

Outro modelo detalhado com simulação direta de cada camada individual, entretanto adotando a suposição de que as camadas condutivas da placa são homogêneas, ou seja, não existe influência da geometria das trilhas, fica um pouco mais simples para aplicação. Entretanto, este modelo exige o conhecimento de propriedades térmicas efetivas das camadas condutivas com trilhas, que já não justifica o uso deste modelo, pois ainda continua bastante complexo e além disso fornece a mesma incerteza que um modelo simplificado anisotrópico.

## 1.2. Motivação e contribuição do trabalho proposto

Todas as publicações que de alguma forma contribuem para este estudo ressaltam a importância de se conhecer a condutividade térmica da PCB, uma vez que este é um parâmetro de grande impacto na temperatura dos componentes eletrônicos, mesmo com resfriamento através de convecção natural ou forçada. Em aplicações espaciais, onde não existe convecção, a condutividade térmica através da placa se torna um fator com impacto muito maior. Portanto, para PCBs que serão utilizadas em aplicações espaciais, é muito desejável que a sua condutividade térmica efetiva seja estimada com bastante precisão, para que se possa prever o seu comportamento térmico. A partir da distribuição de temperatura ao longo da superfície da placa, as temperaturas de todos os componentes eletrônicos podem ser estimadas com relativa facilidade.

As temperaturas dos componentes eletrônicos são muito sensíveis à condutividade térmica efetiva da PCB, no entanto uma metodologia correta e precisa para cálculo deste parâmetro a partir de parâmetros da placa praticamente não existe, assim como também não existem normas ou recomendações certificadas para o seu cálculo. Vários trabalhos publicados fornecem recomendações completamente diferentes com a variação de até 10 vezes no valor de  $k_{eff}$ . Esta incerteza faz com que o projetista térmico siga as abordagens mais conservativas nos projetos (condutividade efetiva mais baixa na PCB), o que por vezes resulta em dificuldades de atender os limites de temperatura especificados pelos fornecedores dos componentes.

A situação se agrava pelo fato das normas aeroespaciais não exigirem testes térmicos específicos de equipamentos eletrônicos para validar o modelo numérico usado no projeto térmico do equipamento. Testes ambientais de qualificação de equipamentos não revelam se as temperaturas nos componentes eletrônicas ultrapassaram ou não os limites "derated"



estabelecidos por requisitos de confiabilidade. Por isso os parâmetros usados no projeto térmico, particularmente as condutividades efetivas de PCBs, devem ser definidos com precisão.

Atualmente, empresas que projetam e fabricam equipamentos eletrônicos, especialmente para uso espacial, fazem a análise térmica das placas de circuito impresso multicamadas com simulações numéricas onde os modelos de PCBs são simplificados. Existem dois tipos de modelo, no primeiro a placa multicamadas é aproximada por uma única camada homogênea, na qual é aplicada uma determinada condutividade térmica isotrópica efetiva  $k_{eff}$ . O segundo tipo é chamado de anisotrópico, onde condutividades diferentes são atribuídas no sentido normal ao plano da placa, ou seja, sentido transversal  $k_s$  e no plano da placa  $k_p$ . Mesmo assim, a definição destes valores, tanto  $k_{eff}$  como  $k_s$  e  $k_p$ , atualmente é bastante simplificada, pois não leva em consideração a porcentagem da área coberta por cobre, variação de densidade e desenho das trilhas, posicionamento de camadas internas e influência de furos metalizados. Como há variações muito grandes nesses valores, o projetista converge para uma abordagem mais conservativa ou então aplica o que julga melhor nas análises térmicas das PCBs.

O presente trabalho propõe a criação de expressões baseadas nas condutividades  $k_s$  e  $k_p$  com coeficientes de ajuste (e suas faixas de incerteza) obtidos empiricamente que combinam dados experimentais de PCBs reais com a simulação numérica. O objetivo é criar novas variáveis  $k_{eff}$ ,  $k_{p,eff}$  e  $k_{s,eff}$  que poderiam ser usadas em análises e projetos térmicos no lugar de tradicionais ( $k_{eff}$ ,  $k_p$  e  $k_s$ ). Espera-se que as novas expressões com novas variáveis proporcionem maior precisão e menor faixa de incerteza sem a necessidade de aumentar a complexidade do projeto térmico de equipamentos eletrônicos.

Em nenhum dos trabalhos publicados e revisados os estudos experimentais de resfriamento de PCBs por condução pura foram realizados. Este tipo de estudos se torna muito importante para aplicações espaciais, e as propriedades

térmicas efetivas de PCBs se tornam parâmetros críticos para o sucesso do projeto térmico dos equipamentos.

### **1.3. Objetivos do trabalho**

O presente trabalho tem como principais objetivos:

- a) Desenvolvimento de uma metodologia para determinação das condutividades térmicas efetivas ( $k_{eff}$ ,  $k_{p,eff}$ ,  $k_{s,eff}$ ) de placas de circuito impresso (PCBs) combinando dados de experimentos conduzidos e de simulação numérica de modelos criados;
- b) Validação da metodologia através da comparação dos resultados com dados disponíveis na literatura e através de comprovação da estabilidade dos resultados obtidos por diferentes tipos de métodos experimentais e de simulação numérica;
- c) Elaboração de expressões empíricas para o cálculo das condutividades térmicas efetivas de PCBs com fatores embutidos ajustados através do tratamento estatístico de dados experimentais obtidos por testes térmicos específicos de várias placas diferentes.
- d) Determinação das faixas de incerteza devido à influência de efeitos da porcentagem de área coberta por cobre, dos furos metalizados passantes na placa, posicionamento dos componentes dissipativos e por variedade na topografia das trilhas condutivas.
- e) Elaboração de recomendações práticas para projetos térmicos de PCBs multicamadas usadas em equipamentos eletrônicos de aplicação espacial com base na metodologia desenvolvida.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados resultados publicados de estudos realizados sobre o comportamento térmico de placas de circuito impresso e de métodos para o cálculo da condutividade térmica efetiva de PCBs multicamadas e os efeitos da mudança na ordem de montagem das camadas, configuração e condições de contorno.

O FR4 é composto de fibra de vidro e resina epoxy, sendo o principal e mais comum material usado para fabricação de placas de circuito impresso (PCBs). Ele tem baixa condutividade térmica, o que influi fortemente nas propriedades térmicas efetivas (principalmente condutividade) da placa e conseqüentemente nas temperaturas dos componentes eletrônicos montados na sua superfície. Existe uma faixa de incerteza do valor desta condutividade, que depende da tecnologia de fabricação, parâmetros da cura, variedade de matéria prima e parâmetros da fibra embutida. Foram levantados dados de fornecedores e fontes diferentes. Os dados da Tabela 2.1 permite estimar um valor médio de condutividade térmica do FR4 de 0.26 W/m/K variando entre 0.12 e 0.34 W/m/K.

Tabela 2.1 – Valores de  $k_{FR4}$  disponíveis na bibliografia.

$k_{FR4}$ (W/m°C)	Fonte
0.27	<a href="http://www.jjorly.com/g10_fr4_technical_specifications_data.htm">http://www.jjorly.com/g10_fr4_technical_specifications_data.htm</a>
0.29	<a href="http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=8337b2d050d44da1b8a9a5e61b0d5f85">http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=8337b2d050d44da1b8a9a5e61b0d5f85</a>
0.29	<a href="http://gmitweb.gmit.ie/eng/energy/Publications/Publication_17.pdf">http://gmitweb.gmit.ie/eng/energy/Publications/Publication_17.pdf</a>
0.30	<a href="http://www.hitachi-chem.co.jp/english/products/bm/b04/001.html">http://www.hitachi-chem.co.jp/english/products/bm/b04/001.html</a>
0.25	<a href="http://focus.ti.com/download/trng/docs/seminar/Topic%2010%20-%20Thermal%20Design%20Consideration%20for%20Surface%20Mount%20Layouts%20.pdf">http://focus.ti.com/download/trng/docs/seminar/Topic%2010%20-%20Thermal%20Design%20Consideration%20for%20Surface%20Mount%20Layouts%20.pdf</a>
0.30	<a href="http://www.pertech.com.br/download/boletimtecnico/folha_de_dados_tg150_fr4.pdf">http://www.pertech.com.br/download/boletimtecnico/folha_de_dados_tg150_fr4.pdf</a>
0.27	<a href="http://www.p-m-services.co.uk/fr4_data_sheet.htm">http://www.p-m-services.co.uk/fr4_data_sheet.htm</a>
0.20	<a href="https://caralho-voador.appspot.com/www.e-neon.ru/pages/id/147">https://caralho-voador.appspot.com/www.e-neon.ru/pages/id/147</a>
0.34	<a href="http://www.springerlink.com/content/n6030024565v907m/">http://www.springerlink.com/content/n6030024565v907m/</a>
0.12	<a href="http://www.frontdoor.biz/HowToPCB/HowToPCB-Trace&amp;Space.html">http://www.frontdoor.biz/HowToPCB/HowToPCB-Trace&amp;Space.html</a>

Segundo Savar et al. (1990), ainda existe anisotropia no próprio material FR4. Para um material de um fornecedor específico, os autores obtiveram experimentalmente os valores de 0.343 W/mK para condutividade térmica transversal e de 1.059W/mK para condutividade térmica no plano.

A seguir são apresentadas as análises das principais publicações de cálculo das condutividades térmicas efetivas de PCBs fabricados com base de material FR4.

Lemczyk et al. (1991) apresentou resultados de uma análise com séries de Fourier, em regime permanente, de uma configuração de PCB teórica para examinar o comportamento térmico nas trilhas condutoras, e também uma análise bidimensional analítica de uma configuração de PCB multi-camadas, Figura 2.1, para determinar a sua condutividade térmica efetiva  $k_{eff}$ . Seu objetivo era mostrar o quão próximo essa condutividade poderia chegar com uma análise usando-se um modelo isotrópico com camada única e homogênea de uma PCB multi-camada.

Uma expressão para a  $k_{\text{eff}}$  foi obtida para a PCB do estudo baseada no cálculo da média harmônica para o modelo de condutividades em série e paralelo. Conclui-se que a metodologia adotada provê uma boa estimativa para o parâmetro  $k_{\text{eff}}$  para esta placa teórica, o que simplifica o projeto térmico, diminuindo de forma bastante significativa o custo computacional para fazer a previsão das temperaturas na PCB.

Este estudo apresentou uma aproximação de  $k_{\text{eff}}$  apenas para um modelo bidimensional e apresentou como principal resultado a média harmônica de  $k_s$  e  $k_p$ . A metodologia apresentada não foi confirmada por testes e por comparações com outras abordagens.

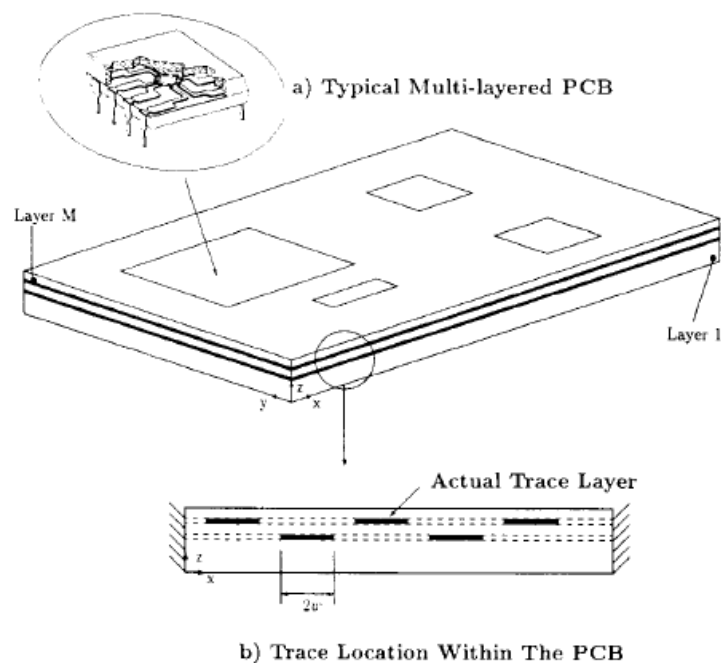


Figura 2.1 - Localização das trilhas no modelo da PCB.

Fonte: Lemczyk et al. (1991)

Manno et al. (1993) executaram uma série de testes experimentais, onde avaliou-se o impacto da condução térmica efetiva em placas de circuito impresso no comportamento térmico de componentes eletrônicos resfriados com ar. Nos testes, componentes de montagem superficial foram simulados com filmes espessos com resistores. Foram testados 3 tipos diferentes de placas, uma PCB padrão com condutividade efetiva de 0.26 W/mK, outra com condutividade efetiva moderada de 1.14 W/mK contendo 3 camadas (2 condutivas e 1 dielétrica) e outra placa com condutividade efetiva de 35.9 W/mK, também com 3 camadas, Figura 2.2. Todas as PCBs foram testadas em condições de convecção tanto natural como forçada. Os campos de temperatura das placas foram obtidos através de medidas de termopares.

Os dados obtidos nos testes podem ser utilizados para um projeto preliminar, mas a obtenção de mais dados é necessária para se avaliar como a condutividade efetiva da placa afeta o comportamento térmico dos componentes.

Este trabalho apresentou um estudo do impacto da condutividade da PCB no resfriamento por condução e por convecção, mas não apresentou a metodologia de como calcular a  $k_{\text{eff}}$  das placas testadas.

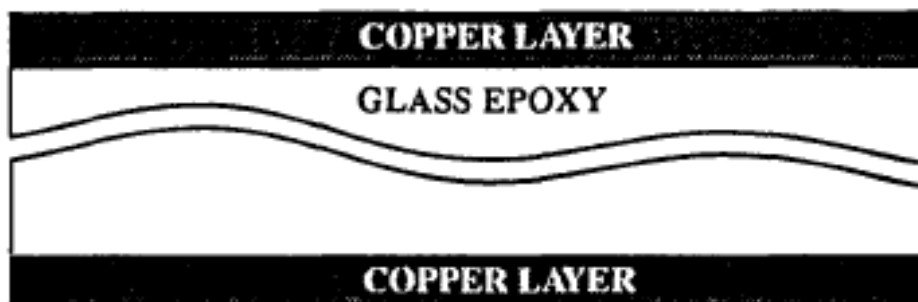


Figura 2.2 – Configuração da PCB com 3 camadas.

Fonte: Manno et al. (1993)

Teertstra et al. (1995) utilizou técnicas numéricas (programa comercial Flotherm) e experimentais para investigar a condução em placas de circuito impresso multi-camadas com a suposição que as camadas de cobre são homogêneas, em função do número, localização e dissipação de potência de componentes com montagem superficial (SMD). Combinando resultados medidos com os das simulações em Flotherm, condutividades térmicas efetivas foram determinadas, permitindo que PCBs complexas fossem tratadas como tendo apenas uma camada de condutividade térmica isotrópica. Valores obtidos para condutividades efetivas encontradas são bastante maiores que os calculados através da condutividade em série  $k_s$  e paralelo  $k_p$ , anteriormente tidas como os limites inferior e superior para a condutividade. Os autores não apresentaram a explicação desta contradição. Os resultados apresentados são aplicáveis somente à configuração testada no estudo, com 2 camadas de cobre nas superfícies externas da placa, Figura 2.3.

Neste trabalho testes experimentais são combinados com simulação numérica para encontrar com bastante precisão a  $k_{eff}$ , mas os resultados são válidos apenas para o caso específico estudado, não sendo aplicáveis para PCBs em geral.

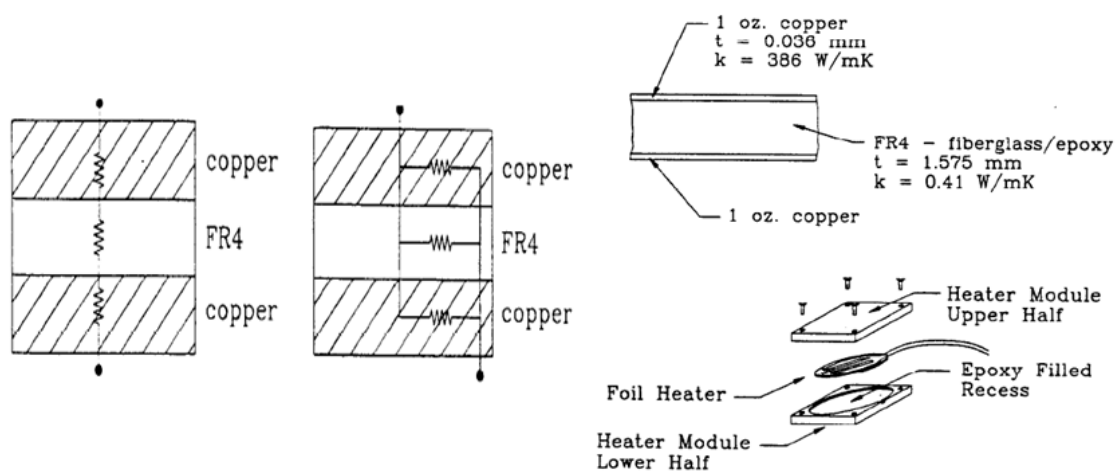


Figura 2.3 – Configuração da placa e do aquecedor usados no estudo.



Fonte: Teertstra et al. (1995)

Os valores de  $k_{\text{eff}}$  isotrópicos superiores ao limite superior  $k_p$  poderia ser explicado pelo fato do material FR4 ter condutividade térmica anisotrópica, de acordo com trabalho desenvolvido por Savar et al. (1990), o que não foi considerado neste estudo.

Culham & Yovanovich (1998) e Culham et al. (2000) apresentaram um estudo de métodos analíticos comparativo que demonstra a importância de incluir tanto a resistência do material quanto a resistência ao espalhamento do calor, normalmente não consideradas no cálculo que utiliza analogia com circuitos elétricos e para a determinação da condutividade normal ao plano da PCB (modelo de condutividade em série,  $k_s$ ) e a condutividade no plano (modelo de condutividade em paralelo,  $k_p$ ).

A demonstração das expressões para o cálculo da resistência ao espalhamento foi publicada por Yovanovich et al. (1999) onde se levou em consideração o tamanho e a localização da fonte de calor assim como condições de convecção, que não são consideradas nos métodos analíticos baseados nas condutividades em série e paralelo, dentre eles, média aritmética, média geométrica e média harmônica. Utilizando-se a metodologia acima descrita, as seguintes análises foram feitas: influência do posicionamento das camadas, influência do tamanho da fonte de calor e localização da fonte de calor, Figura 2.4. Valores bastante distintos (com variação de até 3 vezes) de condutividade efetiva  $k_{\text{eff}}$  foram encontrados nos diferentes casos de estudo.

Este estudo teórico utiliza placas multi-camadas simplificadas (não reais) para estudar analiticamente a  $k_{\text{eff}}$  das mesmas, apresentando resultados bastante diferentes para as diferentes configurações testadas. Os resultados não foram confirmados e validados através de experimentos.

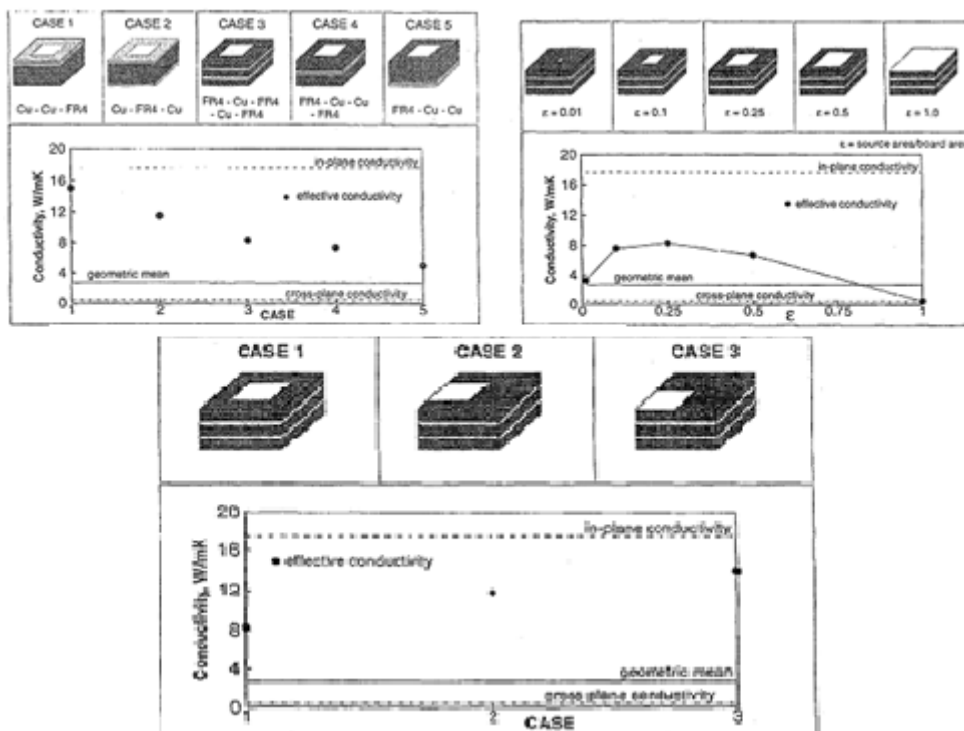
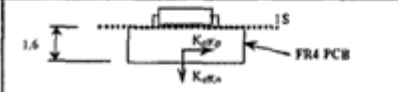
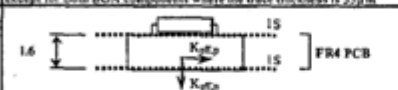
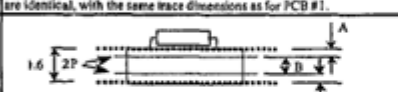
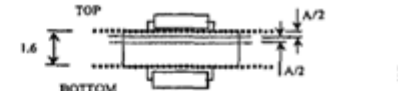

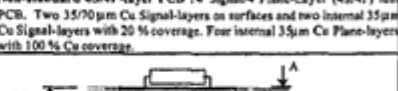


Figura 2.4 – Diferentes configurações estudadas e seus resultados.

Fonte: Culham & Yovanovich (1998)

Lohan et al. (2000), através de um estudo experimental em ambientes com convecção natural e forçada com 4 tipos de componentes e 6 diferentes configurações de placas, Figura 2.5, mostrou o impacto da configuração da PCB na temperatura operacional do componente relacionando condutividade efetiva da PCB e o ambiente convectivo entre outros parâmetros. Mostrou-se também que a condutividade térmica efetiva em PCBs é mais próxima da média geométrica das condutividades paralela e normal a placa, ou seja,  $k_{eff} \cong \sqrt{k_p k_s}$ . Suas medições apresentaram a sensibilidade da condutividade efetiva da PCB à presença de baixa concentração de cobre nas camadas condutoras, à presença de camadas condutoras internas e à proximidade destas camadas à superfície da placa.

PCB #: $K_{eff}$ (W/mK)	PCB Construction: Schematic cross-section and Description
#1 2.18 / 0.32	 <p>1.6</p> <p>1S</p> <p>FR4 PCB</p> <p><math>K_{FR4}</math></p> <p><math>K_{PP}</math></p> <p>15-layer PCB: JEDEC Standard 1 Signal-layer (1S) test PCB to EIA/JESD 51-3 [17]. Cu signal traces are 70 <math>\mu</math>m thick &amp; 250 <math>\mu</math>m wide, except for both BGA components where the trace thickness is 35 <math>\mu</math>m.</p>
#2 3.54 / 0.35	 <p>1.6</p> <p>1S</p> <p>FR4 PCB</p> <p><math>K_{FR4}</math></p> <p><math>K_{PP}</math></p> <p>Non-standard 25-layer PCB: Double-sided/signal-layer (2S) thermal test PCB following EIA/JESD 51-3 [17]. The 2 or Cu layer on both PCB sides are identical, with the same trace dimensions as for PCB #1.</p>
#3 18.6 / 0.35	 <p>1.6</p> <p>2S</p> <p>2P</p> <p>FR4 PCB</p> <p><math>K_{FR4}</math></p> <p><math>K_{PP}</math></p> <p>Where A = 0.36mm and B=0.71mm</p> <p>2S/2P-layer PCB: Standard 2 Signal/2 Plane-Layer (2S/2P) thermal test PCB to JESD 51-7 [12]. Two 35/70<math>\mu</math>m Cu Signal-layers and two internal 35 <math>\mu</math>m Cu Plane-layers with 100% Cu coverage.</p>
#4 18.6 / 0.35	 <p>TOP</p> <p>1.6</p> <p>2S</p> <p>2P</p> <p>FR4 PCB</p> <p><math>K_{FR4}</math></p> <p><math>K_{PP}</math></p> <p>Where A = 0.20mm, approximately</p> <p>Non-standard 2S/2P-Layer PCB: 2 Signal/2 Plane-Layer (2S/2P) thermal test PCB similar to PCB #3; except that the 2 internal, 1 or Cu P-Layers (100% Cu) are within 0.25mm of each other &amp; the top S-layer.</p>
#7 36.5 / 0.38	 <p>1.6</p> <p>4S</p> <p>4P</p> <p>FR4 PCB</p> <p><math>K_{FR4}</math></p> <p><math>K_{PP}</math></p> <p>Where A = 0.20mm, approximately</p> <p>Non-standard 4S/4P-layer PCB: 4 Signal/4 Plane-Layer (4S/4P) test PCB. Two 35/70<math>\mu</math>m Cu Signal-layers on surfaces and two internal 35<math>\mu</math>m Cu Signal-layers with 20% coverage. Four internal 35<math>\mu</math>m Cu Plane-layers with 100% Cu coverage.</p>
#8 38.4 / 0.42	 <p>0.8</p> <p>4S</p> <p>4P</p> <p>FR4 PCB</p> <p><math>K_{FR4}</math></p> <p><math>K_{PP}</math></p> <p>Where A = 0.10mm, approximately</p> <p>Non-standard 4S/4P-layer PCB: Thermal test PCB similar to PCB #7 except that; inter-layer spacing is now 0.1mm (approx.), and all S- and P-layers are now 13<math>\mu</math>m thickness.</p>

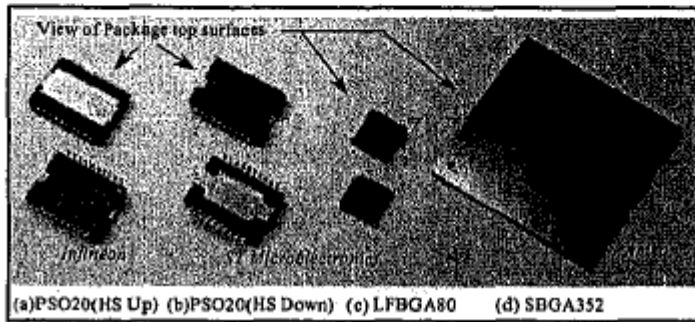


Figura 2.5 – Packages (4) e PCBs (6) testados

Fonte: Lohan et al. (2000)

Shabany (2002) conduziu o estudo sobre a condutividade térmica efetiva em PCBs utilizando soluções numéricas das equações de condução de calor em três dimensões. Foram obtidas soluções para 2 diferentes espessuras de placa, 3 números de camadas de cobre e diferentes dimensões para o componente, Figura 2.6. Foram também discutidas as limitações do modelo de PCB com condutividade térmica efetiva em uma dimensão (modelo simplificado isotrópico com  $k_{eff}$ ). As condutividades efetivas foram maiores que valores encontrados pelo modelo de uma dimensão quando a superfície superior era coberta com cobre e menores quando a superfície superior não era coberta

com cobre, sendo que a diferença foi mais pronunciada para componentes com menor tamanho.

Neste estudo, foi mostrada a importância das camadas de cobre e do tamanho do componente no comportamento térmico do sistema, mas não se mostrou como chegar em um valor de keff em PCBs. Os resultados não foram validados por experimentos.

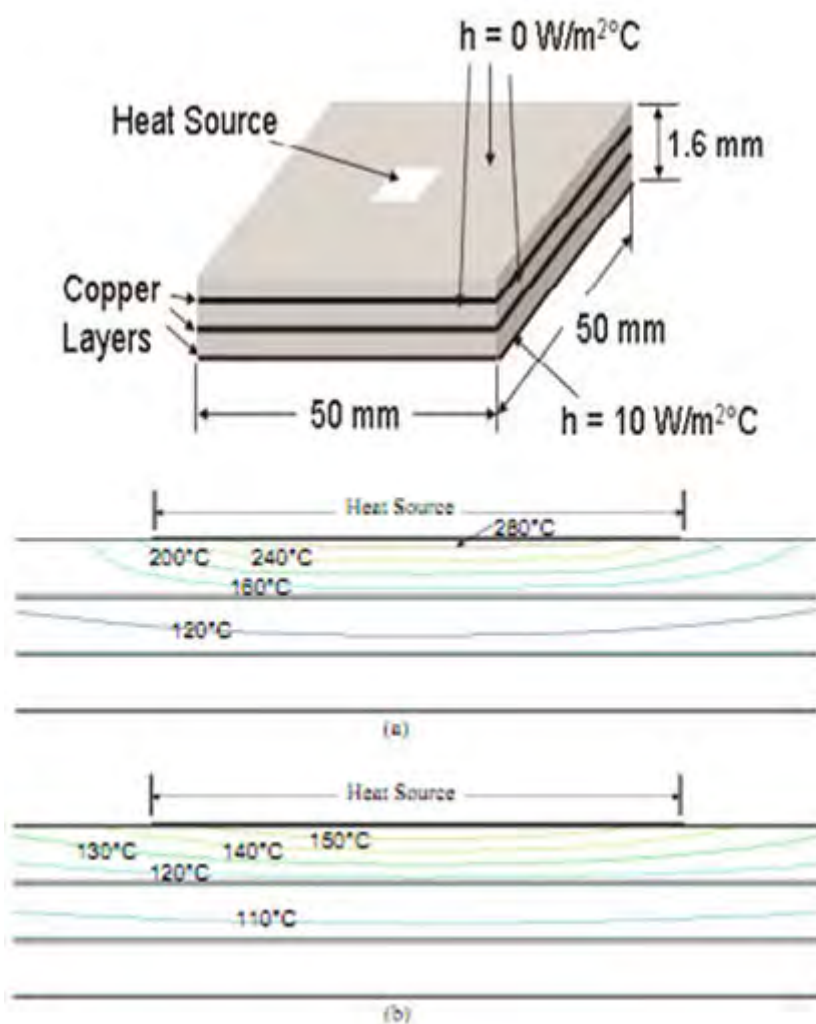


Figura 2.6 – Configuração da placa de estudo e resultados da simulação.

Fonte: Shabany (2002)

Andonova et al. (2009) realizaram um estudo numérico onde simula duas configurações de placa com camadas de FR4 e cobre, Figura 2.7. Utilizou o programa Flotherm para criar um modelo multi-camadas e outro com uma única camada com uma condutividade térmica efetiva (modelo simplificado isotrópico com  $k_{eff}$ ), calculada analiticamente a partir das condutividades em série  $k_s$  e paralelo  $k_p$ . Como resultado deste estudo, as diferenças de temperatura nas fontes de calor são levantadas. Algumas imagens com uma câmera de infravermelhos foram capturadas de PCBs reais com vários componentes dissipativos em operação.

Para as simulações em Flotherm, foram utilizados modelos baseados em placas teóricas simplificadas, onde se avaliou apenas a diferença de temperaturas no modelo multi-camadas e no modelo simplificado com uma única camada, ou seja, modelo isotrópico. Os autores não apresentam valores de  $k_{eff}$ . Imagens de PCBs reais com câmera de infravermelhos foram feitas, mas sem análise dos resultados. Mais investigações serão necessárias para se avaliar os efeitos da condição de contorno, espessura da placa, distribuição das camadas internas e superior de cobre, fonte de calor e formato da PCB.

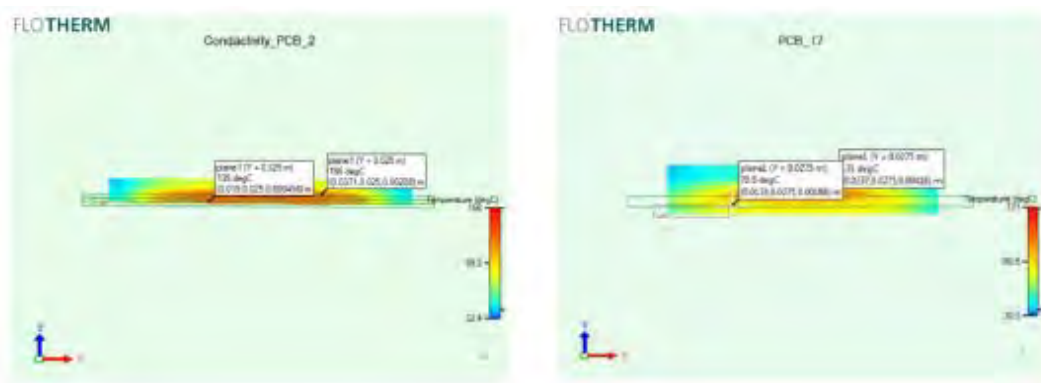


Figura 2.7 – Resultados da simulação para o modelo multi-camadas e o simplificado.

Fonte: Andonova et al. (2009)

A análise bibliográfica mostra que os trabalhos revisados não apresentam uma metodologia, confiável e verificada por testes, para a determinação de propriedades térmicas de PCBs com faixas de incerteza aceitáveis para uso em projetos térmicos de equipamentos eletrônicos para aplicações espaciais.



### **3 LEVANTAMENTO DAS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS BÁSICAS DAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO**

A partir da solicitação do INPE, empresas envolvidas em projetos com o instituto emprestaram 11 placas de circuito impresso (8 com 6 camadas e 3 com 2 camadas) para a realização dos testes experimentais. Todas as placas estavam acompanhadas de seus respectivos projetos elétricos e são típicas de aplicações espaciais. Neste capítulo, será mostrado o levantamento das características de todas as PCBs utilizadas no estudo. A capacidade de espalhar o calor dos componentes dissipantes é uma característica térmica fundamental das PCBs, que depende da quantidade e formato das camadas de cobre embutidas na placa. Por isso as características como número de camadas condutivas, porcentagem de cobertura com cobre de cada camada condutiva e área total de furos metalizadas são levantadas. Em seguida, são estimadas as condutividades térmicas anisotrópicas da PCB no plano da placa ( $k_p$ ) e normal ao plano da placa ( $k_s$ ). Por fim as condutividades médias canônicas simples de  $k_p$  e  $k_s$  são calculadas.

#### **3.1. Propriedades das camadas das PCBs**

A partir do projeto das placas de circuito impresso foi possível fazer o levantamento do número de camadas, espessura de cada camada e porcentagem da área coberta com cobre nas camadas metalizadas. A porcentagem de cobertura foi calculada a partir das imagens de projeto das trilhas de cobre utilizando um método de contagem de pixels com o programa Adobe® Photoshop®.

As tabelas do APÊNDICE A apresentam as propriedades de condutividade térmica dos materiais utilizados na fabricação das 11 placas testadas, ou seja, cobre e FR4. As propriedades térmicas do cobre são bem definidas, enquanto as do FR4, segundo pesquisa em várias fontes e publicações (Capítulo 2, Tabela 2.1), está definida com uma faixa de incerteza bastante grande. O valor



depende da tecnologia de fabricação, componentes de processo, parâmetros de cura, entre outros. Diferentes fornecedores de PCBs especificam valores diferentes de  $k_{FR4}$  que variam normalmente de 0.14 a 0.34 W/m/K. Durante estudo houve o ajuste deste parâmetro experimentalmente (Seção 7.2). Os resultados obtidos confirmaram que os valores de  $k_{FR4}$  para um grupo de placas do mesmo fabricante utilizadas ficam próximos do limite inferior, ou seja, aproximadamente 0.20 W/m/K. Este valor foi usado neste estudo pois se encaixa na abordagem conservativa para generalizar os resultados para placas de outros fornecedores.

### 3.2. Densidade Efetiva e Capacidade Térmica das PCBs

A densidade efetiva, assim como o calor específico, é um parâmetro importante para simulações numéricas das placas de circuito impresso em regime transiente devido à ligação com a capacidade térmica da placa. Os parâmetros foram calculados a partir dos volume das placas e medida da massa usando balança de precisão de 0.1 g. Os resultados são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Cálculo da densidade efetiva das PCBs.

	<b>Massa (g)</b>	<b>x (mm)</b>	<b>y (mm)</b>	<b>z (mm)</b>	<b>Volume (mm<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>PCB_01</b>	154.2	233.5	160.0	2.0	74720	2064
<b>PCB_02</b>	153.5	225.0	174.0	2.0	78300	1960
<b>PCB_03</b>	112.7	180.0	160.0	2.0	57600	1957
<b>PCB_04</b>	130.9	200.0	156.0	1.6	49920	2622
<b>PCB_05</b>	205.7	296.0	205.0	1.6	97088	2119
<b>PCB_06</b>	206.3	296.0	205.0	1.6	97088	2125
<b>PCB_07</b>	133.2	200.0	170.0	2.0	68000	1959
<b>PCB_08</b>	172.4	272.0	141.2	1.8	69107	2495
<b>PCB_09</b>	169.4	272.0	141.2	1.8	69107	2451
<b>PCB_10</b>	161.6	272.0	141.2	1.8	69107	2338
<b>PCB_11</b>	163.3	272.0	122.0	1.8	59731	2734

A Tabela 3.2 mostra os valores efetivos de calor específico e capacidade térmica para todas as PCBs calculados com base nas propriedades de calor específico  $c_{Cu}$  e  $c_{FR4}$  e a quantidade de cada material na placa.

Tabela 3.2 – Calor específico efetivo e capacidade térmica das PCBs.

Placa	Calor Específico Efetivo – $c_{eff}$ (J/kgK)	Capacidade Térmica – C (J/K)
PCB_01	1169	180
PCB_02	1190	183
PCB_03	1190	134
PCB_04	1068	140
PCB_05	1157	238
PCB_06	1156	238
PCB_07	1192	159
PCB_08	1166	201
PCB_09	1166	198
PCB_10	1152	186
PCB_11	1134	185

O calor específico efetivo foi calculado usando a fração de massa dos materiais envolvidos, ou seja, FR4 e cobre, assim como o calor específico de cada material:  $c_{FR4} = 1200$  J/kgK e  $c_{Cu} = 385$  J/kgK .

### 3.3. Características de furação das PCBs

A informação das características dos furos metalizados, os quais teoricamente podem melhorar a condutividade térmica no sentido normal ao plano da placa, também foi obtida através dos projetos elétricos das PCBs e estão apresentadas no APÊNDICE B.

A Tabela 3.3 mostra a área total metalizada em cada uma das 11 PCBs e também a sua porcentagem em relação a área total da placa.

Tabela 3.3 – Área e porcentagem de metalização de furos passantes nas PCBs testadas.

Placa	Área metalizada em todos os furos passantes (mm <sup>2</sup> )	Porcentagem em relação a área da PCB (%)
PCB_01	117.61	0.31
PCB_02	40.52	0.10
PCB_03	45.82	0.16
PCB_04	218.11	0.70
PCB_05	182.78	0.30
PCB_06	207.41	0.34
PCB_07	40.00	0.12
PCB_08	116.56	0.30
PCB_09	120.00	0.31
PCB_10	90.43	0.24
PCB_11	114.81	0.35

A área de metalização de cada furo foi calculada considerando a espessura de metalização  $t_{h,i}$  pela relação  $A_{h,i} = D_{h,i}t_{h,i}$ . A área total é a soma das áreas de todos os furos da placa.

### 3.4. Cálculo de condutividades canônicas de PCBs

Os dados levantados permitem calcular as condutividades térmicas básicas anisotrópicas e as médias canônicas de  $k_p$  e  $k_s$  para cada placa.

A condutividade térmica no plano  $k_p$  é considerada como limite máximo para a condutividade térmica efetiva em PCBs e é determinada supondo que o cobre em cada camada condutiva está distribuído homogeneamente de acordo com o parâmetro de fração de cobertura  $f_a$  obtido pela área total de trilhas de cobre. No caso das camadas de FR4,  $f_a$  é considerado 1 porque a cobertura com material FR4 é completa. Trata-se de um modelo de condutância em paralelo, pois assume-se que o fluxo de calor que passa ao longo de cada camada, seja de cobre ou de FR4. O parâmetro  $k_p$  é definido através da Equação 3.1.

$$k_p = \frac{\sum_{i=1}^N k_i f_{ai} t_i}{\sum_{i=1}^N t_i} \quad (3.1)$$

A condutividade térmica no sentido normal ao plano da placa  $k_s$ , ou transversal, considerada como limite inferior da condutividade térmica efetiva em PCBs. Também foi elaborada supondo que o cobre em cada camada condutiva está distribuído homogeneamente e tem uma condutividade ponderada pelo parâmetro de fração de cobertura  $f_a$ , o qual foi obtido pela área total de trilhas condutivas. O parâmetro  $k_s$  é definido através de equação a seguir.

$$k_s = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{\sum_{i=1}^N \frac{t_i}{f_{ai} k_i}} \quad (3.2)$$

Teoricamente, os furos metalizados poderiam aumentar a condutividade térmica normal ao plano da PCB da mesma maneira que as trilhas condutivas melhoram condutividade térmica no plano. Por esta razão, foi introduzida a modificação da equação para  $k_s$  com a adição de uma parcela de condução em paralelo, que supõe homogeneidade na metalização dos furos no volume da placa. O parâmetro de condutividade térmica efetiva série-paralelo  $k_{sp}$  é definido através de equação a seguir.

$$k_{sp} = (1 - f_h) \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{\sum_{i=1}^N \frac{t_i}{f_{ai} k_i}} + f_h k_{Cu} \quad (3.3)$$

Esta condutividade apresenta um limite superior idealizado do efeito de aumento de condutividade térmica transversal pelo fato da metalização de furos com a suposição de homogeneidade. Na realidade, este efeito é muito menor pelo fato da alta discretização de furos.

Com base nas condutividades  $k_p$  e  $k_s$ , suas médias canônicas podem ser calculadas com o objetivo de se estimar um valor de condutividade térmica efetiva isotrópica  $k_{eff}$ . As equações para Média Aritmética (MA), Média Geométrica (MG) e Média Harmônica (MH) de  $k_p$  e  $k_s$  são mostradas a seguir.

$$\bar{k}_{ma} = \frac{(k_s + k_p)}{2} \quad (3.4)$$

$$\bar{k}_{mg} = \sqrt{k_s k_p} \quad (3.5)$$

$$\bar{k}_{mh} = \frac{2k_s k_p}{(k_s + k_p)} \quad (3.6)$$

Os valores das condutividades térmicas básicas  $k_p$ ,  $k_s$ ,  $k_{sp}$  e as médias aritmética, geométrica e harmônica de  $k_p$  e  $k_s$  são apresentados na Tabela 3.4

7

Tabela 3.4 – Cálculo das condutividades através dos métodos analíticos simplificados.

<b>Placa</b>	<b>Nº de Camadas</b>	<b><math>k_p</math> (W/mK)</b>	<b><math>k_s</math> (W/mK)</b>	<b><math>k_{sp}</math> (W/mK)</b>	<b>Média Aritmética (W/mK)</b>	<b>Média Geométrica (W/mK)</b>	<b>Média Harmônica (W/mK)</b>
<b>PCB_01</b>	6	15.23	0.22	1.48	7.73	1.84	0.44
<b>PCB_02</b>	2	5.16	0.21	0.61	2.59	1.03	0.40
<b>PCB_03</b>	2	5.16	0.21	0.85	2.59	1.03	0.40
<b>PCB_04</b>	6	64.96	0.33	3.13	32.64	4.63	0.66
<b>PCB_05</b>	6	21.09	0.23	1.43	10.66	2.20	0.46
<b>PCB_06</b>	6	21.87	0.23	1.59	11.05	2.24	0.46
<b>PCB_07</b>	2	4.18	0.21	0.69	2.20	0.93	0.39
<b>PCB_08</b>	6	16.97	0.21	1.41	8.59	1.91	0.42
<b>PCB_09</b>	6	16.66	0.21	1.45	8.44	1.89	0.42
<b>PCB_10</b>	6	23.73	0.22	1.18	11.97	2.26	0.43
<b>PCB_11</b>	6	32.37	0.22	1.62	16.29	2.64	0.43

## 4 DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA EFETIVA DE PCBs ATRAVÉS DE MÉTODOS NUMÉRICOS

Neste capítulo, são realizados estudos para a determinação de parâmetros numéricos de divisão nodal e tipo de nó para o modelamento das PCBs considerando geometrias e dimensões típicas tanto de placas como de componentes dissipativos. O objetivo deste estudo é evitar erros ligados a escolha de parâmetros numéricos incorretos, uma vez que os modelos numéricos serão usados para identificação das condutividades efetivas das placas a partir de dados experimentais pelo ajuste do modelo detalhado. Diferentes casos com diferentes tipos de modelos numéricos são elaborados e validados qualitativamente usando dados publicados na literatura. Por fim, é realizado um estudo de estabilidade de resultados de identificação da condutividade térmica referente ao tipo de condição de contorno.

### 4.1. Estudo da divisão nodal no sentido normal a PCB

Durante o trabalho de modelamento e simulação numéricos das placas de circuito impresso utilizando o programa SINDA/FLUINT Thermal Desktop®, foi observado que existia diferença nos resultados quando a divisão nodal no sentido normal a placa (sentido z) era alterada, assim como quando o tipo de nó era alterado entre "*edge nodes*" e "*centered nodes*". Então, surgiu a necessidade de se realizar um estudo para investigar este fenômeno.

Uma placa com dimensões 233.5 x 160 x 1.6 mm, com divisão nodal no plano de 25 x 25 nós foi modelada como sendo um sólido com camada única e condutividade anisotrópica, com  $k_p = 15.23 \text{ W/mK}$  e  $k_s = 0.34 \text{ W/mK}$ . Um elemento dissipativo cilíndrico com 12 mm de diâmetro na base e 10 W de potência dissipada foi criado e posicionado no centro da placa. A condição de contorno é representada por um bom acoplamento com o ambiente apenas na superfície inferior da placa com coeficiente de troca de calor de  $134 \text{ W/m}^2\text{K}$  e temperatura ambiente de 20°C.



A temperatura obtida através da simulação da placa em regime permanente está ilustrada na Figura 4.1.

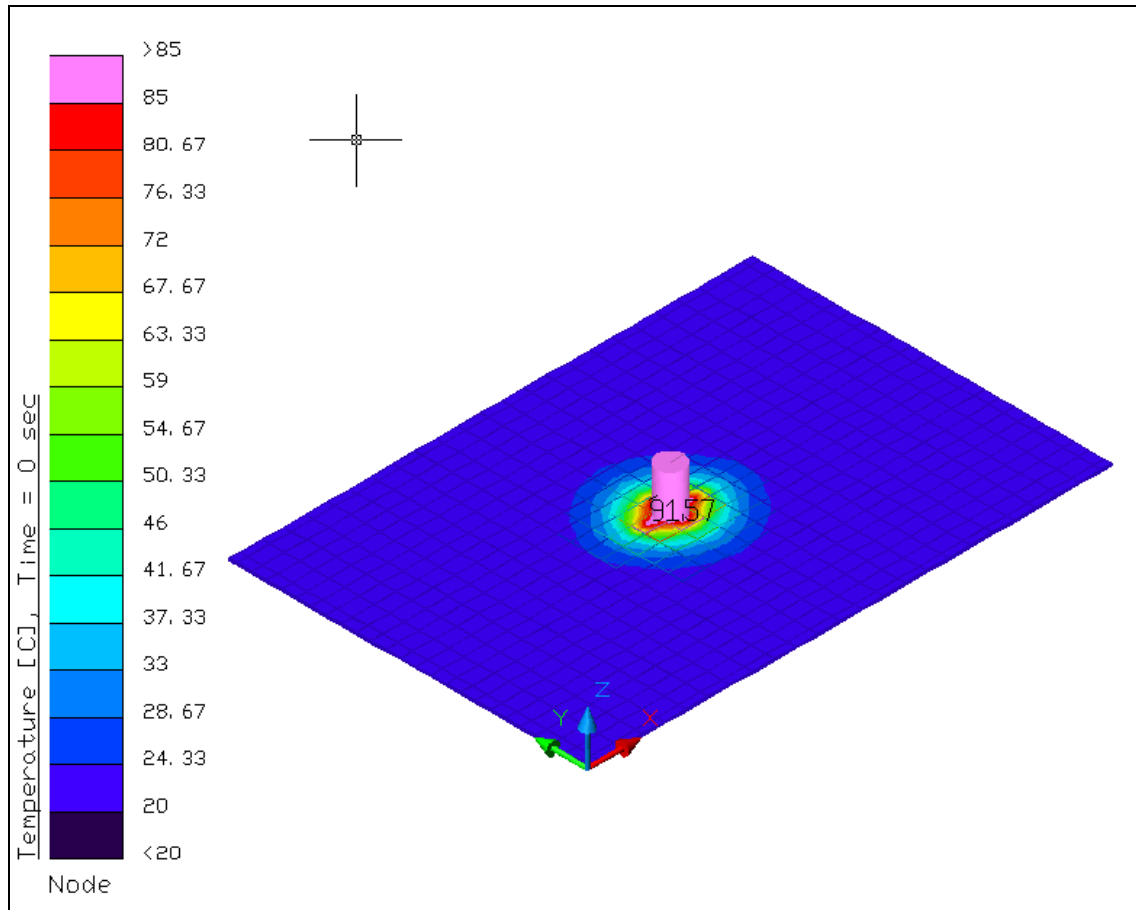


Figura 4.1 – Simulação do estudo dos nós no sentido z.

A simulação foi executada várias vezes modificando o tipo de nó (*edge* e *centered*) e o número de camadas de 1 a 20, anotando a temperatura do componente dissipativo em regime permanente, sempre utilizando o método “*single matrix*”, o qual apresentou resultados numericamente mais estáveis. Os resultados são mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Resultado do estudo do número de nós na direção transversal.

<b>Número de nós na direção z</b>	<b>Temperatura no elemento dissipativo – <i>centered nodes</i> (°C)</b>	<b>Temperatura no elemento dissipativo – <i>edge nodes</i> (°C)</b>
1	94.0	91.1
2	99.5	99.1
3	102.3	103.2
4	103.9	104.2
5	105.0	104.6
6	105.7	104.8
7	106.2	104.9
8	106.6	105.0
9	106.9	105.0
10	107.1	105.0
11	107.4	105.1
12	107.5	105.1
13	107.7	105.1
14	107.8	105.1
15	107.9	105.1
16	108.0	105.1
17	108.1	105.1
18	108.2	105.1
19	108.2	105.1
20	108.3	105.1

Com os dados da Tabela 4.1, um gráfico foi desenhado para melhor visualizar como as mudanças na temperatura do elemento dissipativo ocorreram, Figura 4.2.

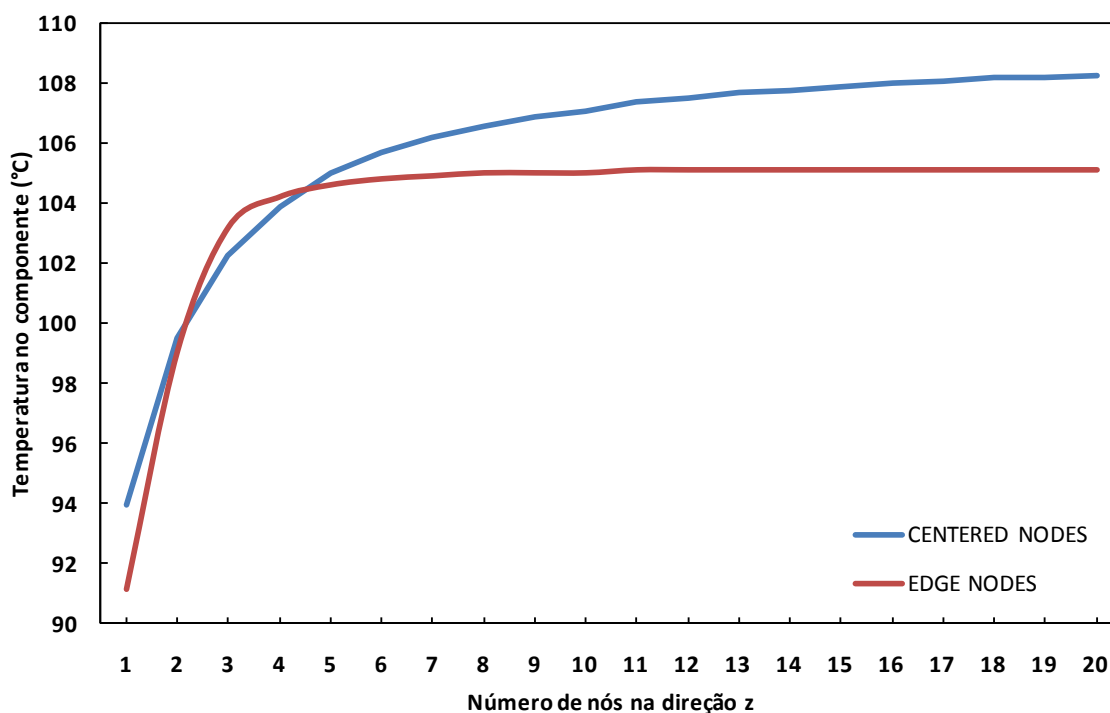


Figura 4.2 - Gráfico da temperatura pelo número de nós na direção z.

Na figura, é possível notar que para ambos os tipos de divisão nodal os resultados ficam bastante instáveis com menos de 3 nós na direção z, porém com nós do tipo “edge” as temperaturas convergem rapidamente para um valor a partir de  $N_z=4$  nós enquanto ainda existe mudança nos resultados do nó tipo “centered”. Os resultados obtidos confirmam que para grande parte dos casos os nós tipo “edge” podem ser utilizados com  $N_z$  maior ou igual a 4.

Por outro lado, quando o modelo inclui sensores de temperatura com posicionamento preciso, as células numéricas do tipo “centered” são mais adequadas.

Uma vez que as curvas coincidem entre 4 e 5 nós na direção z, onde o resultado de temperatura é igual para ambos os tipos de nó (e também o tipo “edge” já fornece um valor estável), optou-se pela utilização de 5 nós do tipo “centered” para todos os modelos das PCB no estudo.

## 4.2. Estudo da divisão nodal no plano da PCB

Notou-se também que os resultados ficavam diferentes com a alteração do tipo e número de nós nos sentidos x e y da PCB. Por esta razão, outro estudo para investigar a distribuição nodal no plano da placa foi realizado.

Uma placa com dimensões 233.5 x 160 x 1.6 mm foi modelada como sendo um sólido com camada única e condutividade isotrópica, com  $k_{\text{eff}} = 15.23$  W/mK. Um elemento dissipativo cilíndrico com 12 mm de diâmetro na base e 2 W de potência dissipada foi criado e posicionado no centro da placa. A condição de contorno é representada por uma troca de calor com o ambiente de 5 W/m<sup>2</sup>K apenas na face inferior da placa.

O campo de temperaturas gerado pela simulação é ilustrado na Figura 4.3.

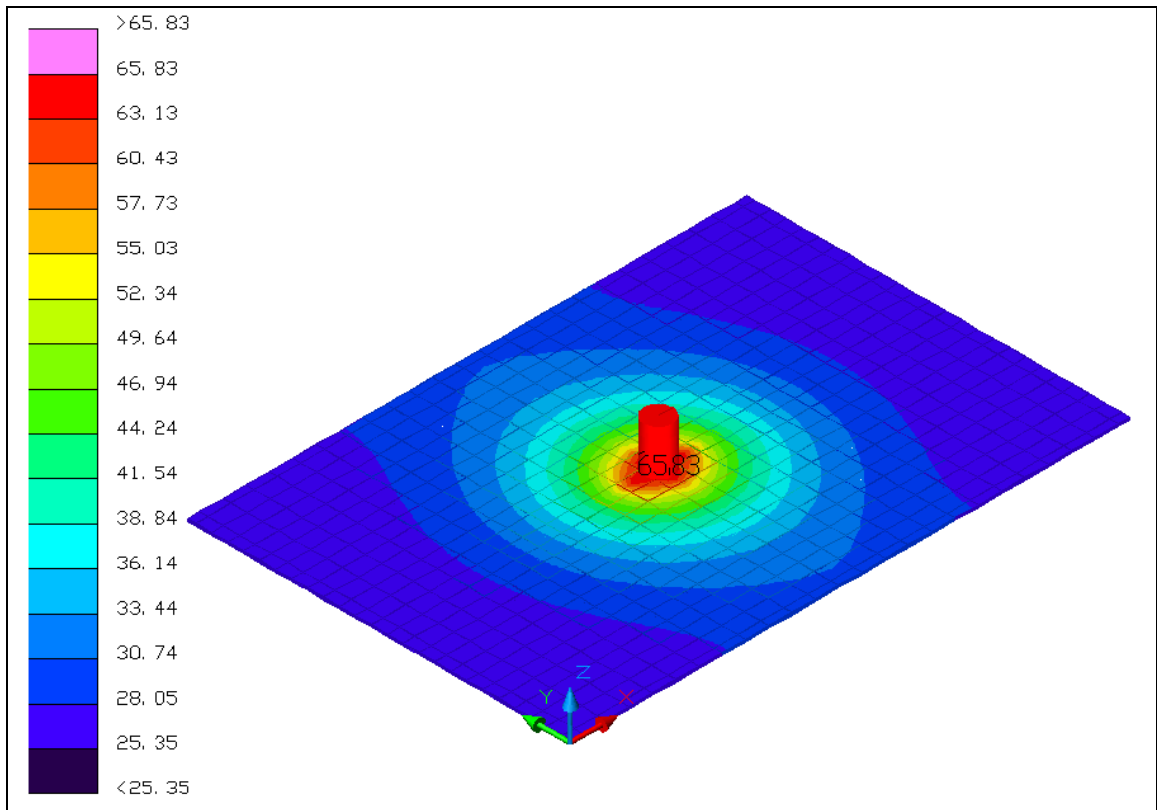


Figura 4.3 – Campo de temperaturas gerado pela simulação de estudo da divisão nodal no plano da PCB.

A simulação foi executada várias vezes modificando o tipo de nó (“*edge*” e “*centered*”) e o número de camadas de 10 a 35 (com passo 5) anotando a temperatura do componente dissipativo em regime permanente, sempre utilizando o método “*single matrix*”. Os resultados são mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Resultados do estudo da divisão nodal no plano da PCB.

Número de nós na direção x	Número de nós na direção y	Temperatura no elemento dissipativo – <i>centered nodes</i> (°C)	Temperatura no elemento dissipativo – <i>edge nodes</i> (°C)
10	10	54.4	52.4
15	15	78.2	86.3
20	20	68.2	67.2
25	25	70.2	71.0
30	30	73.8	73.2
35	35	72.6	75.2

Para melhor visualizar a resposta de temperatura no componente dissipativo com a mudança do número e tipo de nó no plano da plana, um gráfico com os dados da Tabela 4.2 foi traçado, Figura 4.4.

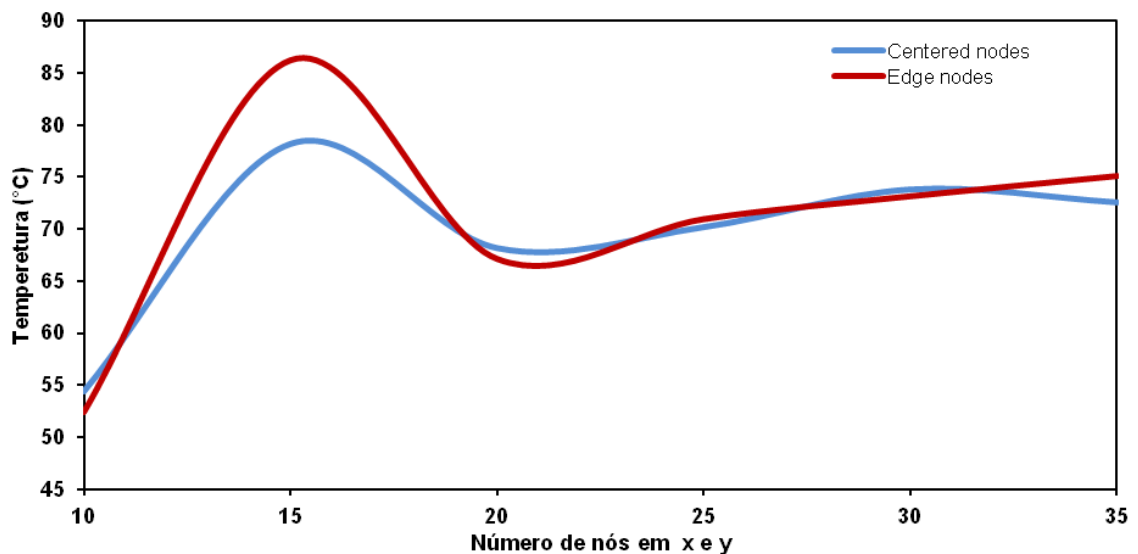


Figura 4.4 – Gráfico da temperatura pelo número de nós em x e y.

Através do gráfico é possível notar que a partir de 25 nós em x e y, as temperaturas ficam estáveis, mas acima destes valores o tempo computacional de simulação fica elevado. Portanto optou-se pela utilização da malha de 25 x 25 x 5 em todos os modelos do estudo.

### **4.3. Simulação numérica das PCBs utilizando o programa SINDA/FLUINT Thermal Desktop®**

As placas de circuito impresso foram modeladas de 3 diferentes formas: modelo detalhado, modelo simplificado isotrópico e modelo simplificado anisotrópico, os quais serão descritos detalhadamente a seguir. Para o modelamento e simulação das PCBs, o programa SINDA/FLUINT Thermal Desktop®, o qual roda sobre a plataforma AutoCAD é utilizado.

#### **4.3.1. Modelo detalhado**

Trata-se de criar um modelo da PCB com simulação direta de todas camadas, com as mesmas espessuras da placa real, sendo que as subcamadas com trilhas condutivas são consideradas homogêneas e é atribuída a condutividade do cobre multiplicada por um fator  $f_a$  que corresponde a porcentagem da área coberta. Para o contato entre as camadas, um valor de coeficiente de transferência de calor é atribuído, de  $20000 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Tal valor foi obtido através de uma análise de estabilidade com valores crescentes assumindo-se um contato praticamente perfeito entre as camadas devido ao seu processo de fabricação, onde as camadas são curadas juntas em um forno. Isso pode ser explicado pelo fato da rugosidade (aproximadamente  $15 \mu\text{m}$ ) do cobre ser preenchida com FR4 de condutividade  $0.3 \text{ W/mK}$ , resultando em uma condutância de contato de  $20000 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

As camadas tem 2 divisões no sentido z, totalizando 22 camadas numéricas para a PCB. A Figura 4.5 ilustra o modelo desta PCB que possuiu 6 camadas condutivas de cobre mais 5 camadas de FR4. O campo de temperaturas gerado pela simulação do modelo detalhado é mostrado na Figura 4.6.

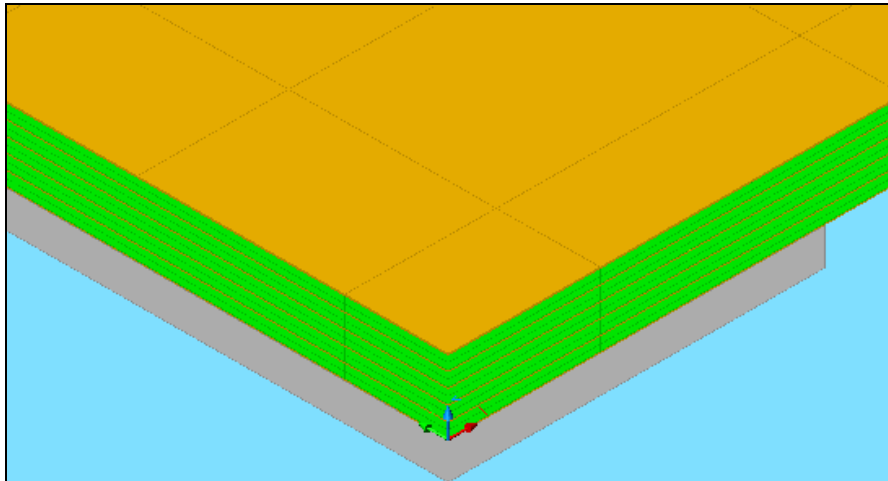


Figura 4.5 – Modelo detalhado de uma PCB de 6 camadas.

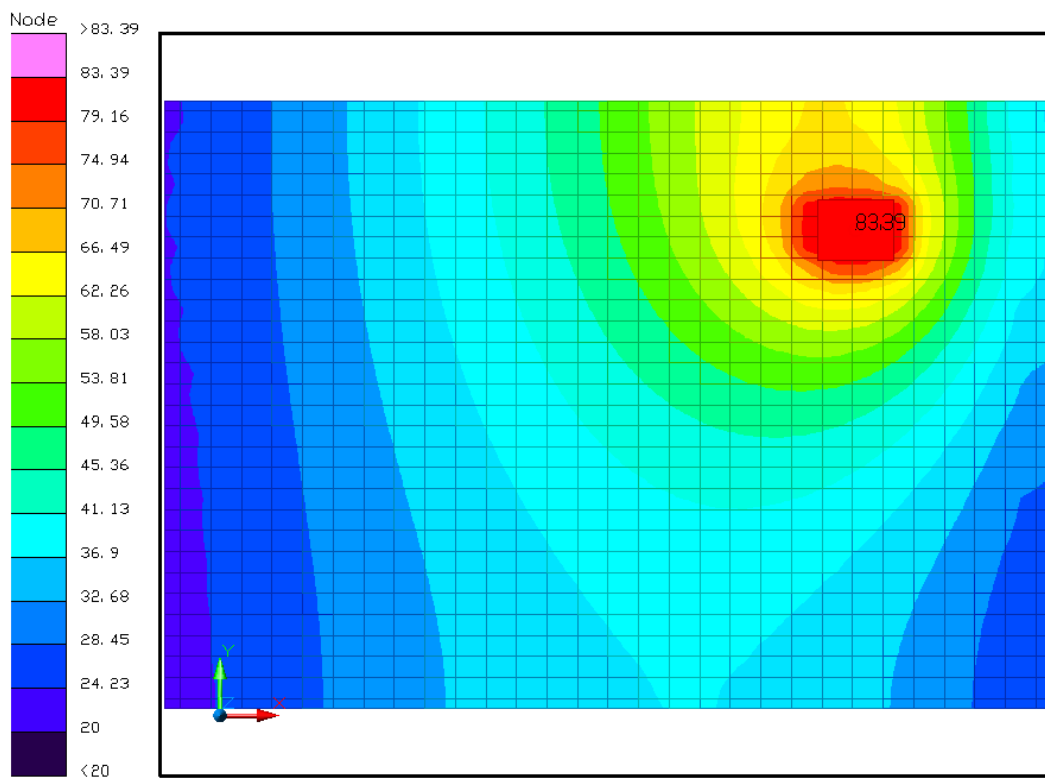


Figura 4.6 – Campos de temperaturas no modelo detalhado.



### 4.3.2. Modelo simplificado isotrópico

O modelo simplificado isotrópico consiste em uma placa de uma única camada com as mesmas dimensões da placa real, onde a espessura total é obtida através da soma das espessuras de todas as camadas. Uma condutividade térmica efetiva isotrópica  $k_{\text{eff}}$  é atribuída ao modelo e posteriormente ajustada para se atingir um comportamento térmico semelhante ao da placa de estudo. Os nós são do tipo *centered* com 5 e 25 divisões em  $N_z$  e  $N_{xy}$  respectivamente, sendo parametrizados e de modificação fácil. A Figura 4.7 mostra o modelo simplificado isotrópico de uma PCB de 6 camadas modelada usando nós do tipo *edge*. A parte inferior apresenta uma moldura que é mantida a temperatura constante, como condição de contorno. O campo de temperaturas gerado pela simulação é mostrado na Figura 4.8.

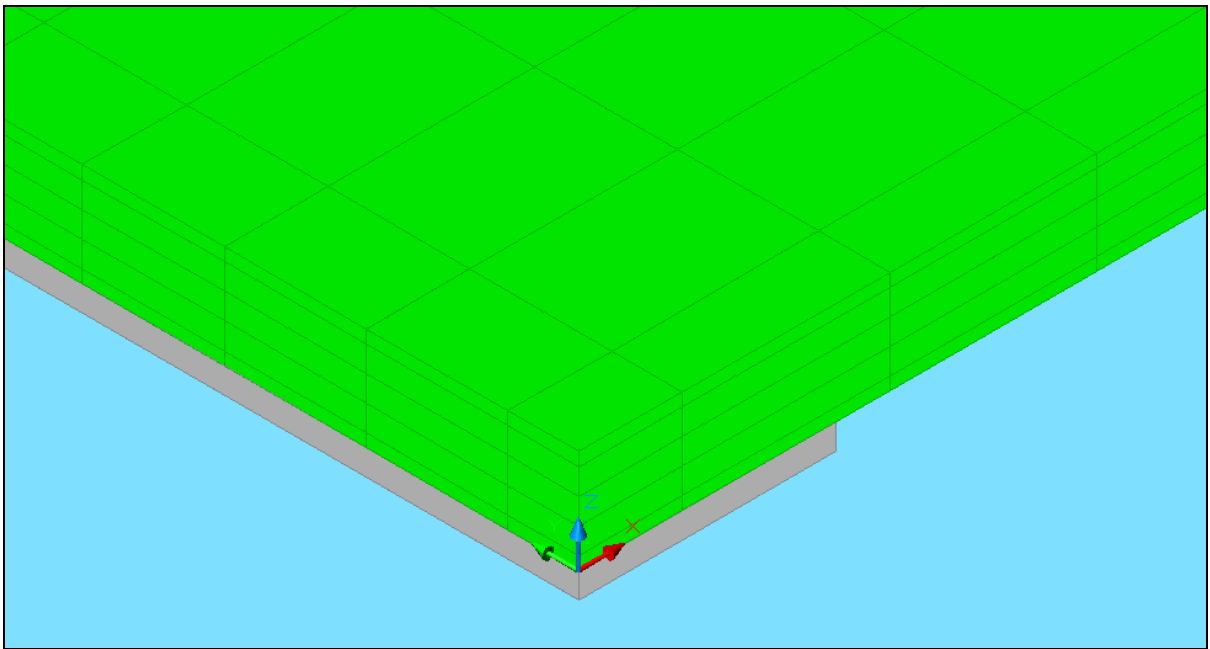


Figura 4.7 – Modelo simplificado isotrópico de uma PCB de 6 camadas.

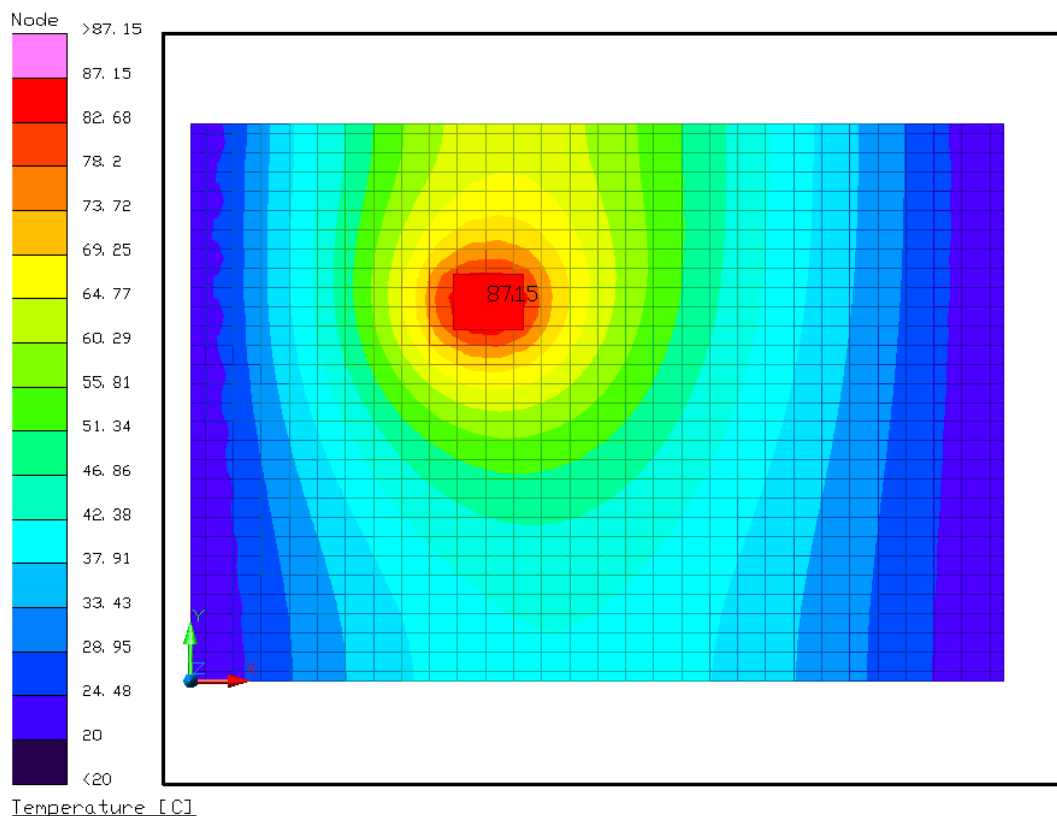


Figura 4.8 - Campos de temperaturas em um modelo simplificado isotrópico.

### 4.3.3. Modelo simplificado anisotrópico

O modelo simplificado anisotrópico tem exatamente as mesmas características do modelo simplificado isotrópico, exceto por possuir uma condutividade térmica efetiva anisotrópica, com um valor no plano da placa  $k_{p,eff}$  e outro valor no sentido normal a placa  $k_{s,eff}$ . Tais valores de condutividade também são posteriormente ajustados para que o modelo tenha um comportamento térmico próximo ao da PCB simulada por modelo detalhado. O campo de temperaturas gerado pela simulação do modelo anisotrópico é mostrado na Figura 4.9.

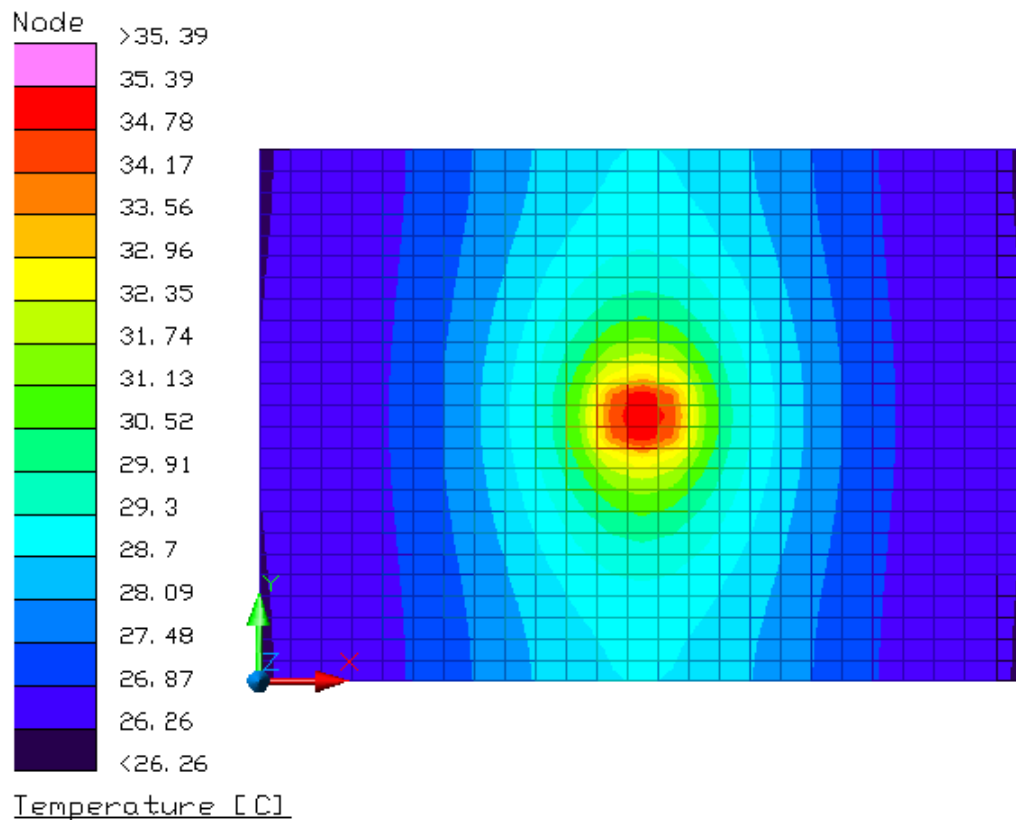


Figura 4.9 - Campos de temperaturas em um modelo simplificado anisotrópico.

#### 4.4. Validação qualitativa do modelo numérico detalhado

A fim de validar a abordagem de ajuste da condutividade térmica efetiva com modelos numéricos, os casos de estudo que utilizaram métodos analíticos apresentados por Culham et al. (2000) foram reproduzidos numericamente e posteriormente comparados. O objetivo original deste estudo foi mostrar influência do posicionamento das camadas condutivas na temperatura do componente dissipativo, entretanto sem apresentar dados experimentais.

A PCB em estudo apresentava dimensões de 50 x 50 x 1.65 mm, com 2 camadas condutivas (cobre – 400 W/mK) e 3 camadas de material dielétrico (FR4 – 0.4 W/mK). Um elemento dissipativo com dimensões 25 x 25 mm foi posicionado no centro da placa com 2.5 W de potência dissipada.

Os modelos detalhado e simplificado isotrópico para esta placa foram criados no programa SINDA/FLUINT Thermal Desktop®, onde a  $k_{eff}$  do modelo simplificado foi identificada a partir do ajuste da temperatura que havia sido atingida no elemento dissipativo quando simulado no modelo detalhado. Um exemplo dos modelos está representado na Figura 4.10.

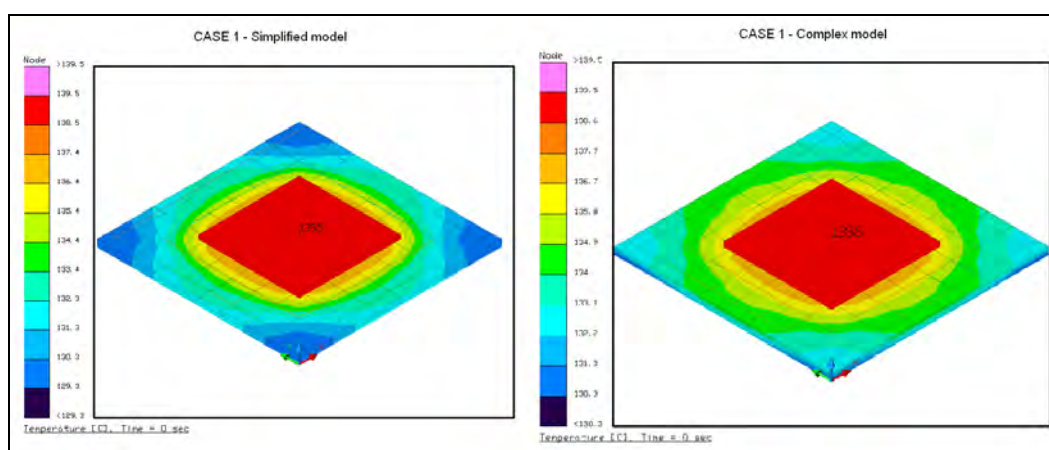


Figura 4.10 – Modelos simplificado isotrópico e detalhado apresentando os resultados da simulação.

Os 5 casos onde a posição das camadas é modificada, e que são mostrados na Tabela 4.3 foram reproduzidos na simulação. Os resultados são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.3 – Material e espessura (mm) dos 5 casos reproduzidos.

Camada	Caso				
	1	2	3	4	5
1	Cobre 0.0356	Cobre 0.0356	FR4 0.5263	FR4 0.5263	FR4 0.5263
2	Cobre 0.0356	FR4 0.5263	Cobre 0.0356	Cobre 0.0356	FR4 0.5263
3	FR4 0.5263	FR4 0.5263	FR4 0.5263	Cobre 0.0356	FR4 0.5263
4	FR4 0.5263	FR4 0.5263	Cobre 0.0356	FR4 0.5263	Cobre 0.0356
5	FR4 0.5263	Cobre 0.0356	FR4 0.5263	FR4 0.5263	Cobre 0.0356

Tabela 4.4 – Tabela comparativa dos resultados obtidos por Culham et al. (2000) e pela simulação.

Caso	Resultados obtidos por Culham et al. (2000) (W/mK)	Resultados do ajuste pelo método de simulação (W/mK)	Desvio (%)
1	15.0	10.10	32.67
2	11.5	8.30	27.83
3	8.5	5.85	31.18
4	7.5	6.25	16.67
5	5.0	3.55	29.00

De acordo com os resultados da Tabela 4.4, é possível notar que a mesma tendência é seguida para os 5 casos de comparação, entretanto os resultados obtidos pelo método de simulação apresentam valores menores. Esta diferença pode ser explicada pelo fato que o estudo original utilizou métodos analíticos com suposições muito simplificadas, o que não permite que uma adequada comparação seja realizada.

Por fim, o modelo detalhado foi validado qualitativamente e quantitativamente dentro do desvio máximo de 32.67% devido às diferentes suposições aplicadas nos métodos analítico e numérico.

#### 4.5. Identificação da condutividade térmica efetiva para um modelo simplificado utilizando um modelo detalhado

Um par conjugado de modelos é criado no programa SINDA/FLUINT Thermal Desktop®, os quais representam a mesma PCB. Um dos modelos é detalhado multicamadas enquanto o outro é simplificado isotrópico, sendo que as mesmas condições de contorno são aplicadas para ambos os modelos. Um estudo da estabilidade do valor de  $k_{eff}$  com a mudança de posição e tamanho do componente dissipativo foi realizado.

O ajuste inicia com a simulação do modelo detalhado, onde uma determinada temperatura é atingida no elemento dissipativo. Posteriormente, a simulação é executada no modelo simplificado várias vezes, modificando a condutividade térmica isotrópica  $k_{eff}$  até se atingir a mesma temperatura no elemento dissipativo, onde a  $k_{eff}$  está ajustada para que o modelo simplificado tenha um comportamento térmico semelhante ao do modelo detalhado.

Este processo matematicamente pode ser representado através da seguinte equação:

$$\min_{k_{eff}} |T_{cd} - T_{cs}| \quad (4.1)$$

onde  $k_{eff}$  – condutividade térmica efetiva da PCB no modelo simplificado

$T_{cd}$  – temperatura do componente no modelo detalhado

$T_{cs}$  – temperatura do componente no modelo simplificado

Quando a diferença de temperatura fica menor que 0.1° C, considera-se que o mínimo foi atingido.

O método de ajuste por simulação numérica descrito anteriormente foi aplicado na placa de circuito impresso PCB\_01, mostrada na Figura 4.11, que possui 6 camadas condutivas e é típica de uso espacial.

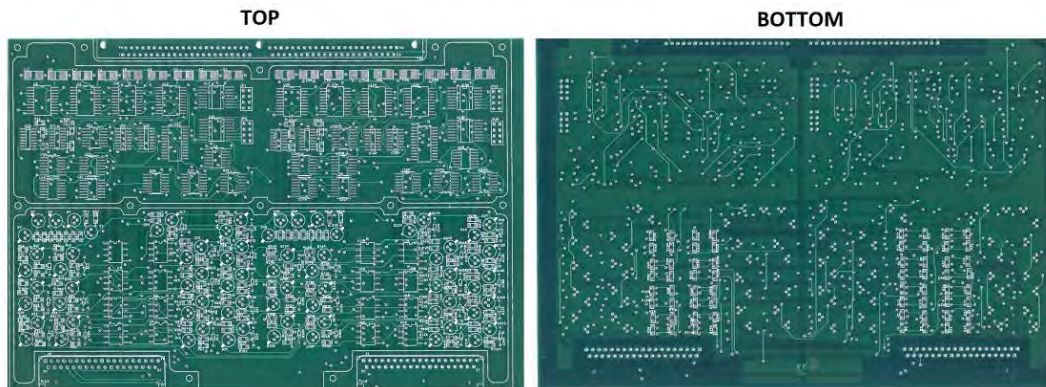


Figura 4.11 – Fotos reais das superfícies externas da PCB\_01 usada no ajuste.

A Figura 4.12 mostra o desenho das 6 camadas de cobre que foram retiradas do projeto elétrico da PCB\_01.

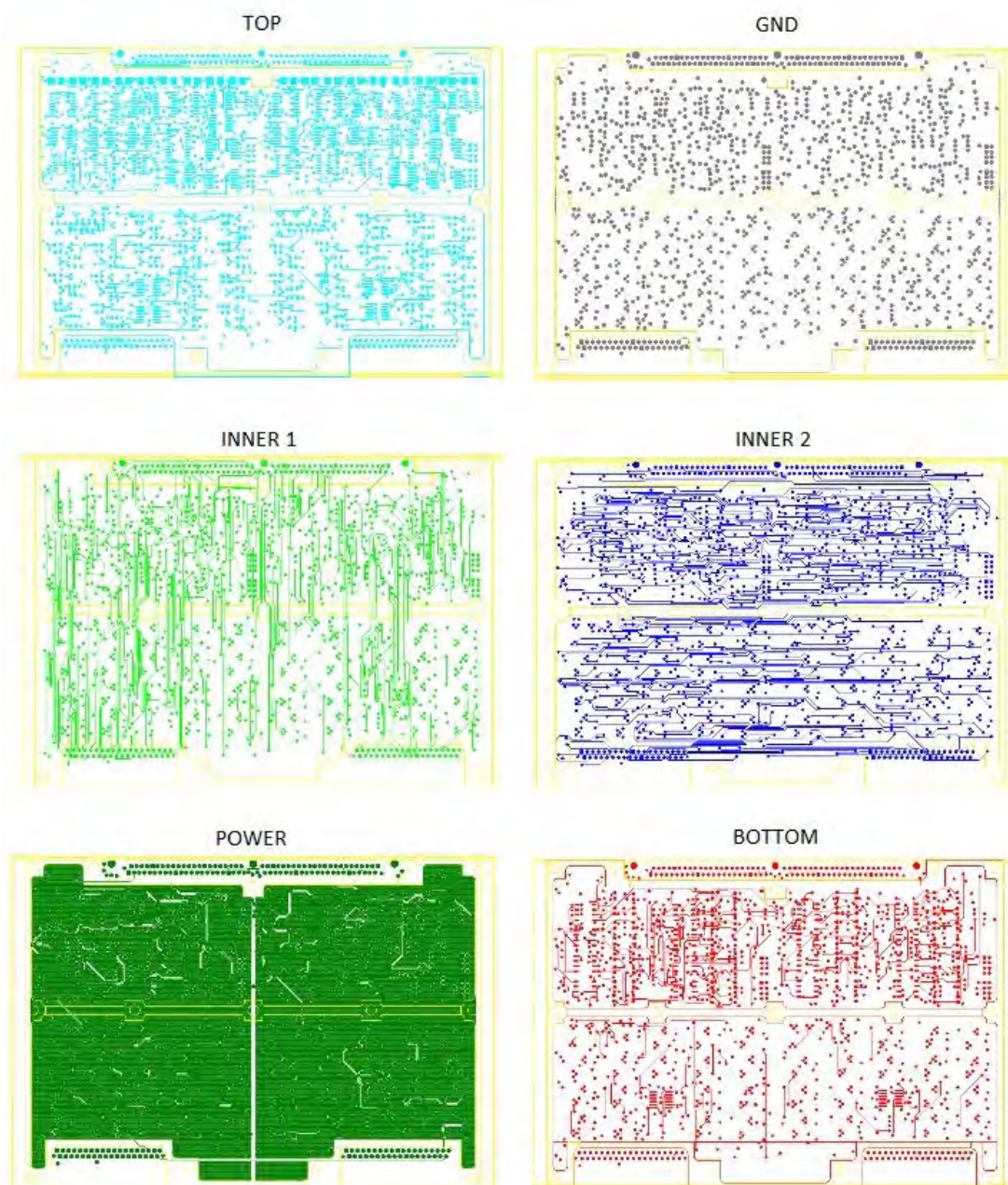


Figura 4.12 – Desenho das camadas de cobre da PCB\_01.

A espessura de cada camada foi levantada a partir do projeto elétrico da PCB e a porcentagem de área coberta por cobre em cada camada foi obtida através dos desenhos com um método de contagem de pixels e apresentada na Tabela 4.5. Tais dados foram utilizados para a criação do modelo numérico detalhado.



Tabela 4.5 – Composição das camadas do modelo detalhado.

<b>CAMADA</b>	<b>MATERIAL</b>	<b>ESPESSURA (mm)</b>	<b>CONDUTIVIDADE (W/mK)</b>
1 – top	Cobre (7%)	0.035	28.0
2 – dielectric	FR4	0.358	0.25
3 – GND	Cobre (95%)	0.035	380.0
4 – dielectric	FR4	0.358	0.25
5 – power	Cobre (2%)	0.035	8.0
6 – dielectric	FR4	0.358	0.25
7 – inner 1	Cobre (6%)	0.035	24
8 – dielectric	FR4	0.358	0.25
9 – inner 2	Cobre (8%)	0.035	32
10 – dielectric	FR4	0.358	0.25
11 – bottom	Cobre (5%)	0.035	20

Um elemento dissipativo de formato retangular com 3 diferentes dimensões foi criado e posicionado em 13 diferentes posições e 3 valores de  $k_{eff}$  foram ajustados para cada posição. A Figura 4.13 mostra as posições em que o elemento foi simulado. O eixo X é aplicado no sentido horizontal enquanto o Y é aplicado no sentido vertical. A única condição de contorno no modelo foram 2 molduras mantidas a temperatura constante de 20°C posicionadas na parte inferior da placa nas 2 extremidades horizontais, ao longo do eixo Y.

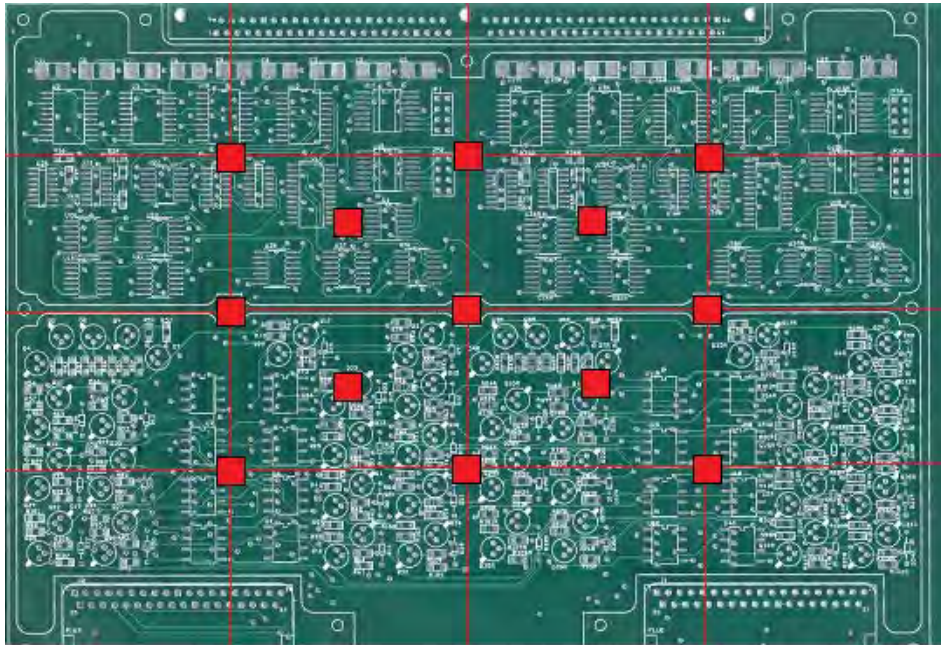


Figura 4.13 – 13 posições em que o elemento (com 3 tamanhos) foi colocado.

Após o ajuste, a média e desvio padrão da  $k_{\text{eff}}$  foram calculados e são mostrados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Resultado do ajuste de  $k_{\text{eff}}$  para as 13 posições.

<b>Posição</b>	<b>Média da <math>k_{\text{eff}}</math> (W/mK)</b>
1	7.482
2	8.087
3	7.452
4	7.550
5	8.066
6	7.497
7	7.530
8	8.107
9	7.489
10	7.868
11	7.998
12	7.862
13	7.995

Com os dados da Tabela 4.6, calcula-se que a incerteza para 2 desvios padrões da média ( $2\sigma$ ) é de aproximadamente  $\pm 6.4\%$ . Esta incerteza deve ser levada em consideração quando usado o modelo simplificado isotrópico com as condições de contorno semelhantes às deste estudo.

A fim de melhor observar alguma tendência, desenhou-se um gráfico da média da  $k_{\text{eff}}$  identificada através do ajuste dos modelos para cada posição relativa pela posição horizontal (eixo x), a partir do ponto central da placa, Figura 4.14.

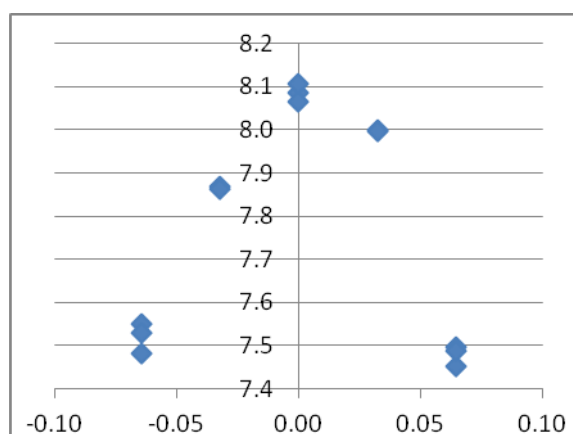


Figura 4.14 - Ajuste da  $k_{\text{eff}}$  pela posição horizontal do elemento dissipativo (eixo vertical no gráfico - é condutividade efetiva, W/mK; eixo horizontal - posição relativa, m).

Na Figura 4.14, observa-se claramente a tendência da  $k_{\text{eff}}$  ser maior quando o elemento dissipativo é posicionado no centro da PCB e conseqüentemente mais longe das molduras.

Essa tendência ocorre porque o modelo detalhado possui várias camadas e a sua condutividade se torna anisotrópica. Quando o elemento é posicionado próximo as molduras mantidas a temperatura fixa, a sua  $k_{\text{eff}}$  é mais afetada pela condutividade transversal ao plano  $k_s$  do que pela condutividade no plano  $k_p$ . Uma vez que  $k_p > k_s$ , a  $k_{\text{eff}}$  próxima as molduras é artificialmente reduzida.

Este estudo trás uma conclusão importante, a de que se deve adicionar uma faixa adicional da incerteza de aproximadamente  $\pm 6.5\%$  aos valores de  $k_{\text{eff}}$

devido à influência do posicionamento de componente no caso em que as condições de contorno representam a fixação da placa sobre molduras, o que é muito comum em PCBs que fazem parte de equipamentos de uso espacial.

#### 4.6. Estudo da influência de tamanho de componente

Como citado anteriormente, criou-se um elemento dissipativo para simular um componente eletrônico com 3 diferentes dimensões: o primeiro com formato quadrado cobrindo uma célula numérica (Tamanho 1), o segundo com formato retangular cobrindo 2 células numéricas (Tamanho 2) e o terceiro de formato quadrado cobrindo 4 células numéricas (Tamanho 3). Este elemento foi posicionado em 13 diferentes posições e 3 valores de  $k_{\text{eff}}$  foram ajustados para cada posição, Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Resultados para todas as posições variando o tamanho do componente.

Posição	Tam. 1 (W/mK)	Tam. 2 (W/mK)	Tam. 3 (W/mK)	Desvio padrão (W/mK)	Desvio (%)
1	7.73	7.36	7.36	0.21	2.84
2	8.26	7.98	8.02	0.15	1.87
3	7.70	7.33	7.33	0.21	2.82
4	7.96	7.49	7.21	0.38	5.00
5	8.28	8.00	7.81	0.23	2.92
6	7.86	7.44	7.19	0.34	4.56
7	7.91	7.47	7.22	0.35	4.64
8	8.40	8.05	7.87	0.27	3.33
9	7.85	7.43	7.20	0.33	4.40
10	8.11	7.83	7.67	0.22	2.79
11	8.15	8.01	7.84	0.15	1.92
12	8.10	7.82	7.66	0.22	2.82
13	8.15	8.01	7.84	0.15	1.94

Observa-se que a incerteza devido a influência do tamanho do componente é de aproximadamente  $\pm 3.2\%$ , considerada uma influência bastante pequena e não será utilizada no ajuste experimental, por se tratar de um fenômeno numérico.

#### **4.7. Estudos adicionais de influência de parâmetros numéricos de simulação**

A fim de se obter resultados estáveis nas simulações numéricas utilizando o programa SINDA/FLUINT Thermal Desktop®, além do estudo dos nós na direção z e no plano previamente apresentado, investigações adicionais de parâmetros de modelamento e simulação foram realizadas.

Os resultados são apresentados abaixo:

- a) Para placas com condutividades altas, como foi o caso do ajuste com placa de Alumínio 5052, os métodos iterativos não apresentam resultados confiáveis a menos que um critério de convergência muito pequeno seja atribuído. É recomendável a utilização do método “*single matrix*”, mesmo que demande mais recurso computacional;
- b) Para PCBs em geral, os métodos iterativos apresentam resultados confiáveis com passo de simulação igual ou menor que 0.05 segundos com modelo isotrópico e 0.1 segundos com modelos anisotrópicos;
- c) Foram verificados todos os métodos numéricos embutidos no SINDA para simulação PCBs. A diferença de temperatura no componente nos testes numéricos para placas com condutividades entre 2 e 20 W/mK ficou dentro de 1°C com a mudança dos métodos.
- d) Foram conduzidas simulações em modos transiente longo e “*steady-state*”. A diferença de temperatura do componente nos 2 tipos de testes

numéricos ficou dentro de 1°C. Este resultado valida a escolha correta dos parâmetros numéricos usados na simulação.



## **5 CONFIGURAÇÃO DOS TESTES EXPERIMENTAIS**

Neste capítulo, são descritos os 3 tipos de testes experimentais considerados no estudo para identificação da condutividade térmica efetiva em PCBs. São eles, teste em regime permanente em ambiente convectivo, teste transiente em ambiente convectivo e teste transiente em vácuo. Para implementar estes métodos principais existe a necessidade de se fazer experimentos preliminares para determinar alguns parâmetros de configuração, os quais podem gerar incertezas indesejadas no modelamento numérico. Estes parâmetros são: resistência de contato aquecedor/placa e placa/isopor®, fatores de coeficiente de troca de calor por convecção natural e condutividade térmica do isopor®.

O procedimento de ajuste de fatores de convecção natural e resistências de contato foi realizado utilizando placa de alumínio 5052. A determinação da condutividade térmica do isopor® (EPS) foi realizada através de um teste transiente separado. Além disso, é apresentado o procedimento para confecção de termopares do tipo T os quais foram utilizados para medir temperaturas em todos os testes experimentais.

### **5.1. Confecção de termopares do tipo T**

Termopares do tipo T foram utilizados em todos os testes experimentais para medir as temperaturas nas placas. Este tipo de termopar tem uma junção bimetalica de cobre e constantan, Figura 5.1.





Figura 5.1 – Fios de cobre e constantan para confecção de termopares do tipo T e equipamento de solda.

Primeiramente, os dois fios são trançados a fim de mantê-los unidos, então pega-se a parte sem isolamento com o alicate do equipamento de solda de termopares e se posiciona a ponta a ser soldada no eletrôdo do equipamento (Figura 5.1), onde os metais se fundem formando uma esfera unindo firmemente os dois metais.

Após a soldagem do termopar, ele deve ser montado em um conector específico que vai fazer parte da interface com o equipamento de aquisição de dados de temperatura, Figura 5.2.

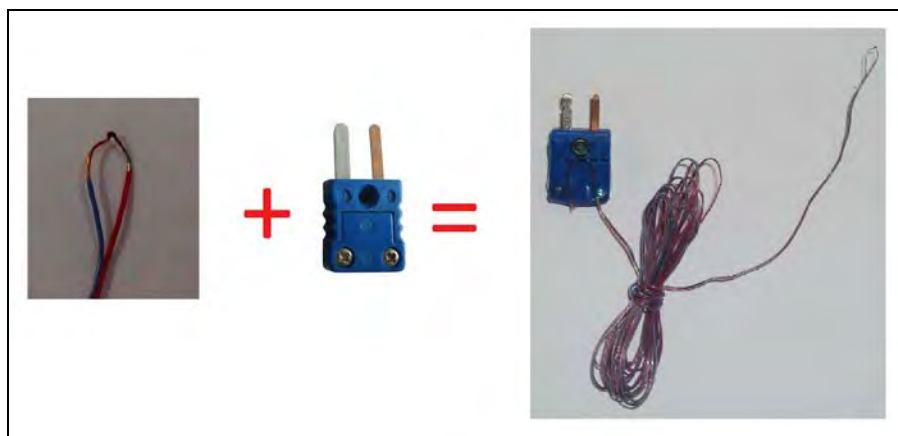


Figura 5.2 – Confeção de termopar do tipo T.

A fiação dos termopares é de calibre 30 AWG (0.25 mm) fornecido pelo fabricante com qualificação espacial Omega, o que elimina a necessidade de calibração adicional. Entretanto a calibração do “slot” do equipamento de aquisição de dados foi confirmada através da verificação das medidas de igualdade de temperaturas em condições normais de ambiente (23°C) e usando banho de gelo (0°C). O desvio máximo entre termopares foi de aproximadamente  $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ .

## 5.2. Ajustes de convecção e contatos com placa de Al 5052

A fim de minimizar as incertezas de convecção natural e contatos no modelo numérico, alguns ajustes utilizando uma placa com material conhecido, alumínio 5052 com as seguintes propriedades: condutividade térmica  $k= 138 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ ; calor específico  $c_p= 880 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$  e densidade  $\rho= 2680 \text{ kg/m}^3$ , Matweb (2012). Dois testes experimentais foram realizados.

### 5.2.1. Ajuste para teste em regime permanente

Neste teste, o objetivo foi ajustar o contato entre o aquecedor/placa através de graxa térmica e o coeficiente de troca de calor por convecção natural na face

superior da PCB no teste em regime permanente. O teste experimental utilizou uma placa de alumínio 5052 com dimensões 245 x 170 x 2 mm e foi realizado para 3 patamares de potência no aquecedor: 1.5 W, 2.25 W e 3 W. Os parâmetros incôgnitas foram identificados por comparação com resultados de simulação através de um modelo numérico por ajuste destes valores.

Como resultado, o contato ajustado entre o aquecedor (com pasta térmica) e a placa foi de  $10000 \text{ W/m}^2\text{°C}$ , que corresponde a espessura média  $\sim 0.1 \text{ mm}$  da pasta térmica. A troca de calor por convecção natural revelou-se um pouco menor no teste experimental do que no caso idealizado de convecção a partir de superfície horizontal com resfriamento por cima embutido no pacote SINDA/FLUINT. O fator de ajuste igual a 0.85 ao coeficiente de transferência de calor no modelo numérico apresentou melhor resultado para se atingir o mesmo comportamento térmico de experimento. A Figura 5.3 mostra uma imagem do experimento.

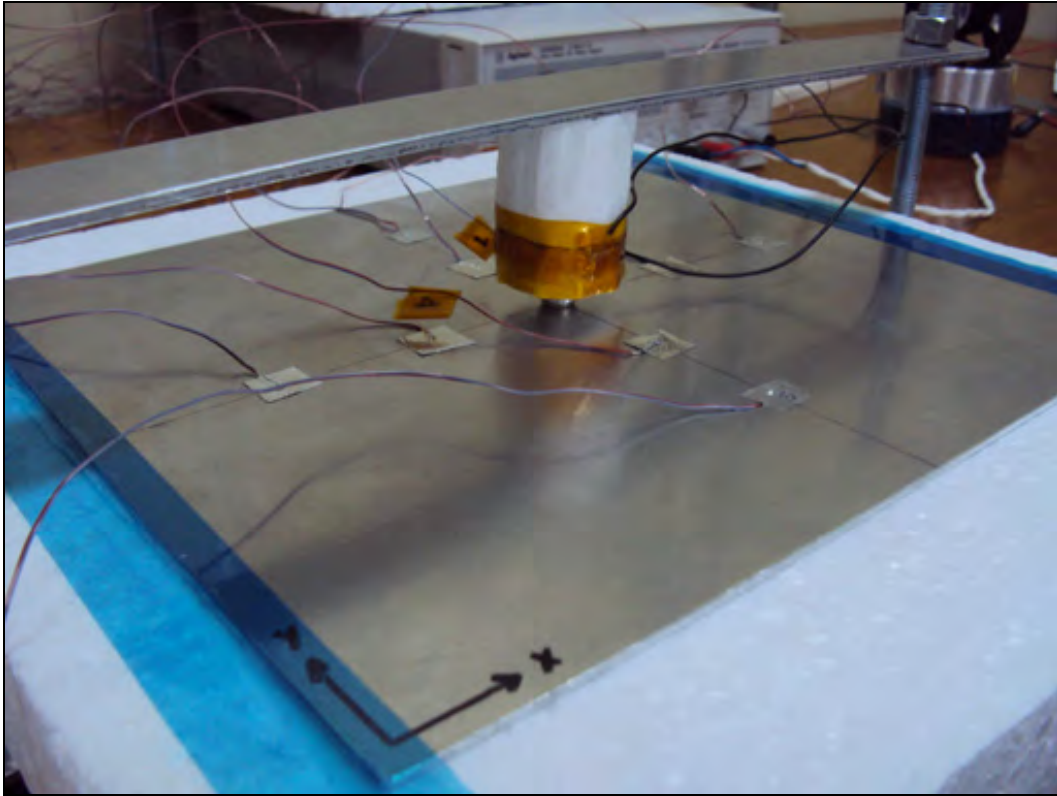


Figura 5.3 – Imagem do teste de ajuste com placa de alumínio 5052.

A Figura 5.4 mostra um esquema em corte de aquecedor elétrico utilizado com todas as dimensões. O mesmo aquecedor é utilizado nos outros testes.

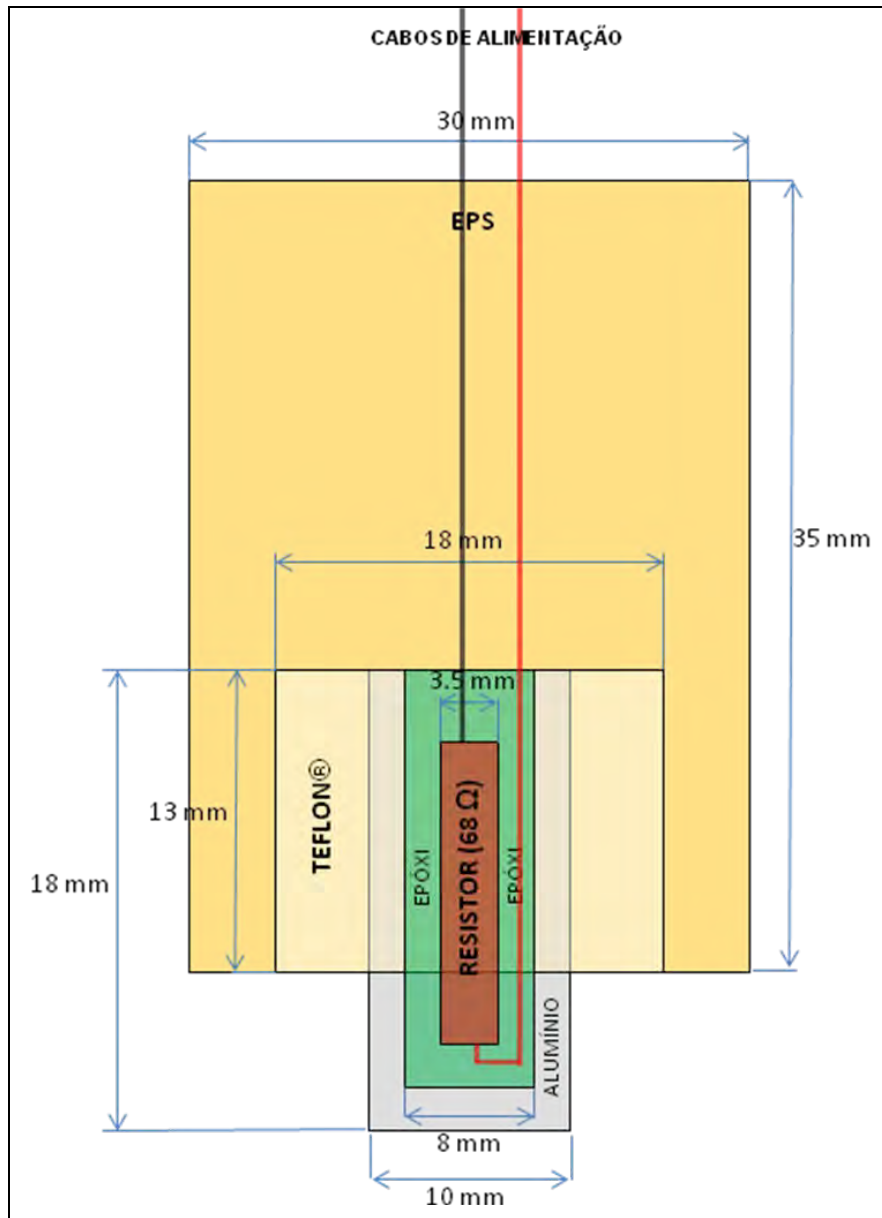


Figura 5.4 – Esquema de montagem do aquecedor elétrico.

### 5.2.2. Ajuste para testes em regime transiente

O outro teste realizado teve o objetivo de ajustar os valores de contatos entre o aquecedor/PCB e entre PCB/isopor®, usando mesma configuração experimental (Figura 5.3). Desta vez, o teste experimental foi realizado em regime transiente com o aquecedor ligado por 2400 segundos e desligado por

600 segundos, com potência 1 W, gerando o gráfico mostrado na Figura 5.5 que foi posteriormente comparado e ajustado com o modelo numérico.

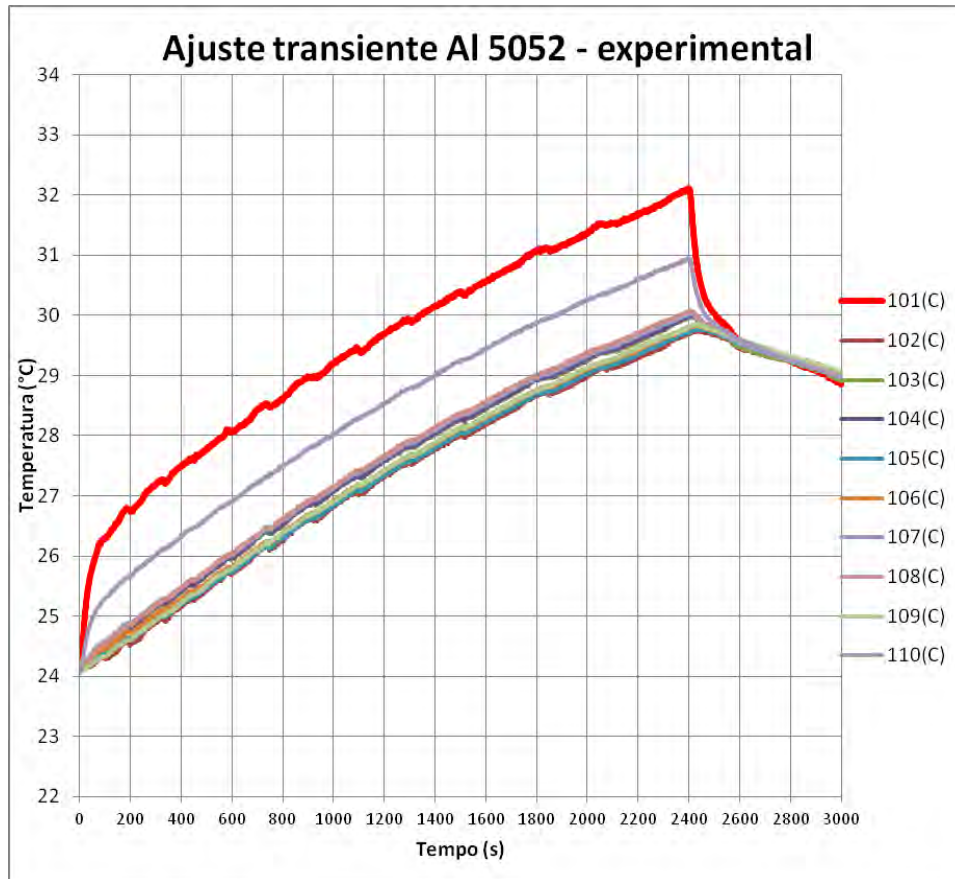


Figura 5.5 – Temperaturas do teste experimental transiente com placa de Al 5052.

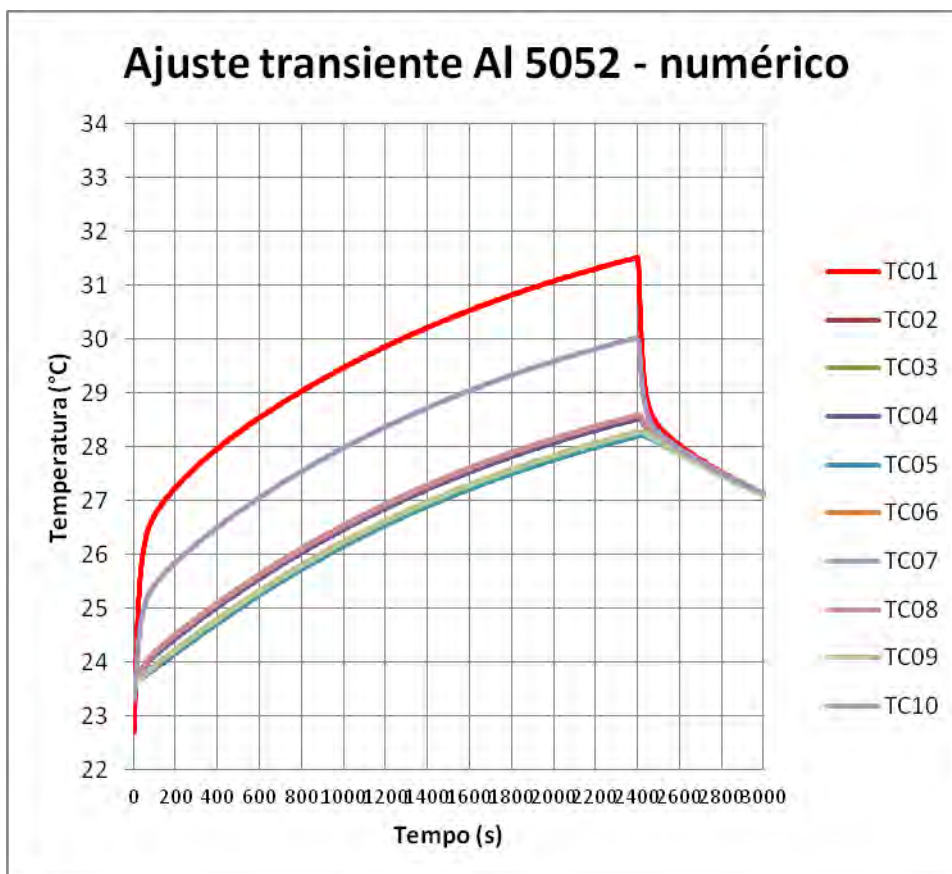


Figura 5.6 – Temperaturas do ajuste com simulação do modelo numérico da placa de Al 5052.

Para ter maior garantia de que o modelo numérico estava com os contatos ajustados adequadamente, foi realizado um estudo comparativo entre as curvas das derivadas ( $dT/dt$ ) quando o aquecedor é desligado. Neste período a temperatura na PCB fica homogênea, ou seja, as curvas de temperaturas nos sensores se aproximam, o que permite desconsiderar os efeitos de aquecimento local de aquecedor, e perceber somente o efeito de resfriamento através da isolação a partir de toda a área da placa, que possui a temperatura homogeneizada a cada instante de tempo. O intervalo escolhido foi de 2800 a 3000s. A Figura 5.7 mostra a comparação entre os valores das derivadas experimentais e numéricas.

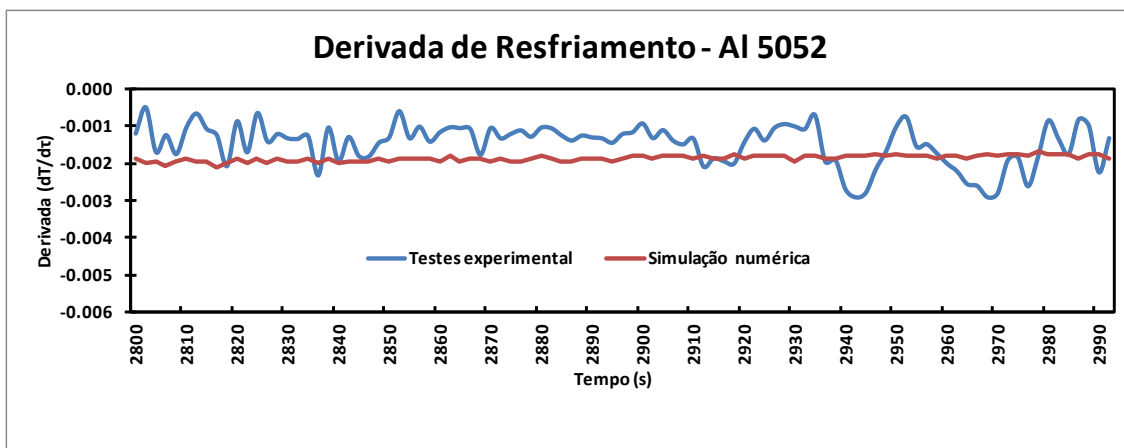


Figura 5.7 – Gráfico das derivadas das curvas de temperaturas em regime de resfriamento.

O gráfico mostra boa coincidência entre as derivadas experimentais e de simulação numérica. Os resultados obtidos para contatos aquecedor/PCB e PCB/isopor® foram respectivamente  $10000 \text{ W/m}^2\text{°C}$  (que coincidiu com resultado de teste anterior no teste com convecção natural) e  $10 \text{ W/m}^2\text{°C}$ .

### 5.3. Medida da condutividade térmica do poliestireno expandido (Isopor®) utilizado nos testes

As propriedades para o poliestireno expandido (Expanded Polystyrene - EPS), ou Isopor® disponíveis na literatura apresentam grandes variações, pois depende muito da tecnologia e de densidade final. Para fazer a medição da condutividade térmica do material isolante usado, utilizado em todos os experimentos, um teste foi preparado com duas placas iguais do EPS de dimensões  $310 \times 230 \times 50 \text{ mm}$  cada placa. As placas do isolante foram instrumentadas com 4 termopares posicionados simetricamente. Um “*skin-heater*” com as mesmas dimensões do material foi posicionado entre as placas, com uma potência dissipada de  $7.05 \text{ W}$ . A configuração do teste é mostrada na Figura 5.8.



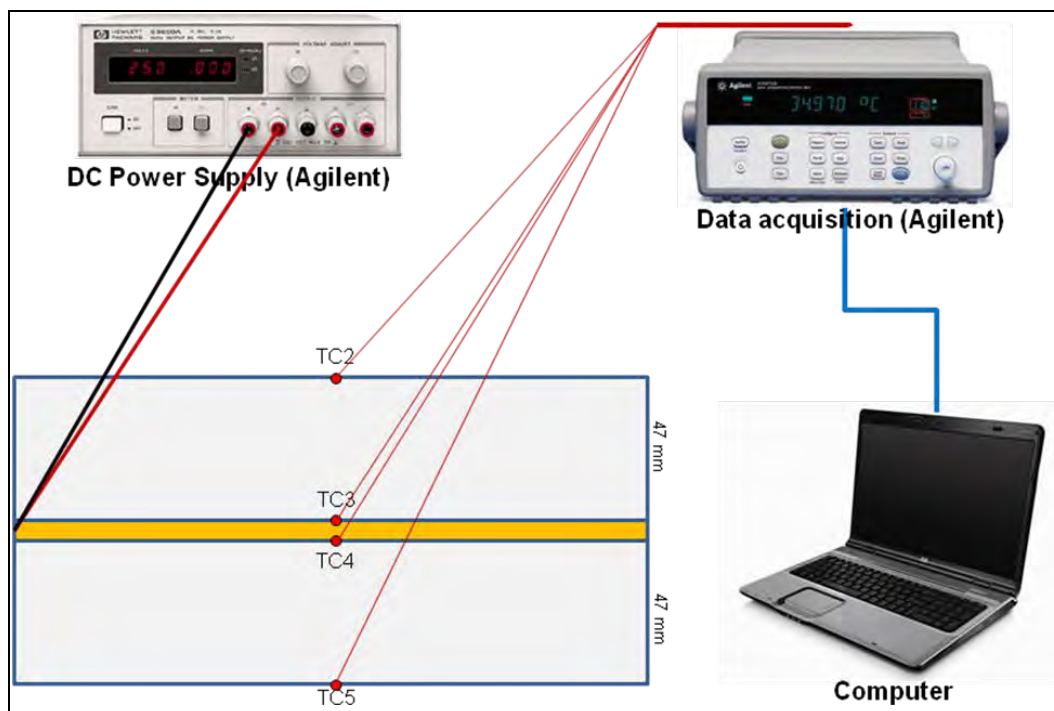


Figura 5.8 – Configuração do teste para medir a condutividade do EPS.

O teste foi realizado em regime permanente, ou seja, esperou-se que todas as temperaturas monitoradas pelos termopares se estabilizassem, Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Temperaturas medidas.

Termopar	Temperatura (°C)
TC2	27.1
TC3	64.2
TC4	64.4
TC5	28.1
ambiente	21.9

A equação básica de Fourier na forma integral da condução de calor foi utilizada (Equação 5.1).

$$Q = \frac{Ak}{L}(T_2 - T_1) \quad (5.1)$$

Aplicando-a para o sistema em questão, temos a Equação 5.2 de balanço (conservação de energia):

$$Q = Ak \left[ \frac{(T_3 - T_2)}{L} + \frac{(T_4 - T_5)}{L} \right] \quad (5.2)$$

onde: Q= potência dissipada no *skin-heater* (W)

A= área da seção transversal do EPS (m<sup>2</sup>)

k= condutividade térmica do EPS (W/(m°C))

L= espessura da isolamento EPS (m)

T<sub>2</sub>= temperatura em TC2 (°C)

T<sub>3</sub>= temperatura em TC3 (°C)

T<sub>4</sub>= temperatura em TC4 (°C)

T<sub>5</sub>= temperatura em TC5 (°C)

A área transversal de cada placa do isopor é A= 0.71 m<sup>2</sup> e a espessura L= 0.05 m. Uma imagem do aparato de teste é mostrada na Figura 5.9.

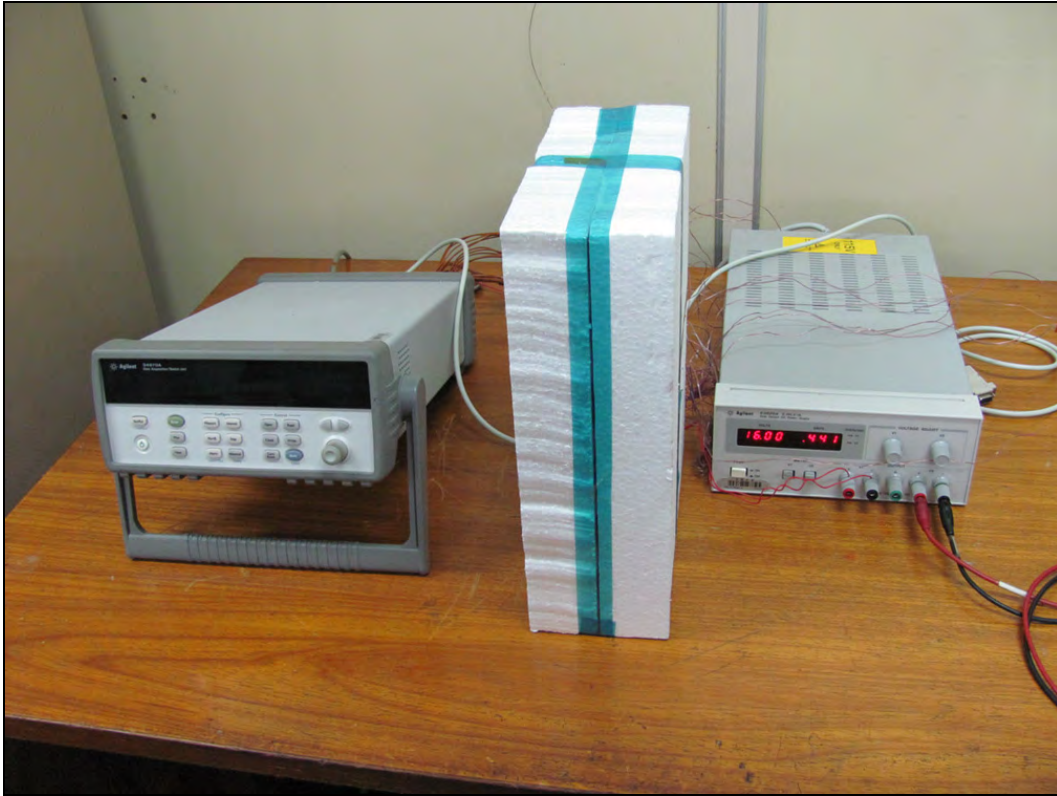


Figura 5.9 – Imagem do aparato de teste para determinação da condutividade do EPS.

O valor da condutividade térmica está definida pela a equação:

$$k = \frac{Q}{A \left[ \frac{(T_3 - T_2)}{L} + \frac{(T_4 - T_5)}{L} \right]} \quad (5.3)$$

A condutividade térmica do isopor calculada a partir de dados experimentais apresentou o valor  $k = 0.063 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ , o qual está de acordo com valores encontrados na literatura.

#### **5.4. Testes de PCBs em regime permanente em ambiente convectivo**

Estes testes são usados para se obter dados experimentais com o objetivo de determinar os valores das condutividades térmicas efetivas de PCBs usando modelo numérico que simula exatamente esta configuração experimental. No teste de regime permanente, a placa é termicamente isolada do ambiente apenas na face inferior, havendo a possibilidade de troca de calor por convecção natural com o ar ambiente pelas laterais e face superior da placa (Figura 5.11). O isolamento é feito com Isopor® (EPS). A PCB de estudo é colocada sobre um bloco de EPS com 5 cm de espessura, 9 termopares são fixados com fita de alumínio diretamente na face oposta à de aquecimento para realizar a medida das temperaturas durante o teste. Um elemento dissipativo cilíndrico é firmemente posicionado na superfície da placa a fim de simular um componente eletrônico em funcionamento, a sua potência é controlada por uma fonte modelo E3620A (*Dual Output DC Power Supply: 0 – 25 V, 0 – 1 A*) da fabricante Agilent. Um dispositivo de aquisição de dados modelo 34970A (*Data Acquisition/Switch Unit*) da Agilent é utilizado para fazer a leitura das temperaturas nos termopares. Neste teste, o principal objetivo é a obtenção das temperaturas nos locais com sensores quando um equilíbrio de energia for atingido no sistema, ou seja, em regime permanente. A Figura 5.10 mostra o esquema da configuração do teste e a Figura 5.11 mostra uma imagem do aparato de teste.

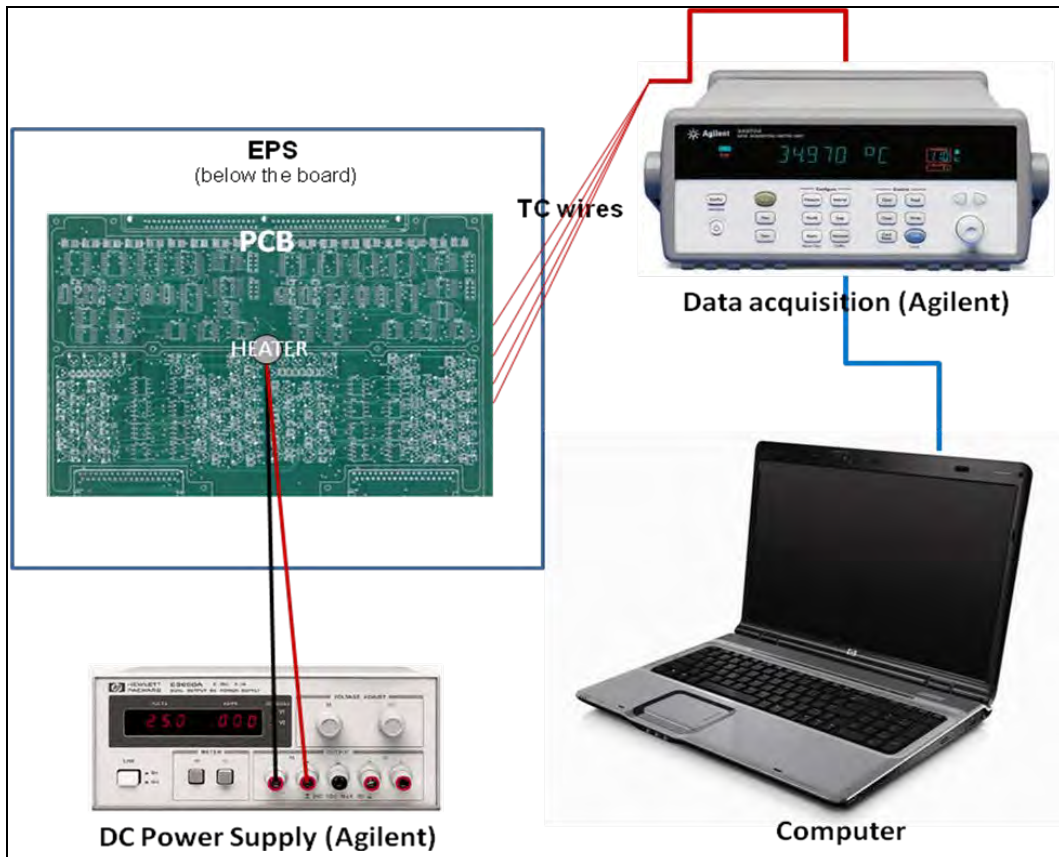


Figura 5.10 – Esquema do teste em regime permanente em ambiente convectivo.

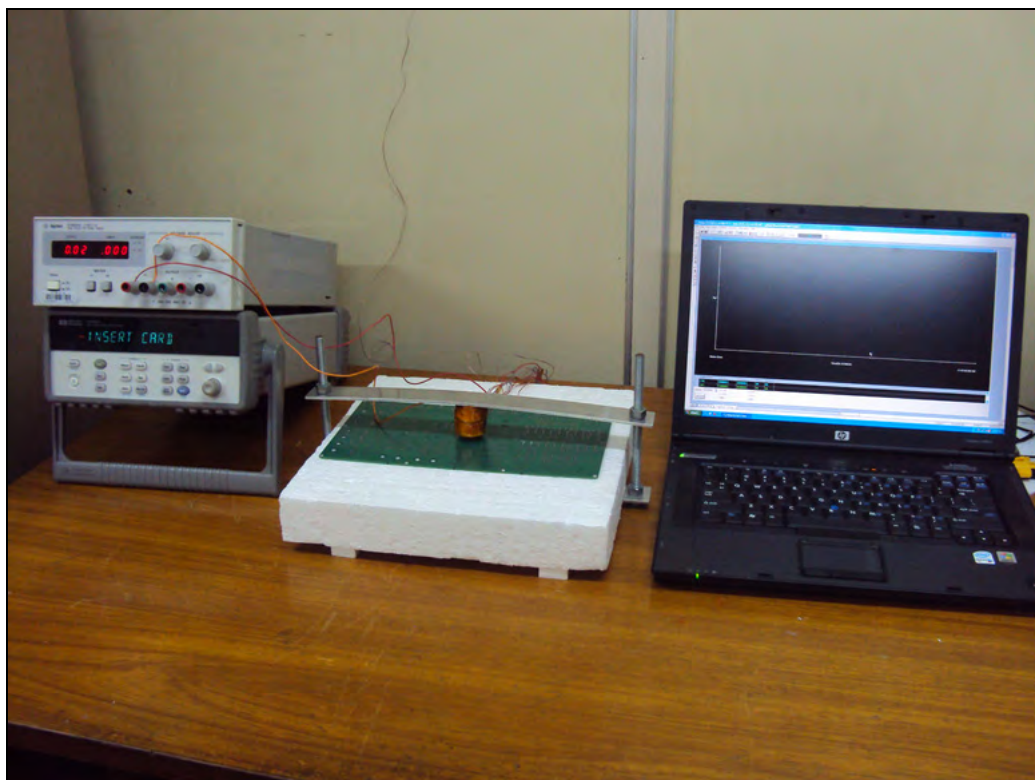


Figura 5.11 – Configuração do teste em regime permanente em ambiente convectivo.

### **5.5. Testes de PCBs transiente em ambiente convectivo**

Estes testes são usados para se obter dados experimentais para se determinar posteriormente os valores de condutividades térmicas efetivas de PCBs usando modelo numérico simulando exatamente esta configuração experimental. No teste em regime transiente em ambiente convectivo, a configuração do teste minimizará a troca de calor por convecção da placa com o ar ambiente, uma vez que a placa é totalmente coberta com blocos de EPS e testada a pressão atmosférica. A simulação do componente dissipativo também é feita através do bloco aquecedor cilíndrico firmemente posicionado na superfície da placa através de graxa térmica. A medida das temperaturas ao longo da placa também é realizada com o uso de termopares do tipo T ligados ao equipamento de aquisição de dados da Agilent conectado a um computador. Neste teste, o principal objetivo é obter a curva de temperatura no tempo tanto durante o aquecimento, como após desligamento do aquecedor. A Figura 5.12 mostra o esquema da configuração do teste e a Figura 5.13 mostra uma

imagem do aparato de teste. Neste teste, as temperaturas são monitoradas com o aquecedor ligado durante 2400s e mais 600s desligado, totalizando 3000s de teste.

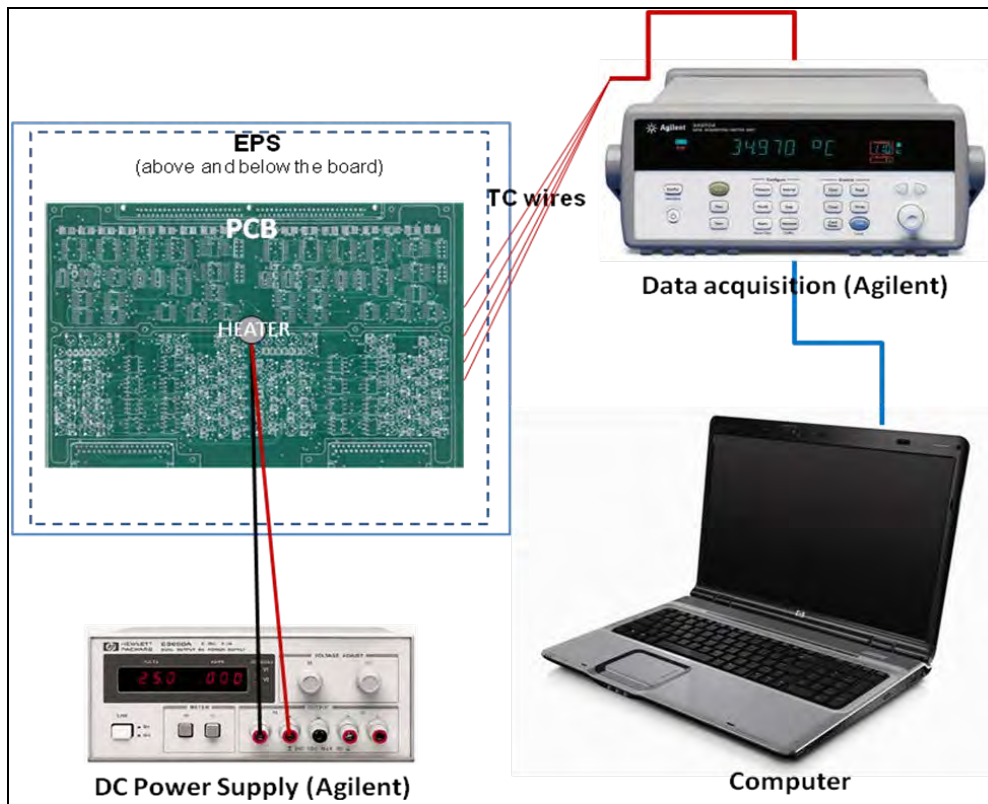


Figura 5.12 - Esquema do teste transiente em ambiente convectivo.



Figura 5.13 – Configuração do teste transiente em ambiente convectivo.

### **5.6. Teste de PCBs transiente em ambiente de vácuo**

Estes testes são usados para se obter dados experimentais para posteriormente identificar os valores de condutividades térmicas efetivas de PCBs que melhor ajustam o modelo numérico que simula exatamente esta configuração experimental e para validar os resultados obtidos pelos outros métodos. No teste transiente em vácuo, a placa é totalmente coberta com fita kapton® e posteriormente coberta com fita de alumínio e submetida a vácuo dentro de uma campânula, Figura 5.14. Assim a troca de calor por convecção é praticamente desprezível. A troca de calor por radiação é bastante minimizada devido a emissividade muito baixa da fita de alumínio polida brilhante ( $\epsilon = 0.03$ ).



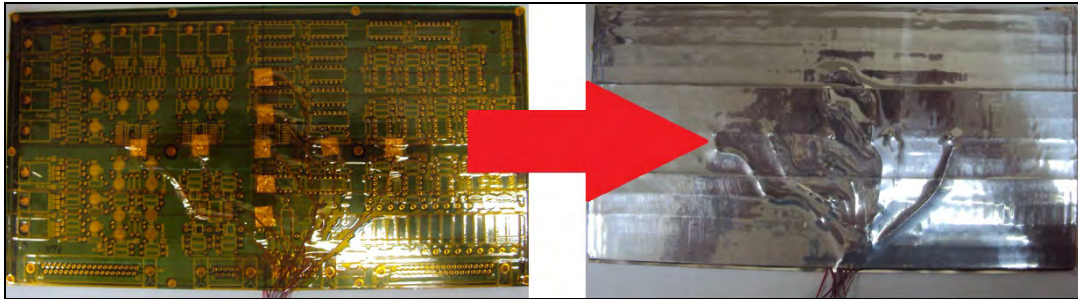


Figura 5.14 – PCB coberta com fita kapton® e fita de alumínio.

A simulação do componente dissipativo desta vez é feita através de um “*skin-heater*” de formato quadrado colado na superfície da placa. Uma fonte de corrente contínua, de tensão regulável fornece a potência desejada no “*skin-heater*”. A medida das temperaturas ao longo da placa também é realizada com o uso de termopares do tipo T instalados diretamente no superfície da placa e cobertos por fitas de Kapton e alumínio. Neste teste, o principal objetivo é avaliar as curvas de temperatura da PCB no tempo. A Figura 5.15 mostra a configuração do teste e a Figura 5.16 mostra uma imagem do aparato de teste. Neste teste, as temperaturas são monitoradas com o aquecedor ligado durante 2400s e mais 600s desligado, totalizando 3000s de teste. A bomba de vácuo mecânica fornece pressão em torno de  $10^{-2}$  torr dentro de campânula.

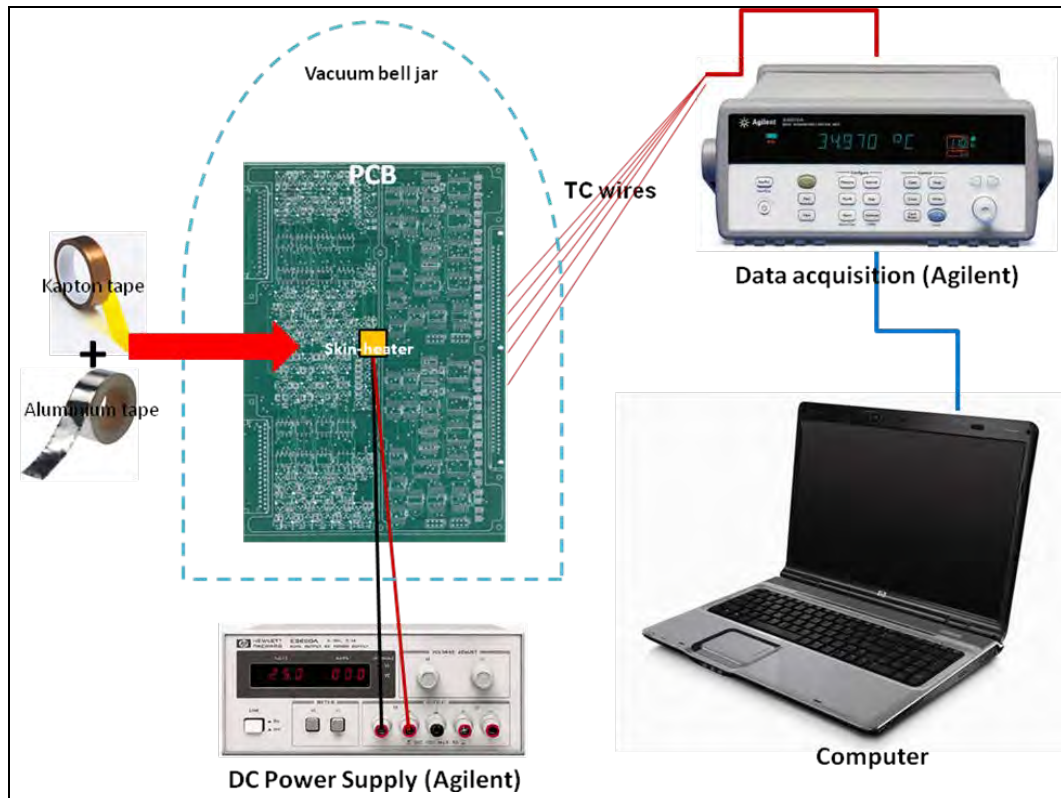


Figura 5.15 – Esquema do teste transiente em vácuo.



Figura 5.16 – Configuração do teste transiente em vácuo.

Como uma alternativa, estudou-se a possibilidade de utilizar MLI no lugar das fitas de kapton® e Al. O MLI de 15 camadas foi fabricado e o teste foi executado, entretanto o material apresentou uma capacidade de isolamento inferior a da configuração com fitas. A análise concluiu que provavelmente o vácuo dentro do campânula não foi suficiente para que o MLI funcionasse adequadamente, uma vez que o uso somente de uma bomba mecânica impossibilitou fazer vácuo melhor do que  $10^{-2}$  torr. Além disso, a emissividade de camada externa era provavelmente maior do que a fita polida de alumínio.

## **6 AQUISIÇÃO DE DADOS EXPERIMENTAIS**

Nesta seção os principais dados experimentais são apresentados. Os principais métodos experimentais que poderiam ser usados para se obter dados de temperatura para se ajustar um modelo numérico que revela os valores de condutividade térmica efetiva são caracterizados, com foco nas incertezas geradas. É apresentada a justificativa para a escolha do método experimental mais utilizado no estudo e também o procedimento básico do teste.

### **6.1. Incertezas consideradas na escolha do método experimental**

Qualquer método apresenta incertezas que devem ser cuidadosamente analisadas para que os erros sejam minimizados. Estas incertezas fazem com que seja difícil reproduzir com exatidão as condições de teste experimental no modelo numérico utilizado no ajuste de parâmetros a partir de dados experimentais. A seguir as principais incertezas de cada método experimental considerado no estudo são apresentadas.

#### **6.1.1. Incertezas no método em regime permanente em ambiente convectivo**

Este método é de fácil aplicação para um grande número de casos, porém é um teste de longa duração.

Neste método, a principal incerteza é a troca de calor por convecção natural com o ar ambiente. Existem relações gerais para coeficiente de troca de calor por convecção natural, entretanto para chegar na precisão necessária, é preciso ajustar alguns fatores multiplicadores para adequar a equação de caso geral à configuração do objeto e peculiaridades da configuração experimental. Ainda, o coeficiente de troca de calor por convecção depende da diferença de temperatura, o que fica bastante difícil definir uma vez que a não-

homogeneidade na distribuição das trilhas gera campos de temperatura não-uniformes. Por isso testes adicionais se fazem necessários para determinar os fatores de ajuste.

Outra incerteza considerável é a emissividade efetiva da PCB. A placa estará exposta ao ambiente e sofrerá troca de calor por radiação com ordem de grandeza comparável à troca de calor por convecção natural. Como a superfície da placa é composta de diferentes materiais, com diferentes emissividades, fica difícil estimar uma emissividade única para aplicar ao modelo.

Os valores das resistências de contato aquecedor/placa e placa/EPS também são fontes de incertezas, portanto também deverão ser refinados através de testes adicionais.

### **6.1.2. Incertezas no método transiente em ambiente convectivo**

Este método é de fácil aplicação para um grande número de casos, além de ser rápido quando comparado com métodos em regime permanente.

Neste método, a principal incerteza está relacionada a valores das resistências de contato aquecedor/placa e placa/EPS, cujos valores deverão ser obtidos através de testes adicionais. Existe ainda a incerteza da troca de calor por convecção natural do material isolante (isopor®) com o ar, entretanto a influência desta incerteza no comportamento térmico na placa é muito pequena, pois o fluxo de calor a partir da isolação para o ambiente é pequeno.

Erro no valor de resistência de contato aquecedor/placa pode resultar em um acoplamento térmico incorreto. Se o valor for muito pequeno faz com que o aquecedor fique muito quente e haja mais perdas através da isolação, já se for muito grande acaba criando um acoplamento quase perfeito com a placa e o fluxo de calor fica praticamente unidirecional, fazendo com que as perdas pela isolação do aquecedor fiquem menores que na realidade.

Erro no valor da resistência de contato placa/EPS pode resultar em um acoplamento incorreto com o ambiente externo. Se for muito pequeno, a placa fica mais isolada que na realidade e as perdas de calor para o ambiente são reduzidas, já se for muito grande acaba fazendo com que a perda de calor para o ambiente fique muito grande.

### **6.1.3. Incertezas no método transiente em vácuo**

Este método é de difícil aplicação para um grande número de casos, entretanto a influência e incertezas relacionadas à convecção são eliminadas.

Neste método, as principais incertezas estão ligadas as perdas de calor por radiação para o ambiente, uma vez que a convecção é praticamente nula devido a baixa pressão gerada dentro da campânula. Existe também a incerteza dos contatos entre o “*skin-heater*” e a PCB e ainda entre a PCB e o material isolante.

Se for utilizado MLI como isolante, todas incertezas embutidas nas propriedades do MLI devem ser analisadas.

### **6.1.4. Justificativa da escolha do método experimental mais utilizado no ajuste**

O método transiente em ambiente convectivo foi escolhido para ser o mais utilizado no processo de identificação das condutividades térmicas efetivas de PCBs porque oferece incertezas menores comparadas com os outros métodos e é de fácil aplicação quando existe um grande volume de testes. As principais incertezas deste método foram ainda minimizadas por experimentos específicos preliminares com ajustes utilizando uma placa de alumínio 5052 cujas propriedades térmicas são conhecidas (Seção 5.2).

## **6.2.Procedimento dos testes experimentais – posicionamento de aquecedor e sensores**

Para a determinação da condutividade térmica efetiva das placas através de comparação com resultados de um modelo numérico, foram realizados testes experimentais tanto em regime permanente quanto em regime transiente.

O método de testes em regime transiente em ambiente convectivo foi escolhido como básico. Entretanto, para ter maior confiança nos resultados e validar o método transiente, todas as placas também foram testadas com o método em regime permanente em ambiente convectivo. Assim foi possível confirmar a independência do método experimental nos resultados.

Para o regime permanente, o aquecedor cilíndrico foi posicionado apenas no centro das placas testadas. Já para os testes em regime transiente com EPS isolando as superfícies superior e inferior da placa, o aquecedor foi posicionado em 3 diferentes posições para extrair a influência de variação no desenho das trilhas condutoras e determinar quantitativamente a faixa da incerteza de condutividade efetiva da placa devido a esta variação. Em todos os testes realizados, 11 termopares foram utilizados, sendo um no elemento aquecedor e outro medindo a temperatura do ar ambiente, os demais estavam fixados nas PCBs.

Os posicionamentos do aquecedor e dos sensores de temperatura são descritos a seguir para a placa PCB\_01, como um exemplo. Nesta tabela, TC1 representa o termopar sobre o aquecedor e os termopares instalados na placa são representados de TC2 a TC10. As coordenadas de posicionamento do aquecedor e termopares para todas as placas estão apresentadas no Apêndice A.

As coordenadas têm origem no canto inferior esquerdo de cada PCB e são mostradas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Posicionamento do aquecedor e termopares na PCB\_01  
(coordenadas em metro).

POSIÇÃO 1		POSIÇÃO 2		POSIÇÃO 3	
TC	(x;y)	TC	(x;y)	TC	(x;y)
TC1	(0.1168 ; 0.0800)	TC1	(0.0607 ; 0.0800)	TC1	(0.1728 ; 0.0800)
TC2	(0.0607 ; 0.0800)	TC2	(0.0047 ; 0.0800)	TC2	(0.1168 ; 0.0800)
TC3	(0.0887 ; 0.0800)	TC3	(0.0327 ; 0.0800)	TC3	(0.1448 ; 0.0800)
TC4	(0.1448 ; 0.0800)	TC4	(0.0887 ; 0.0800)	TC4	(0.2008 ; 0.0800)
TC5	(0.1728 ; 0.0800)	TC5	(0.1168 ; 0.0800)	TC5	(0.2288 ; 0.0800)
TC6	(0.1168 ; 0.0416)	TC6	(0.0607 ; 0.0416)	TC6	(0.1728 ; 0.0416)
TC7	(0.1168 ; 0.0608)	TC7	(0.0607 ; 0.0608)	TC7	(0.1728 ; 0.0608)
TC8	(0.1168 ; 0.0992)	TC8	(0.0607 ; 0.0992)	TC8	(0.1728 ; 0.0992)
TC9	(0.1168 ; 0.1184)	TC9	(0.0607 ; 0.1184)	TC9	(0.1728 ; 0.1184)
TC10	(0.1168 ; 0.0800)	TC10	(0.0607 ; 0.0800)	TC10	(0.1728 ; 0.0800)
TC11	ambiente	TC11	ambiente	TC11	ambiente

As Figuras a seguir apresentam esquemas dos 3 diferentes posicionamentos de aquecedor e termopares na PCB\_01. O aquecedor é sempre posicionado na face oposta à dos termopares, este tipo de posicionamento foi seguido para todas as demais placas.



PCB\_01 – Posição 1



Figura 6.1 – Esquema de posicionamento da PCB\_01 – posição 1.

PCB\_01 – Posição 2

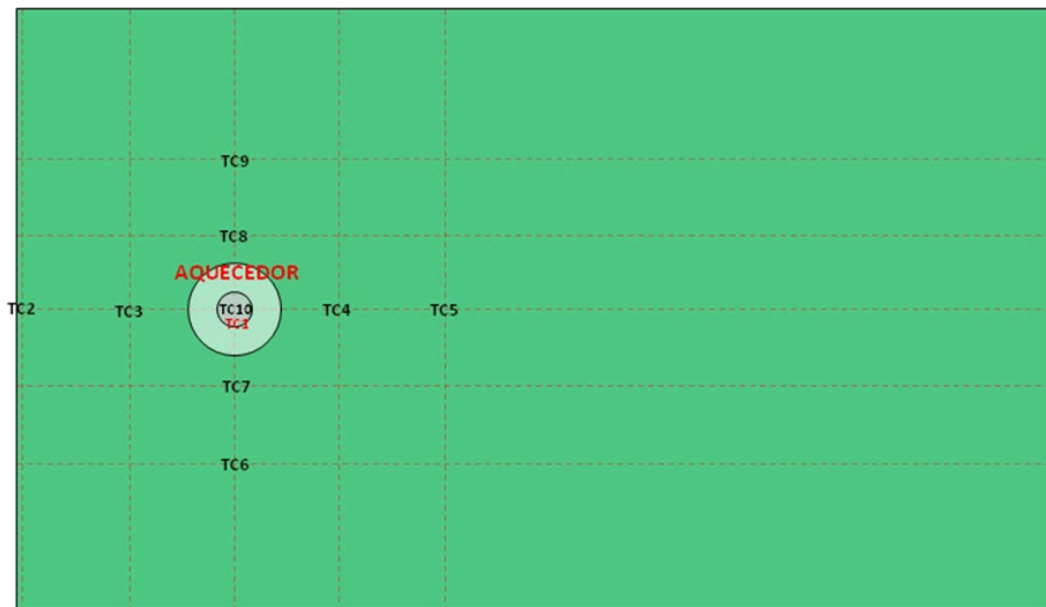


Figura 6.2 – Esquema de posicionamento da PCB\_01 – posição 2.

### PCB\_01 – Posição 3

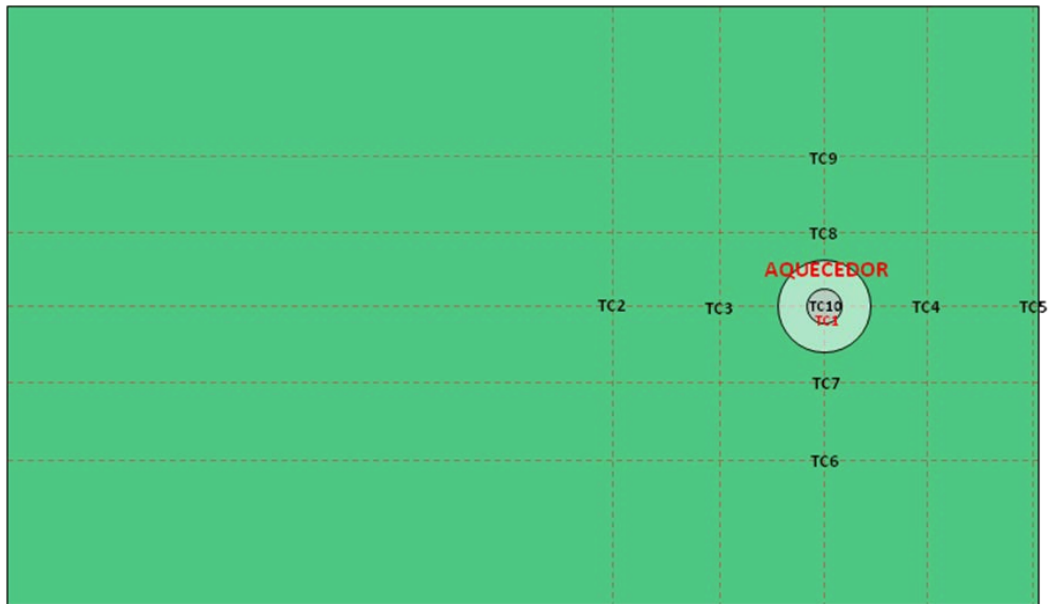


Figura 6.3 – Esquema de posicionamento da PCB\_01 – posição 3.

### 6.3. Apresentação dos dados de temperatura obtidos nos testes experimentais

Os testes em regime permanente foram conduzidos com única de 1.0 W no aquecedor. Os resultados de temperatura dos testes para todas as placas são apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Temperaturas medidas em testes de regime permanente

<b>Temperaturas em regime permanente – 1 W</b>											
<b>Termopar</b>	<b>PCB 01</b>	<b>PCB 02</b>	<b>PCB 03</b>	<b>PCB 04</b>	<b>PCB 05</b>	<b>PCB 06</b>	<b>PCB 07</b>	<b>PCB 08</b>	<b>PCB 09</b>	<b>PCB 10</b>	<b>PCB 11</b>
<b>TC1 – heater (°C)</b>	60.5	73.7	64.7	45.0	53.4	52.3	67.1	35.9	36.4	46.5	35.0
<b>TC2 (°C)</b>	26.5	24.4	26.3	26.1	25.0	25.3	26.1	25.3	25.4	24.9	23.6
<b>TC3 (°C)</b>	29.0	27.7	29.7	26.9	27.0	27.5	30.2	27.3	27.1	27.2	25.0
<b>TC4 (°C)</b>	29.4	31.7	38.1	27.3	27.3	27.6	31.2	27.3	27.4	27.2	25.0
<b>TC5 (°C)</b>	26.9	25.3	27.4	26.7	25.1	25.4	25.4	25.6	25.5	24.9	23.6
<b>TC6 (°C)</b>	28.1	24.8	27.5	26.8	26.0	26.4	27.5	26.7	26.6	26.6	25.3
<b>TC7 (°C)</b>	31.5	27.8	30.2	27.4	28.3	28.7	31.8	28.0	28.7	28.5	26.4
<b>TC8 (°C)</b>	31.0	29.1	34.8	28.0	28.3	29.1	30.3	28.5	29.6	28.9	26.8
<b>TC9 (°C)</b>	28.1	25.5	28.5	26.8	26.2	26.4	26.3	27.0	27.7	25.9	25.4
<b>TC10 (°C)</b>	36.3	51.6	48.8	28.5	35.4	39.9	43.4	30.4	30.8	32.0	27.9
<b>TC11 – ambiente (°C)</b>	23.8	22.4	22.4	22.3	22.7	23.2	22.8	22.7	22.3	22.5	21.0

As curvas experimentais de temperatura no tempo obtidas nos testes em regime transiente em ambiente convectivo são mostradas para placas PCB\_01 (6 camadas) e PCB\_02 (2 camadas) nos gráficos da Figura 6.4 à Figura 6.9. Todos os gráficos para 11 placas com 3 posições em cada placa estão apresentados da Figura D.1 à Figura D.33 no Apêndice D.

Cada curva representa a temperatura em um termopar, definido por um canal no sistema de aquisição de dados. O canal 101(C) corresponde a TC1, que é a temperatura no aquecedor, canal 102(C) corresponde a TC2, e assim por diante, enquanto 111(C) corresponde a TC11 e representa a temperatura ambiente.

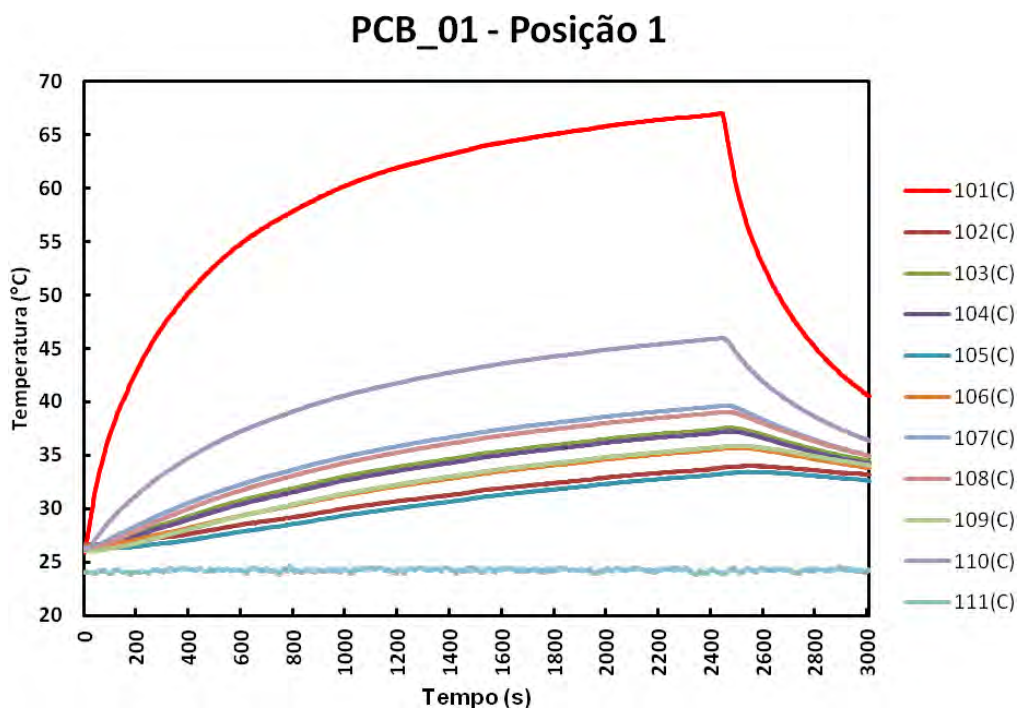


Figura 6.4 – Curvas de temperatura do teste em regime transiente da PCB\_01 com aquecedor na posição 1.

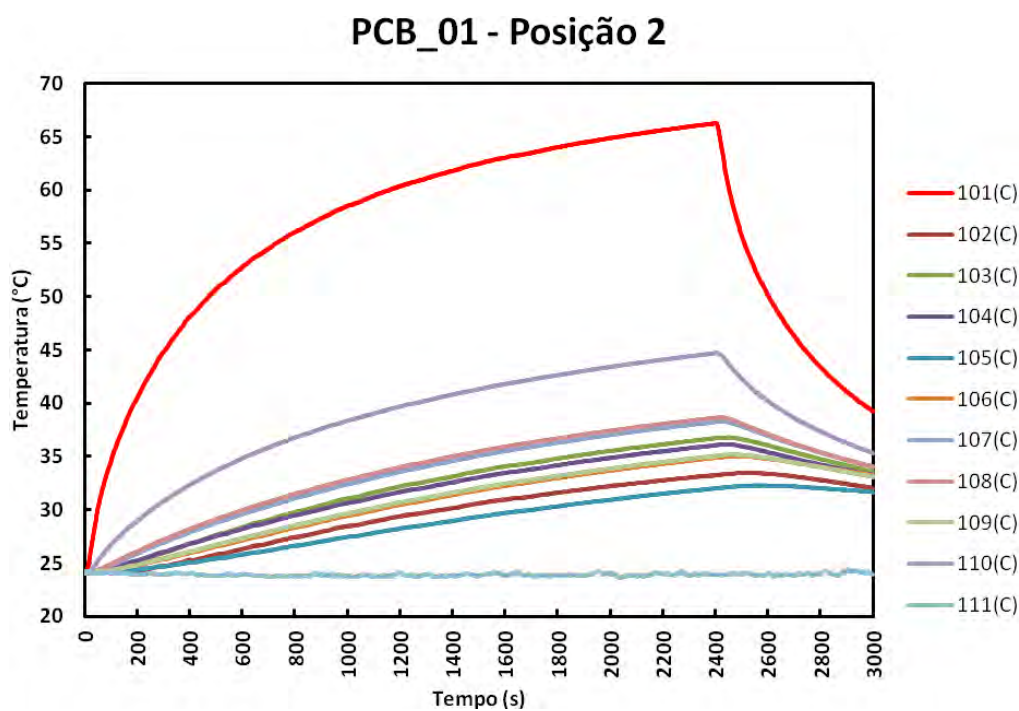


Figura 6.5 – Curvas de temperatura do teste em regime transiente da PCB\_01 com aquecedor na posição 2.

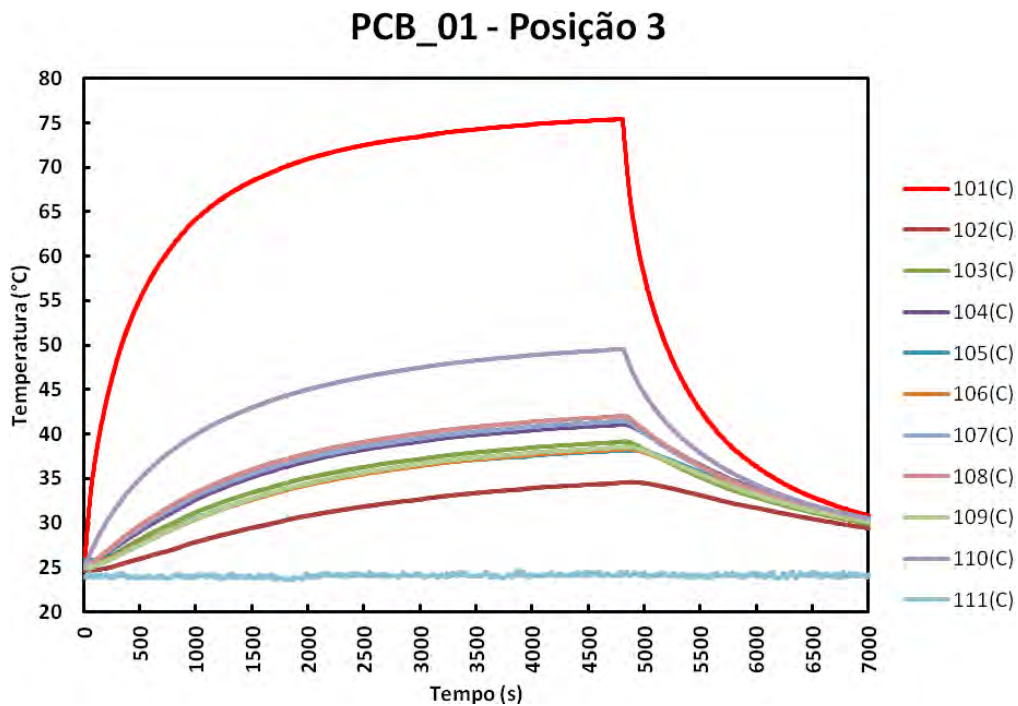


Figura 6.6 – Curvas de temperatura do teste em regime transiente da PCB\_01 com aquecedor na posição 3.

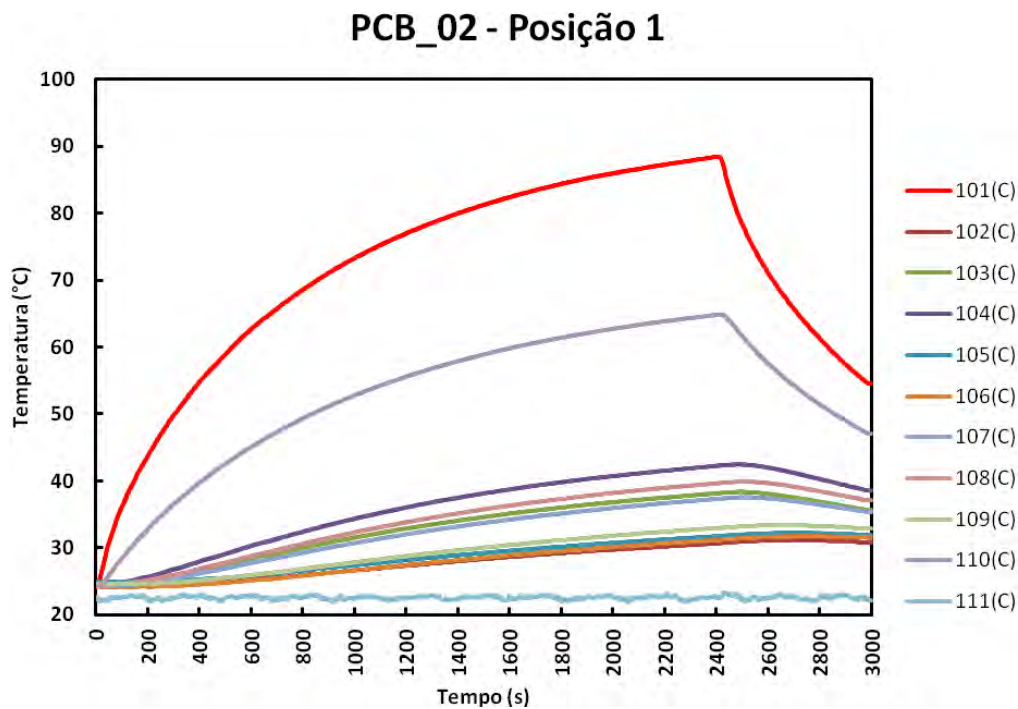


Figura 6.7 – Curvas de temperatura do teste em regime transiente da PCB\_02 com aquecedor na posição 1.

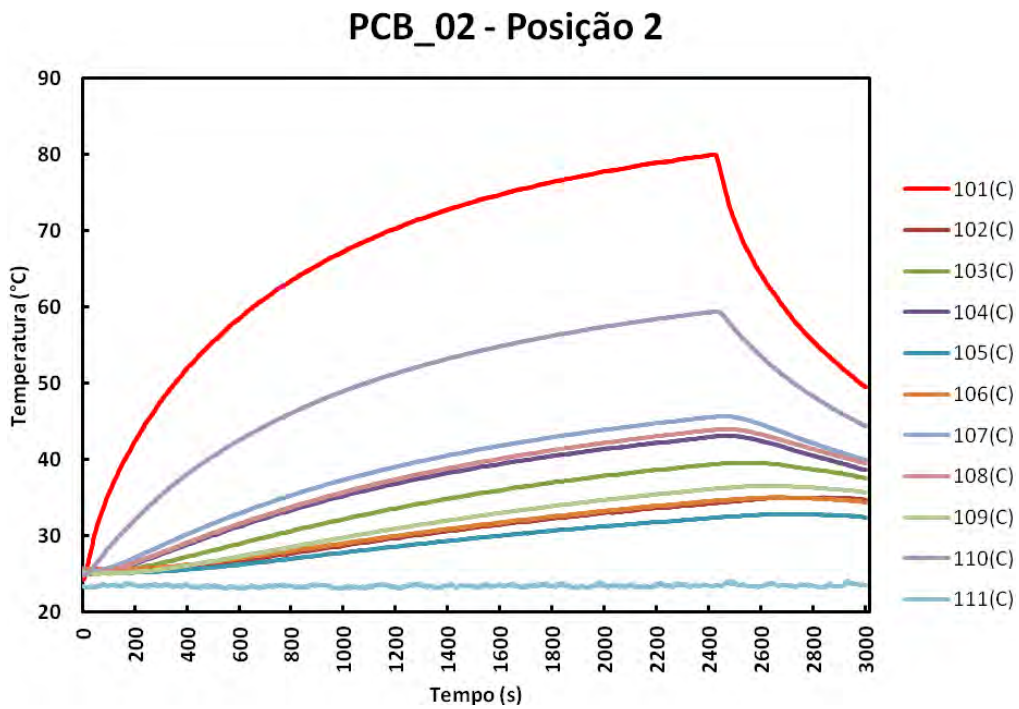


Figura 6.8 – Curvas de temperatura do teste em regime transiente da PCB\_02 com aquecedor na posição 2.

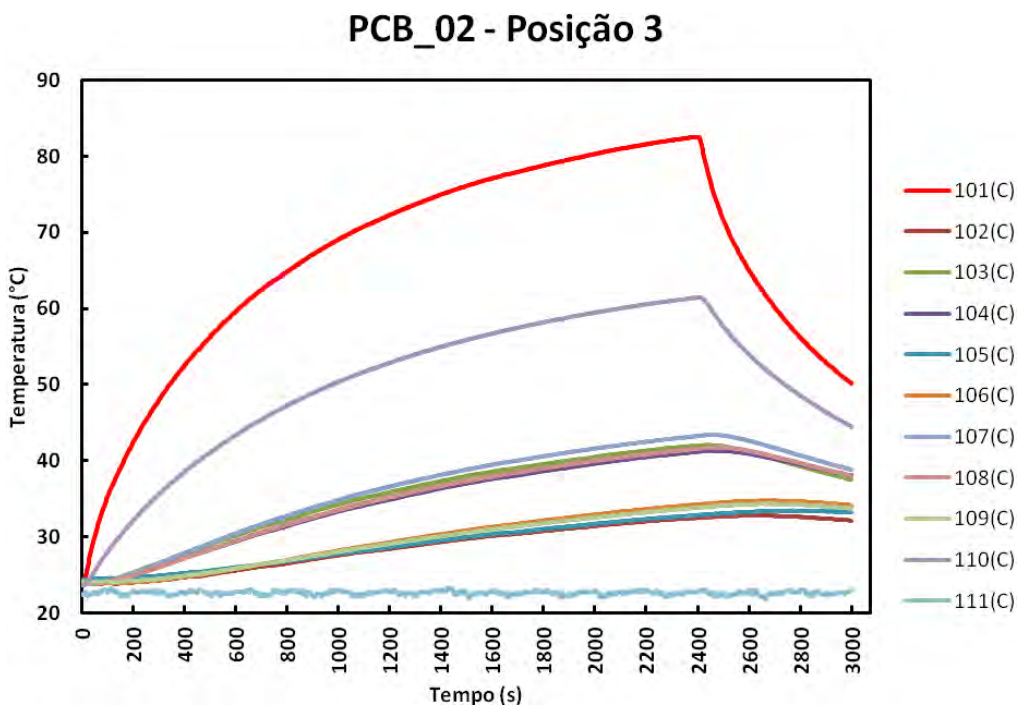


Figura 6.9 – Curvas de temperatura do teste em regime transiente da PCB\_03 com aquecedor na posição 3.

#### **6.4. Avaliação qualitativa dos resultados**

Nota-se que os resultados estão bastante coerentes com base nos cálculos simplificados preliminares.

As placas com condutividades maiores sempre ficam com temperaturas menores, tanto na superfície da placa, como no aquecedor. Este é um comportamento esperado, uma vez que uma placa com condutividade maior tem maior capacidade de transferir o calor até o ambiente externo.

Nas curvas de temperatura dos testes em regime transiente, nota-se 2 curvas com temperaturas bem acima das demais. Tratam-se das temperaturas no aquecedor (vermelho) e ponto na superfície oposta logo abaixo do aquecedor (roxo). A temperatura do ar ambiente (azul claro) também sempre foi monitorada para que fosse reproduzida no modelo posteriormente.





## **7 DETERMINAÇÃO DE CONDUTIVIDADES TÉRMICAS EFETIVAS ISOTRÓPICA E ANISOTRÓPICA DAS PCBS A PARTIR DE DADOS EXPERIMENTAIS**

Neste capítulo o procedimento de determinação de condutividades térmicas efetivas é descrito e os resultados obtidos são apresentados e analisados. Os modelos numéricos utilizados no ajuste das condutividades isotrópica e anisotrópica a partir de dados experimentais são mostrados. Ainda, é apresentado o procedimento de ajuste da condutividade do material FR4 para um grupo de placas do mesmo fabricante, uma vez que este parâmetro é muito importante e observou-se falta de dados confiáveis publicados na literatura.

### **7.1. Descrição dos modelos numéricos utilizados no ajuste**

No total 4 tipos diferentes de modelos numéricos foram utilizados neste estudo: modelos tipo isotrópico e anisotrópico para simulação dos experimentos conduzidos em regime permanente e modelos tipo isotrópico e anisotrópico para simulação experimentos conduzidos em regime transiente. Foram criadas 3 versões de modelos para transiente simulando 3 posições de aquecedor e termopares. Para criar os modelos, o software SINDA/FLUINT Thermal Desktop® foi usado. No total foram criados 88 modelos numéricos (22 - para testes em regime permanente e 66 - em regime transiente) para as 11 PCBs submetidas aos testes experimentais. Estes modelos são descritos a seguir.

#### **7.1.1. Modelos para simulação dos experimentos em regime permanente**

Para a simulação numérica dos experimentos conduzidos em regime permanente, dois tipos de modelos foram utilizados: modelo isotrópico e modelo anisotrópico. Em ambos, a PCB é representada por uma placa de única camada homogênea com as mesmas dimensões da PCB real, isolada na parte

inferior com um bloco de isopor® com condutividade ajustada  $k= 0.063 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  (Seção 5.3) que simula o EPS. Ainda, o aquecedor é modelado detalhadamente, composto por um resistor elétrico de  $68\Omega$  (elemento dissipativo), resina epóxi para fixação, cilindro de Al (corpo do aquecedor), cilindro isolante de teflon®, capa isolante de EPS e um sensor de temperatura instalado no corpo do cilindro de alumínio (TC01). Um esquema simplificado do aquecedor é mostrado com suas dimensões no modelo numérico na Figura 7.1.

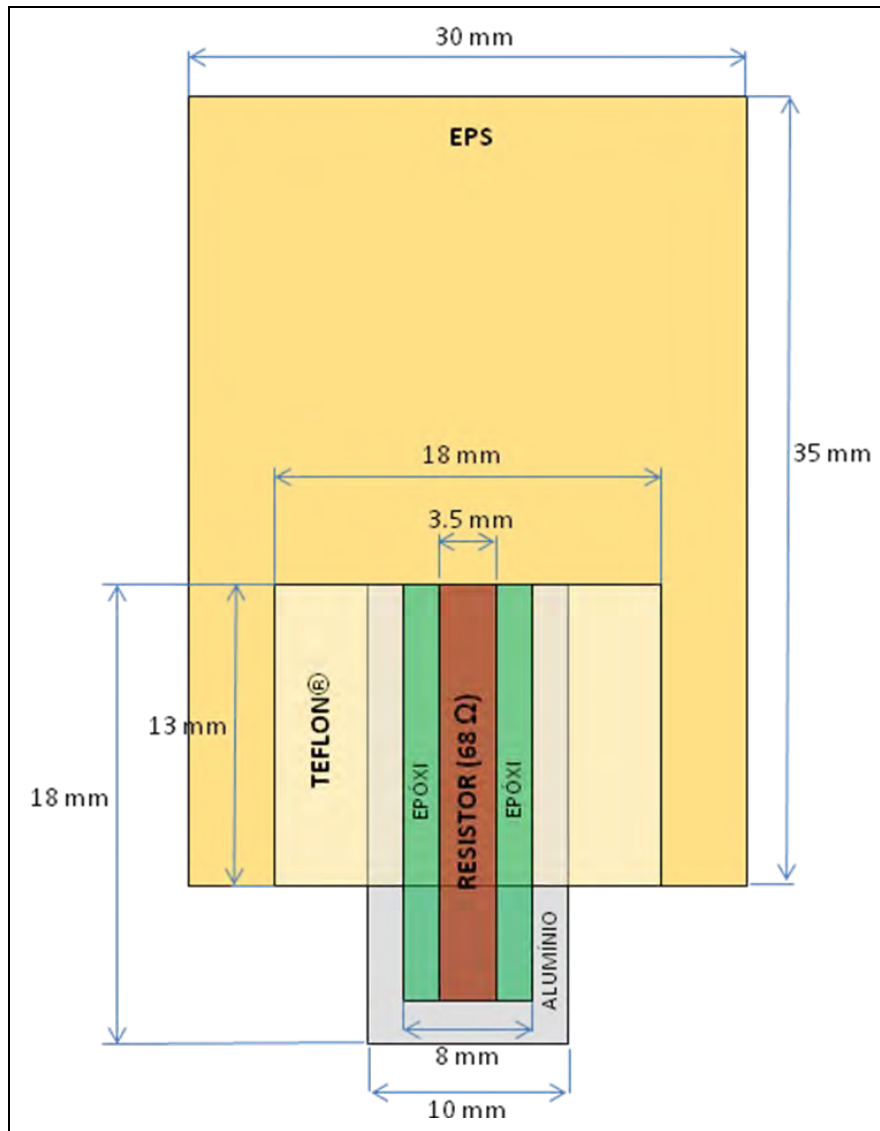


Figura 7.1 – Esquema da construção do aquecedor utilizado no modelo.

Na imagem da Figura 7.2, o bloco cinza representa isolamento de EPS, modelado por um elemento do tipo “*brick*” com divisão nodal  $N_x \times N_y \times N_z = 25 \times 25 \times 3$  com nós do tipo “*centered*”. O bloco verde representa a PCB com parâmetros numéricos descritos na Seção 4.3. A condutividade térmica da PCB, seja isotrópica ou anisotrópica, é o parâmetro que será identificado a partir do ajuste utilizando dados experimentais. O cilindro amarelo representa o aquecedor com sua isolamento térmica.

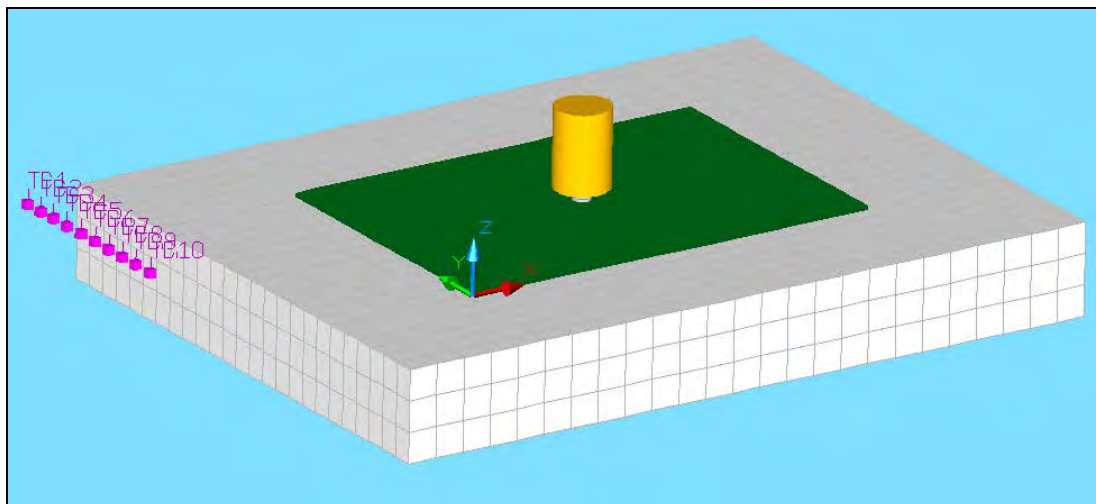


Figura 7.2 – Ilustração do modelo para simulação em regime permanente.

A diferença entre os modelos isotrópico e anisotrópico está apenas na condutividade do elemento que simula a PCB. No primeiro, uma única condutividade  $k_{eff}$  é aplicada e no segundo dois valores de condutividade são aplicados no sentido XY (ao longo de plano) e Z (transversal),  $k_{p,eff}$  e  $k_{s,eff}$ .

As condições de contorno incluem troca de calor com o ambiente por convecção natural e por radiação calculadas pelo próprio programa, além de condução na parte inferior do bloco de EPS incluindo a resistência térmica de contato, ajustada separadamente. As superfícies envolvidas com troca de calor por convecção natural são: EPS - todas as superfícies expostas; PCB – superfícies superior e laterais, aquecedor – lateral e tampa superior. Opções embutidas no SINDA FLUINT para casos de convecção natural nas geometrias apropriadas foram utilizadas, porém aplicando-se um fator de ajuste de 0.85 no caso de convecção natural com a placa plana com resfriamento por cima. Já para a superfície inferior do EPS, um valor fixo de troca de calor com o ambiente de  $5 \text{ W/m}^2\text{°C}$  foi utilizado. As superfícies envolvidas com troca de calor por radiação foram somente na PCB (superior e laterais) com valor de emissividade avaliada  $\epsilon_{PCB} = 0.6$ .

### 7.1.2. Modelo para simulação dos experimentos em regime transiente

Para a simulação de regime transiente, dois modelos foram utilizados no ajuste: modelo simplificado isotrópico e modelo simplificado anisotrópico. Em ambos, a PCB representada por uma placa de única camada com mesmas dimensões da PCB real, é isolada nas partes superior e inferior com blocos de isopor® com condutividade  $k= 0.063 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ , que simula o EPS usado e convecção natural com o ar ambiente nos blocos. Ainda, o aquecedor é modelado detalhadamente e dissipa  $1.0 \text{ W}$ .

Na imagem da Figura 7.3, os blocos em cinza representam a isolação de EPS, modelados por 2 elementos do tipo “*brick*” com divisão nodal  $N_x \times N_y \times N_z = 25 \times 25 \times 3$  com nós do tipo “*centered*”. O bloco verde representa a PCB com parâmetros numéricos descritos na Seção 4.3. A condutividade térmica da PCB, seja isotrópica ou anisotrópica, é o parâmetro que será identificado a partir dos dados experimentais. O cilindro amarelo representa o aquecedor com sua isolação térmica e o cilindro dourado representa um cilindro de latão que foi utilizado no teste para fixar o aquecedor.

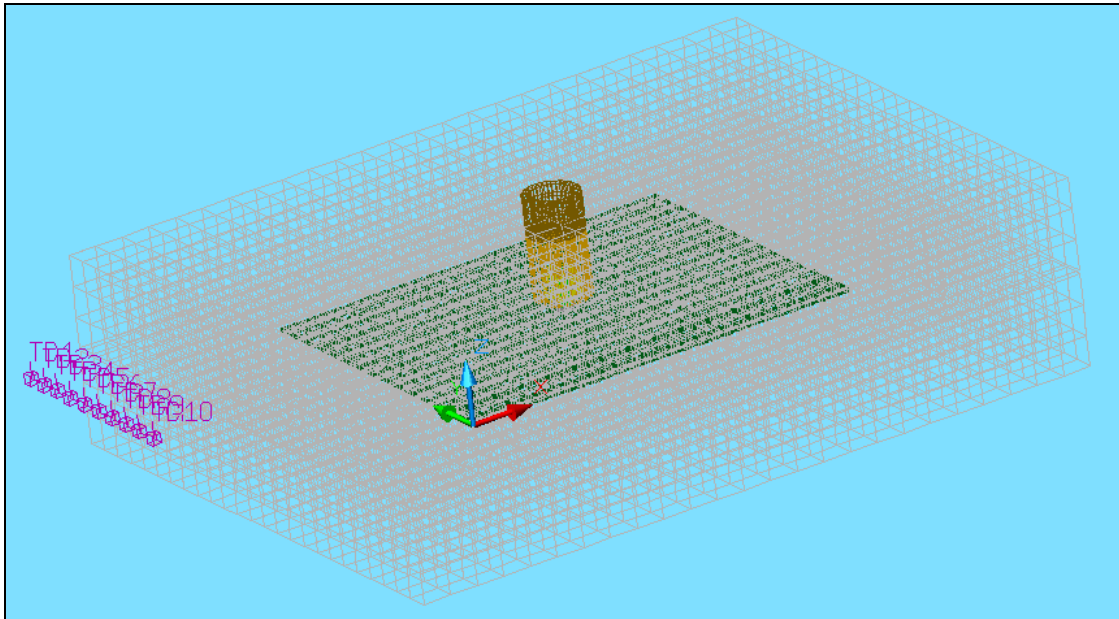


Figura 7.3 – Ilustração do modelo para simulação em regime transiente.

As condições de contorno incluem troca de calor com ambiente por convecção natural e contato com a parte inferior do EPS. As superfícies envolvidas com troca de calor por convecção são as do bloco de EPS, exceto a superfície inferior. Opções embutidas no SINDA FLUINT para casos de convecção natural foram utilizadas sem modificar fatores de ajuste. Já para a superfície inferior do EPS, um valor fixo de troca de calor com o ambiente de  $5 \text{ W/m}^2\text{°C}$  foi utilizado. O cilindro de latão também tem um valor de troca de calor fixo com o ambiente de  $10 \text{ W/m}^2\text{°C}$

A diferença entre os modelos isotrópico e anisotrópico também está apenas na condutividade do elemento que simula a PCB. No primeiro, uma única condutividade  $k_{\text{eff}}$  é aplicada e no segundo dois valores de condutividade são aplicados,  $k_{\text{p,eff}}$  e  $k_{\text{s,eff}}$ .

## 7.2. Ajuste da condutividade térmica do FR4 para grupo de PCBs de mesmo fabricante

Quanto às propriedades térmicas do FR4, que é o principal material das PCBs, foram levantados dados de fornecedores e fontes diferentes. A generalização de dados disponíveis publicados sobre propriedades de material de placas permite concluir que o valor médio de condutividade térmica do FR4 é de 0.26 W/m°C com desvio padrão de 0.06 (Capítulo 2, Tabela 2.1). Devido à essa incerteza, optou-se por fazer um ajuste da condutividade térmica do FR4 através dos dados experimentais para um grupo de placas do mesmo fabricante. O motivo de selecionar placas do mesmo fabricante para o ajuste é ter certeza que o material dielétrico (FR4) é o mesmo para todas as placas, uma vez que a tecnologia de fabricação e matéria prima são as mesmas para este grupo de placas.

A identificação do valor de condutividade do material FR4 para um grupo de placas do mesmo fabricante será baseado na definição geral de condutividade efetiva transversal (em série) de uma placa multicamadas com N camadas, Equação 7.1.

$$k_{s,eff} = (1 - \mathcal{F}_h) \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{\sum_{i=1}^N \frac{t_i}{f_{ai} k_i}} + \mathcal{F}_h k_{Cu} \quad (7.1)$$

Nesta equação geral, a *i*ésima camada possui condutividade  $k_i$  e fator de área de cobertura com este material  $f_{ai}$ , que para camadas de FR4 será igual a 1, e para camadas metalizadas – porcentagem de cobertura com cobre.

Considerando que nas camadas condutivas os volumes sem trilhas de cobre são preenchidos com FR4, podemos detalhar ainda mais este modelo.



$$\frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{t_i}{f_{ai}k_i}} = \frac{1}{\sum_{i=J[1]} \frac{t_i}{k_i} + \sum_{i=J[2]} \frac{t_i}{f_{ai}k_i + (1-f_{ai})k_{FR4}}} \quad (7.2)$$

onde J[1] - é conjunto de números de camadas de FR4

J[2] - é conjunto de números de camadas com trilhas condutivas.

Os componentes no denominador da última equação são, para camadas de FR4:

$$\sum_{i=J[1]} \frac{t_i}{k_i} = \frac{1}{k_{FR4}} \sum_{i=J[1]} t_i = \frac{t_{FR4}}{k_{FR4}} \quad (7.3)$$

Já para as camadas com trilhas:

$$\sum_{i=J[2]} \frac{t_i}{f_{ai}k_i + (1-f_{ai})k_{FR4}} = \sum_{i=J[2]} \frac{t_i}{f_{ai}k_{Cu} + (1-f_{ai})k_{FR4}} = \frac{1}{k_{Cu}} \sum_{i=J[2]} \frac{t_i}{f_{ai} + (1-f_{ai})\frac{k_{FR4}}{k_{Cu}}} \quad (7.4)$$

onde  $t_{FR4}$  – soma das espessuras de todas as camadas de FR4

Na última relação, a razão ( $k_{FR4}/k_{Cu}$ ) é muito pequena, por isso pode-se considerar aqui um valor típico médio de  $k_{FR4}$  (embora que  $k_{FR4}$  seja uma

incógnita). Com esta simplificação pode-se definir a espessura somada efetiva (considerando porcentagem de cobertura) das camadas de cobre para o modelo em série:

$$\sum_{i=J[2]} \frac{t_i}{f_{ai} + (1 - f_{ai}) \frac{\bar{k}_{FR4}}{k_{Cu}}} = t_{Cu,s,eff} \quad (7.5)$$

Finalmente:

$$k_{s,eff} = (1 - \mathcal{G}_h) \frac{t_{PCB}}{\left( \frac{t_{FR4}}{k_{FR4}} + \frac{t_{Cu,s,eff}}{k_{Cu}} \right)} + \mathcal{G}_h k_{Cu} \quad (7.6)$$

Supõe-se que o valor médio de  $\zeta$  inão depende do local da medida e da PCB, se forem do mesmo fabricante e com o mesmo número de camadas.

Finalmente, para um par de PCBs do mesmo tipo e mesmo fabricante, temos 2 equações e 2 incógnitas ( $k_{FR4}$  e  $\bar{\zeta}$ ):

$$\left\{ \begin{array}{l} k_{1,s,eff} = (1 - \bar{\zeta}f_{1,h}) \frac{t_{1,PCB}}{\left( \frac{t_{1,FR4}}{k_{FR4}} + \frac{t_{1,Cu,s,eff}}{k_{Cu}} \right)} + \bar{\zeta}f_{1,h}k_{Cu} \\ k_{2,s,eff} = (1 - \bar{\zeta}f_{2,h}) \frac{t_{2,PCB}}{\left( \frac{t_{2,FR4}}{k_{FR4}} + \frac{t_{2,Cu,s,eff}}{k_{Cu}} \right)} + \bar{\zeta}f_{2,h}k_{Cu} \end{array} \right. \quad (7.7)$$

onde  $k_{FR4}$  = condutividade do FR4 (incógnita)

$\bar{\zeta}$  = fator sigma médio (incógnita)

Os valores  $\bar{k}_{1,s,eff}$  e  $\bar{k}_{2,s,eff}$  são obtidos através de ajuste do modelo numérico junto com dados experimentais para 2 placas. Valores médios de vários posicionamentos do aquecedor foram usados.

Isto resulta em um sistema de 2 equações não-lineares e 2 incógnitas, o qual pode ser resolvido numericamente.

Resolvendo o sistema para o grupo de 4 PCBs da empresa Opto Eletrônica, as quais são do mesmo fabricante, os valores obtidos foram aproximadamente  $k_{FR4} = 0.20 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  e  $\bar{\zeta} = 0.0008$ . Este valor de  $k_{FR4}$  foi usado para todas as outras placas por ser um valor conservativo.

### 7.3. Descrição do método e procedimento de ajuste de $k_{p,eff}$ , $k_{s,eff}$ e $k_{eff}$

O método combina simulação numérica utilizando o programa SINDA/FLUINT Thermal Desktop® com dados obtidos nos testes experimentais. Neste caso, os valores de temperaturas medidas em vários pontos da PCB através de termopares são usados como referência para identificar as condutividades efetivas que melhor ajustam os modelos simplificados isotrópico e anisotrópico. Estes modelos reproduzem condições de contorno iguais às encontradas nos

experimentos. O processo iterativo de ajuste envolve múltiplas execuções de modelo, variando os valores de condutividades térmicas da placa manualmente com a finalidade de atingir o menor valor possível na diferença das temperaturas experimentais e de simulação a partir da comparação com algoritmo em Microsoft Excel das temperaturas experimentais e geradas pela simulação. A seguir, os processos de ajuste para os testes em regime permanente e transiente são apresentados.

### 7.3.1. Ajuste para método em regime permanente

Para o modelo isotrópico o critério de ajuste será a média quadrática mínima das diferenças de temperatura, ou seja, a  $k_{eff}$  é ajustada no modelo numérico para que a diferença média das temperaturas em regime permanente do modelo e do experimento, em todos os termopares, seja minimizada, conforme formulação apresentada na Equação 7.8.

$$\min_{k_{eff}} \delta T = \sqrt{\frac{1}{N_{TC}} \sum_{i=1}^{N_{TC}} (T_{x,i} - T_{m,i})^2} \quad (7.8)$$

onde  $N_{TC}$  – Número de termopares

$T_{x,i}$  – Temperatura medida no experimento (°C)

$T_{m,i}$  – Temperatura obtida no modelo no mesmo local do termopar (°C)

Para o modelo anisotrópico, o mesmo critério é utilizado. Neste caso  $k_{p,eff}$  e  $k_{s,eff}$ , são ajustados no modelo numérico para que a diferença média das temperaturas em regime permanente do modelo e do experimento, em todos os termopares, seja minimizada, conforme formulação na Equação 7.9.

$$\min_{k_{p,eff}, k_{s,eff}} \delta T = \sqrt{\frac{1}{N_{TC}} \sum_{i=1}^{N_{TC}} (T_{x,i} - T_{m,i})^2} \quad (7.9)$$

Na segunda etapa os valores de  $\xi$  e  $\zeta$ , nas expressões para condutividades térmicas anisotrópicas (Seção 8.1 – Equação 22 e Equação 23) serão determinados a partir dos valores  $k_{p,eff}$  e  $k_{s,eff}$  obtidos no ajuste.

O ajuste dos valores de  $k_{p,eff}$  e  $k_{s,eff}$  é realizado de acordo com o fluxograma mostrado na Figura 7.4.

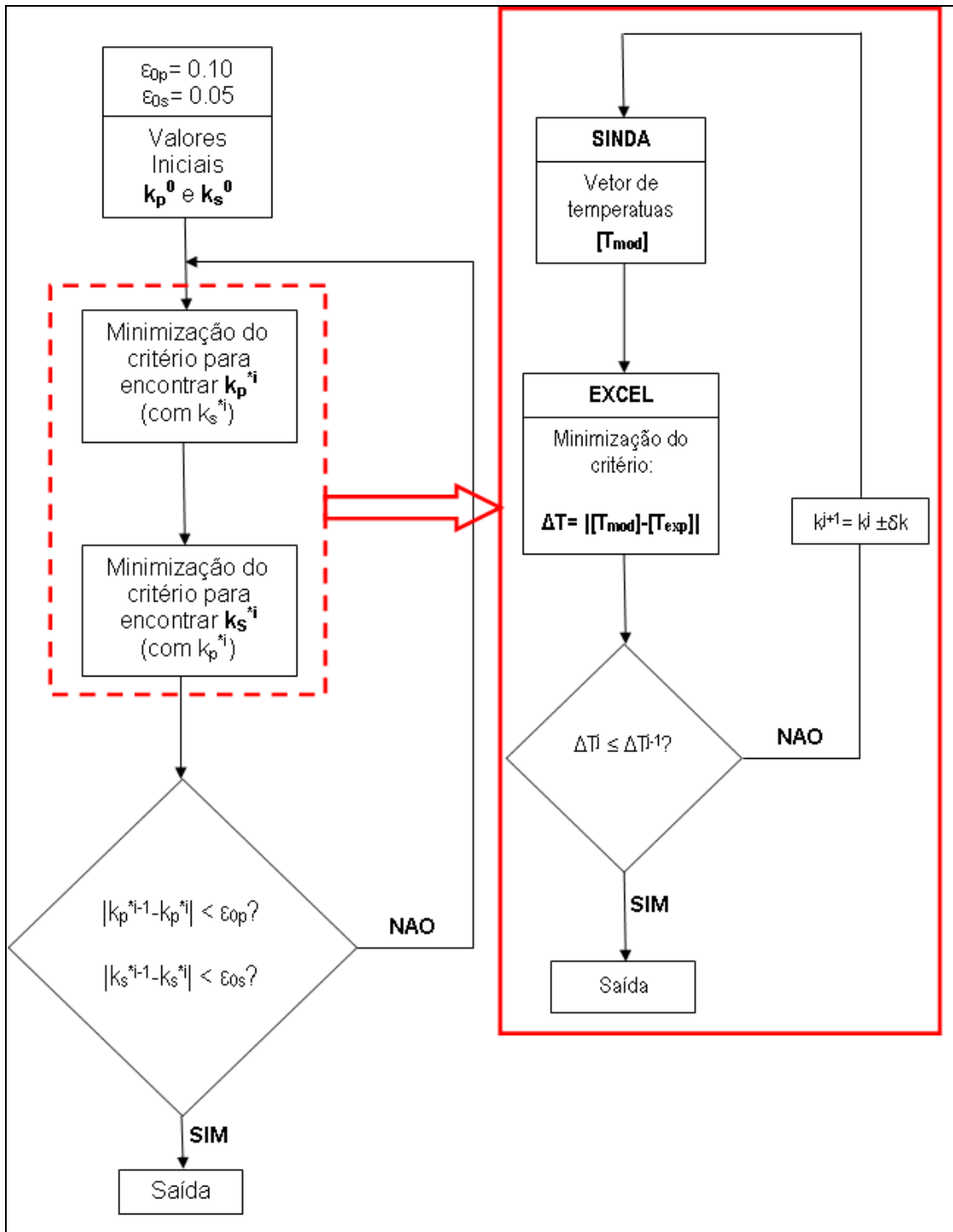


Figura 7.4 – Fluxograma de ajuste para condutividades anisotrópicas.

### 7.3.2. Ajuste para método em regime transiente

Em testes com regime transiente, será escolhida uma seqüência de  $N_\tau$  amostragens de leitura com intervalo de  $\Delta\tau$ . O critério de ajuste para o modelo isotrópico é representado na Equação 20, onde o valor de  $k_{eff}$  é ajustado no modelo até que a diferença média das temperaturas nos instantes escolhidos do modelo e do experimento, em todos os termopares, seja minimizada.

$$\min_{k_{eff}} \delta T = \sqrt{\frac{1}{N_\tau} \frac{1}{N_{TC}} \sum_{j=1}^{N_\tau} \sum_{i=1}^{N_{TC}} (T_{x,i}(\tau_0 + j\Delta\tau) - T_{m,i}(\tau_0 + j\Delta\tau))^2} \quad (7.10)$$

Onde  $N_\tau$  – Número de amostragens (3)

$\tau_0$  – Tempo de início de processo em regime transiente (1200 s)

$N_{TC}$  – Número de termopares

$T_{x,i}$  – Temperatura medida no experimento

$T_{m,i}$  – Temperatura obtida no modelo no mesmo local do termopar

Para o modelo simplificado anisotrópico será usado o critério, representado pela Equação 21, só com parâmetros de ajuste  $k_{p,eff}$  e  $k_{s,eff}$  em vez do  $k_{eff}$ . Na segunda etapa, os valores de  $\xi$  e  $\zeta$ , nas expressões para condutividades térmicas anisotrópicas (Seção 8.1) serão determinados a partir dos valores  $k_{p,eff}$  e  $k_{s,eff}$  obtidos no ajuste.

$$\min_{k_{p,eff}, k_{s,eff}} \delta T = \sqrt{\frac{1}{N_\tau} \frac{1}{N_{TC}} \sum_{j=1}^{N_\tau} \sum_{i=1}^{N_{TC}} (T_{x,i}(\tau_0 + j\Delta\tau) - T_{m,i}(\tau_0 + j\Delta\tau))^2} \quad (7.11)$$

Com o objetivo de minimizar o volume de dados a serem tratados, o número de amostragens escolhido foi  $N_{\tau} = 3$  com intervalo de  $\Delta\tau = 600$  s com início no instante 1200 s.

#### 7.4. Resultados dos valores ajustados

Os valores ajustados para  $k_{p,eff}$ ,  $k_{s,eff}$  e  $k_{eff}$ , com as suas respectivas médias de diferença de temperatura entre o experimento e os dados de simulação do modelo para as 11 PCBs do estudo são apresentados nas tabelas abaixo.

Tabela 7.1 – Valores ajustados para PCB\_01.

<b>Anisotrópico</b>			
<b>TRANSIENTE</b>	<b><math>k_{p,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>k_{s,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	5.9	0.30	2.7
Posição 2	7.5	0.30	1.4
Posição 3	6.5	0.30	1.8
<b>ESTACIONÁRIO</b>	<b><math>k_{p,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>k_{s,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	5.6	0.40	1.2
<b>Isotrópico</b>			
<b>TRANSIENTE</b>	<b><math>k_{eff}</math> (W/m°C)</b>		<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	3.9		2.6
Posição 2	5.7		1.4
Posição 3	5.5		1.9
<b>ESTACIONÁRIO</b>	<b><math>k_{eff}</math> (W/m°C)</b>		<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	5.4		2.6



Tabela 7.2 – Valores ajustados para PCB\_02.

<b>Anisotrópico</b>			
<b>TRANSIENTE</b>	<b><math>k_{p,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>k_{s,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	1.3	0.70	2.4
Posição 2	1.9	0.30	2.3
Posição 3	2.0	0.30	1.7
<b>ESTACIONÁRIO</b>	<b><math>k_{p,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>k_{s,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	2.3	0.30	1.3
<b>Isotrópico</b>			
<b>TRANSIENTE</b>	<b><math>k_{eff}</math> (W/m°C)</b>		<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	3.2		2.2
Posição 2	1.2		3.0
Posição 3	1.9		1.6
<b>ESTACIONÁRIO</b>	<b><math>k_{eff}</math> (W/m°C)</b>		<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	2.3		1.7

Tabela 7.3 – Valores ajustados para PCB\_03.

<b>Anisotrópico</b>			
<b>TRANSIENTE</b>	<b><math>k_{p,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>k_{s,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	1.7	0.20	3.9
Posição 2	1.5	0.25	2.3
Posição 3	1.9	0.20	3.5
<b>ESTACIONÁRIO</b>	<b><math>k_{p,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>k_{s,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	4.1	0.25	2.9
<b>Isotrópico</b>			
<b>TRANSIENTE</b>	<b><math>k_{eff}</math> (W/m°C)</b>		<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	1.5		3.9
Posição 2	1.4		2.2
Posição 3	1.3		2.8
<b>ESTACIONÁRIO</b>	<b><math>k_{eff}</math> (W/m°C)</b>		<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	4.0		2.6

Tabela 7.4 – Valores ajustados para PCB\_04.

<b>Anisotrópico</b>			
<b>TRANSIENTE</b>	<b><math>k_{p,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>k_{s,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	15.0	0.20	2.1
Posição 2	13.0	0.20	1.8
Posição 3	15.0	0.20	2.2
<b>ESTACIONÁRIO</b>	<b><math>k_{p,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>k_{s,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	23.0	0.30	0.8
<b>Isotrópico</b>			
<b>TRANSIENTE</b>	<b><math>k_{eff}</math> (W/m°C)</b>		<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	8.0		2.5
Posição 2	7.5		2.1
Posição 3	7.7		2.6
<b>ESTACIONÁRIO</b>	<b><math>k_{eff}</math> (W/m°C)</b>		<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	17.0		0.8

Tabela 7.5 – Valores ajustados para PCB\_05.

<b>Anisotrópico</b>			
<b>TRANSIENTE</b>	<b><math>k_{p,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>k_{s,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	9.5	0.25	1.6
Posição 2	8.5	0.20	2.0
Posição 3	10.5	0.20	1.0
<b>ESTACIONÁRIO</b>	<b><math>k_{p,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>k_{s,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	6.0	0.40	1.3
<b>Isotrópico</b>			
<b>TRANSIENTE</b>	<b><math>k_{eff}</math> (W/m°C)</b>		<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	5.5		2.2
Posição 2	5.2		3.6
Posição 3	6.5		2.4
<b>ESTACIONÁRIO</b>	<b><math>k_{eff}</math> (W/m°C)</b>		<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	7.5		1.4

Tabela 7.6 – Valores ajustados para PCB\_06.

<b>Anisotrópico</b>			
<b>TRANSIENTE</b>	<b><math>k_{p,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>k_{s,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	8.0	0.35	1.6
Posição 2	8.0	0.25	2.0
Posição 3	11.5	0.30	0.4
<b>ESTACIONÁRIO</b>	<b><math>k_{p,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>k_{s,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	8.0	0.30	1.7
<b>Isotrópico</b>			
<b>TRANSIENTE</b>	<b><math>k_{eff}</math> (W/m°C)</b>		<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	6.0		2.0
Posição 2	5.5		2.5
Posição 3	8.7		0.9
<b>ESTACIONÁRIO</b>	<b><math>k_{eff}</math> (W/m°C)</b>		<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	7.5		1.7

Tabela 7.7 – Valores ajustados para PCB\_07.

<b>Anisotrópico</b>			
<b>TRANSIENTE</b>	<b><math>k_{p,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>k_{s,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	2.7	0.20	1.8
Posição 2	2.0	0.25	2.2
Posição 3	1.7	0.35	1.9
<b>ESTACIONÁRIO</b>	<b><math>k_{p,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>k_{s,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	2.0	0.25	2.8
<b>Isotrópico</b>			
<b>TRANSIENTE</b>	<b><math>k_{eff}</math> (W/m°C)</b>		<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	2.4		1.7
Posição 2	2.0		2.3
Posição 3	5.0		1.1
<b>ESTACIONÁRIO</b>	<b><math>k_{eff}</math> (W/m°C)</b>		<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	1.9		2.3

Tabela 7.8 – Valores ajustados para PCB\_08.

<b>Anisotrópico</b>			
<b>TRANSIENTE</b>	<b><math>k_{p,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>k_{s,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	13.5	0.25	2.1
Posição 2	11.0	0.20	2.0
Posição 3	15.5	0.20	0.7
<b>ESTACIONÁRIO</b>	<b><math>k_{p,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>k_{s,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	12.0	0.35	1.0
<b>Isotrópico</b>			
<b>TRANSIENTE</b>	<b><math>k_{eff}</math> (W/m°C)</b>		<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	9.0		2.5
Posição 2	7.5		2.3
Posição 3	11.5		1.4
<b>ESTACIONÁRIO</b>	<b><math>k_{eff}</math> (W/m°C)</b>		<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	12.0		1.1

Tabela 7.9 – Valores ajustados para PCB\_09.

<b>Anisotrópico</b>			
<b>TRANSIENTE</b>	<b><math>k_{p,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>k_{s,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	12.0	0.25	2.2
Posição 2	11.0	0.20	2.0
Posição 3	14.5	0.20	1.1
<b>ESTACIONÁRIO</b>	<b><math>k_{p,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>k_{s,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	10.5	0.25	1.3
<b>Isotrópico</b>			
<b>TRANSIENTE</b>	<b><math>k_{eff}</math> (W/m°C)</b>		<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	8.0		2.4
Posição 2	7.6		2.3
Posição 3	10.5		1.7
<b>ESTACIONÁRIO</b>	<b><math>k_{eff}</math> (W/m°C)</b>		<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	9.0		1.1

Tabela 7.10 – Valores ajustados para PCB\_10.

<b>Anisotrópico</b>			
<b>TRANSIENTE</b>	<b><math>k_{p,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>k_{s,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	12.0	0.25	1.6
Posição 2	13.0	0.20	1.0
Posição 3	13.0	0.25	0.9
<b>ESTACIONÁRIO</b>	<b><math>k_{p,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>k_{s,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	8.5	0.30	0.7
<b>Isotrópico</b>			
<b>TRANSIENTE</b>	<b><math>k_{eff}</math> (W/m°C)</b>		<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	9.3		1.9
Posição 2	8.1		2.4
Posição 3	10.2		1.5
<b>ESTACIONÁRIO</b>	<b><math>k_{eff}</math> (W/m°C)</b>		<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	11.0		0.6

Tabela 7.11 – Valores ajustados para PCB\_11.

<b>Anisotrópico</b>			
<b>TRANSIENTE</b>	<b><math>k_{p,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>k_{s,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	18.5	0.20	1.2
Posição 2	19.0	0.25	1.9
Posição 3	18.0	0.25	0.7
<b>ESTACIONÁRIO</b>	<b><math>k_{p,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>k_{s,eff}</math> (W/m°C)</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	20.0	0.20	0.8
<b>Isotrópico</b>			
<b>TRANSIENTE</b>	<b><math>k_{eff}</math> (W/m°C)</b>		<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	13.5		1.7
Posição 2	13.1		1.7
Posição 3	13.5		1.4
<b>ESTACIONÁRIO</b>	<b><math>k_{eff}</math> (W/m°C)</b>		<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>
Posição 1	50.0		0.4

### 7.5. Teste comparativo em vácuo

A fim de mostrar que o procedimento de ajuste das condutividades efetivas de uma PCB é independente do tipo de teste experimental utilizado, testes no vácuo foram realizados.

Para realizar os testes, a PCB\_08 foi escolhida. Os testes foram feitos com 2 tipos de isolamento, um com manta super-isolante multicamadas (MLI) e outro com fita Kapton® e fita de alumínio polido, conforme procedimento

descrito anteriormente. Dois patamares de potência no aquecedor do tipo “*skin-heater*” foram utilizados, 1 e 2 W. O teste foi realizado em regime transiente com o aquecedor ligado durante 2400 s e desligado por mais 800 s, totalizando 3200 s para cada teste. Os gráficos a seguir mostram as curvas de temperatura obtidas nos testes.

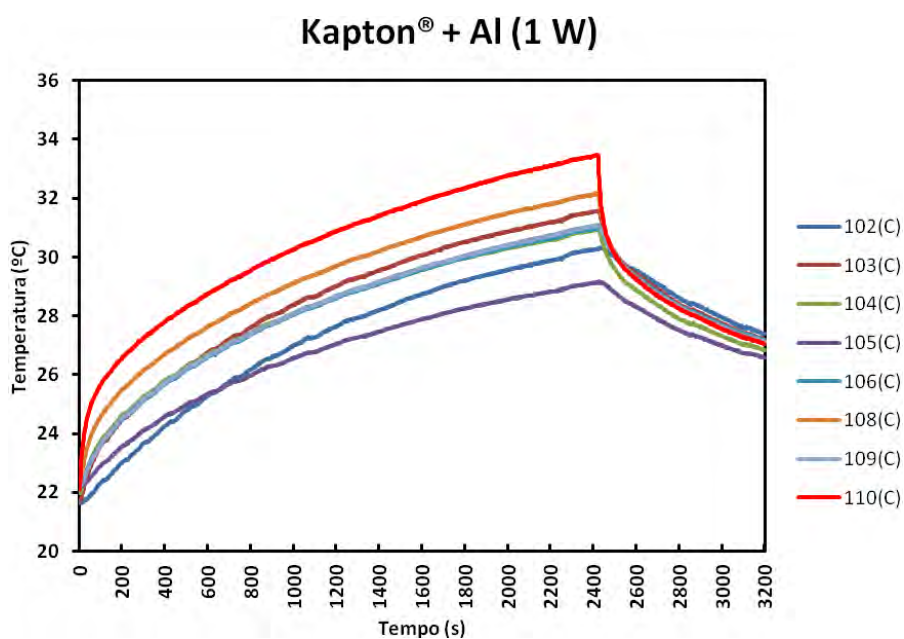


Figura 7.5 – Curvas de temperatura do teste com fita de Kapton® e Al e 1 W no aquecedor.

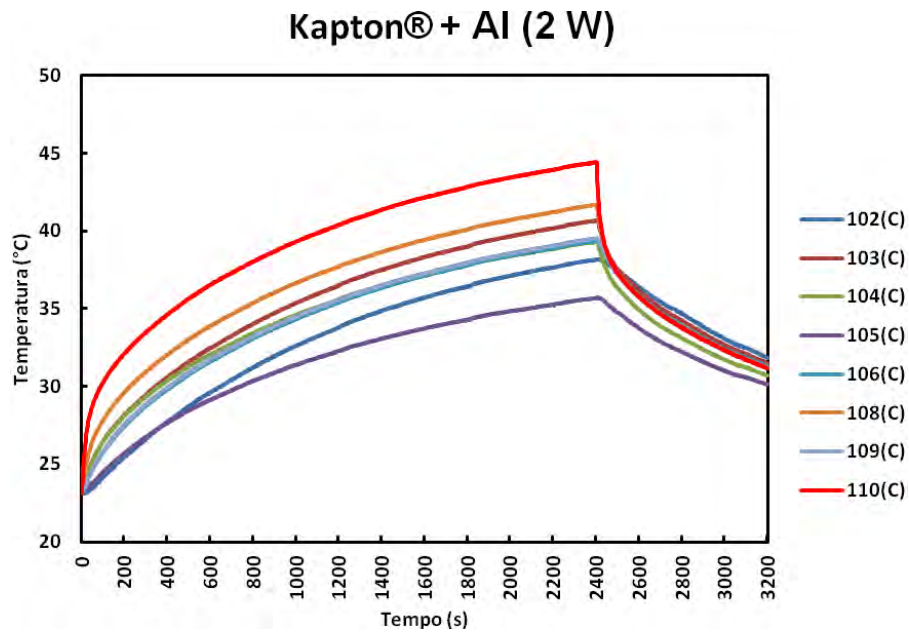


Figura 7.6 – Curvas de temperatura do teste em vácuo com isolamento de Kapton® e Al e 1 W de potência.

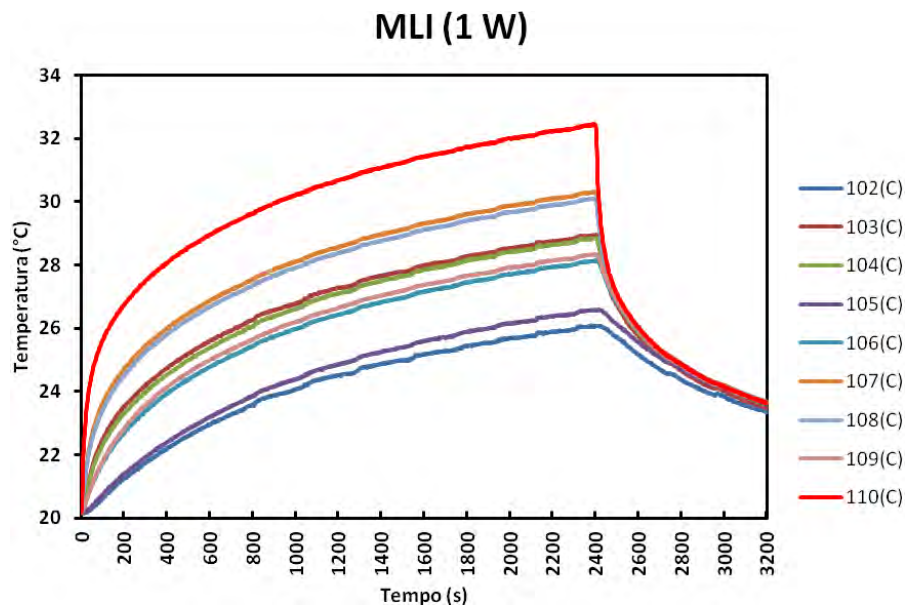


Figura 7.7 – Curvas de temperatura do teste em vácuo com isolamento de MLI e 1 W de potência.

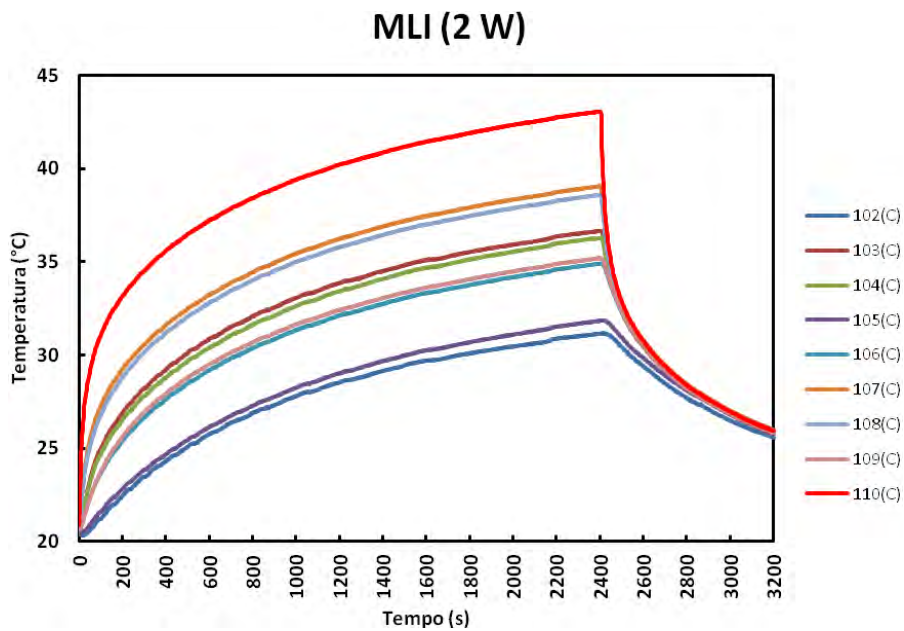


Figura 7.8 - Curvas de temperatura do teste em vácuo com isolamento de MLI e 2 W de potência.

Através dos gráficos, nota-se que quando a placa foi coberta por MLI, ficou menos isolada em comparação com a cobertura com as fitas de Kapton® e alumínio.

Uma imagem do campo de temperaturas durante o aquecimento gerado pela simulação no modelo simplificado isotrópico para isolamento com fitas de Kapton® e alumínio e 2 W de potência dissipada no aquecedor é mostrada na Figura 7.9.



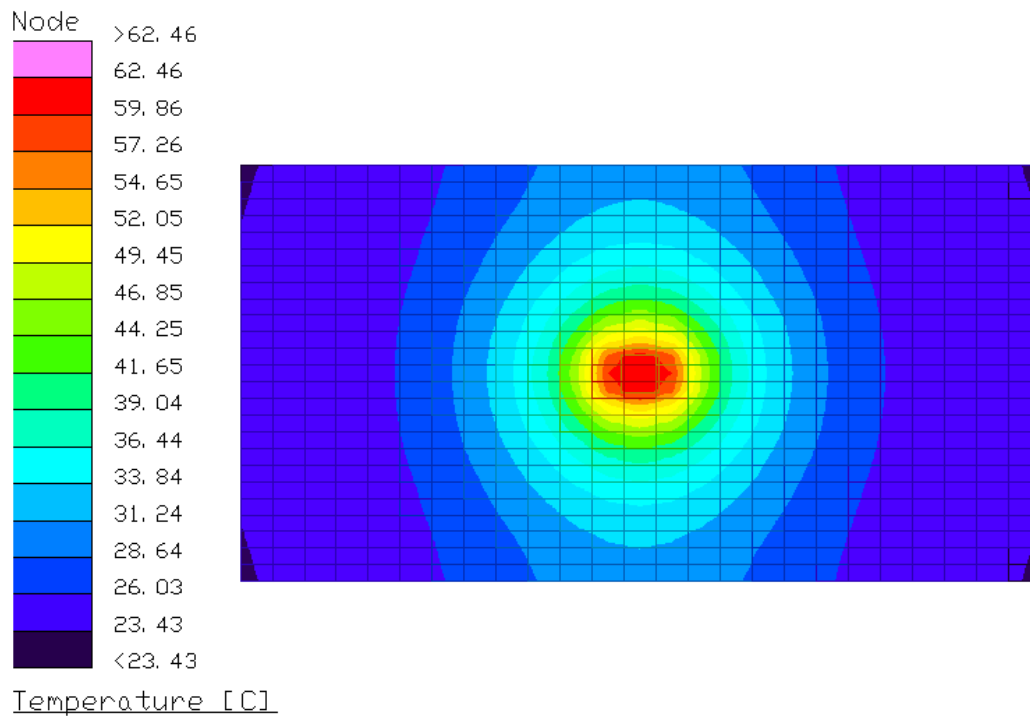


Figura 7.9 – Campo de temperaturas gerado pela simulação com dissipação de 2 W.

Para os casos no vácuo, apenas o modelo simplificado isotrópico foi utilizado no ajuste, ou seja, apenas valores de  $k_{\text{eff}}$  foram obtidos. Porém, os resultados de ajuste com MLI não foram coerentes, sendo que valores muito altos de  $k_{\text{eff}}$  foram encontrados, o que indica resultados pouco conservativos comparados com os demais ajustes. A falta de coerência dos valores de  $k_{\text{eff}}$  se deve provavelmente as diversas incertezas com o uso do MLI, como a sua condutividade térmica efetiva e seus acoplamentos com a PCB, além do vácuo insuficiente devido ao uso apenas de uma bomba de vácuo mecânica.

A Tabela 7.12 mostra o ajuste de  $k_{\text{eff}}$  e a diferença média entre as temperaturas do experimento e da simulação.

Tabela 7.12 – Ajuste de  $k_{eff}$  para testes no vácuo para isolamento com fitas de Kapton® e Al.

Potência no aquecedor (W)	$k_{eff}$ (W/m°C)	$\Delta T$ (°C)
1	8.0	0.84
2	8.0	1.91

Os valores de  $k_{eff}$  obtidos utilizando os dados dos testes com a isolamento feita com fita Kapton® e fita de alumínio, estão de acordo com os resultados obtidos para a mesma placa através de método transiente em ambiente ( $k_{eff}=9.0$  W/m°C) e permanente ( $k_{eff}=12.0$  W/m°C) dentro da faixa de incerteza aceitável.

### 7.6. Análise dos resultados

Os resultados obtidos pelo ajuste dos modelos apresentam coerência de acordo com os valores anteriormente calculados utilizando métodos canônicos simplificados, portanto serão utilizados para a determinação tanto da equação para cálculo da  $k_{eff}$  a partir de  $k_p$  e  $k_s$  como para a determinação dos fatores de ajuste nas equações de  $k_{p,eff}$  e  $k_{s,eff}$ .

Aproximadamente 10% dos resultados ajustados foram desconsiderados na análise estatística por apresentarem valores incoerentes em comparação com os demais.

Os valores médios e seus respectivos desvios padrões para os valores de  $k_{p,eff}$ ,  $k_{s,eff}$  e  $k_{eff}$  ajustados são apresentados na Tabela 7.13.

Tabela 7.13 - Médias e desvios padrões dos valores ajustados de  $k_{eff}$ ,  $k_{p,eff}$  e  $k_{s,eff}$ .

Placa	$\mu_{keff}$ (W/m°C)	$\sigma_{keff}$ (W/m°C)	$2\sigma_{keff}$ (W/m°C)	Desvio $2\sigma_{keff}$ (%)	$\mu_{kp,eff}$ (W/m°C)	$\sigma_{kp,eff}$ (W/m°C)	$2\sigma$	Desvio $2\sigma_{kp,eff}$ (%)	$\mu_{ks,eff}$ (W/m°C)	$\sigma_{ks,eff}$ (W/m°C)	$2\sigma_{ks,eff}$	Desvio $2\sigma$ (%)
PCB_01	5.1	0.8	1.6	31.4	6.4	0.8	1.6	25.0	0.33	0.05	0.10	30.3
PCB_02	2.2	0.8	1.6	72.7	1.9	0.4	0.8	42.1	0.40	0.20	0.40	100.0
PCB_03	1.4	0.1	0.2	14.3	1.7	0.2	0.4	23.5	0.23	0.03	0.06	26.1
PCB_04	7.7	0.3	0.6	7.8	14.3	1.2	2.4	16.8	0.23	0.05	0.10	43.5
PCB_05	6.2	1.0	2.0	32.3	8.6	1.9	3.8	44.2	0.26	0.09	0.18	69.2
PCB_06	6.9	1.5	3.0	43.5	8.9	1.8	3.6	40.4	0.30	0.04	0.08	26.7
PCB_07	2.8	1.5	3.0	107.1	2.1	0.4	0.8	38.1	0.26	0.06	0.12	46.2
PCB_08	10.0	2.1	4.2	42.0	13.0	2.0	4.0	30.8	0.25	0.07	0.14	56.0
PCB_09	8.8	1.3	2.6	29.5	12.0	1.8	3.6	30.0	0.23	0.03	0.06	26.1
PCB_10	9.7	1.2	2.4	24.7	11.6	2.1	4.2	36.2	0.25	0.04	0.08	32.0
PCB_11	13.4	0.2	0.4	3.0	18.9	0.9	1.8	9.5	0.23	0.03	0.06	26.1
	<b>Média</b>			<b>37.1</b>	<b>Média</b>			<b>30.6</b>	<b>Média</b>			<b>43.8</b>

A principal razão do aparecimento destas incertezas é a não-homogeneidade na distribuição do cobre contido nas trilhas condutoras.

Os desvios fornecem a informações importantes para o projetista térmico do equipamento eletrônico, que pode recalcular as faixas de incerteza para as temperaturas dos componentes eletrônicos.

Desconsiderando aproximadamente 10% dos resultados, pode-se observar a partir das tabelas que os valores das condutividades obtidas através de 2 diferentes métodos (transiente e permanente), são os mesmos dentro do desvio padrão. Isso valida o uso de métodos experimentais transientes, sendo mais rápidos para gerar o montante principal de dados experimentais.

Os resultados apresentados no ajuste utilizando dados do teste em vácuo também ficaram dentro dos valores encontrados pelo ajuste utilizando dados dos outros testes. O método em regime transiente em ambiente convectivo, utilizado para a maior parte dos dados experimentais fica validado.



## 8 AJUSTE DE FATORES EM EXPRESSÕES PARA CÁLCULO DE CONDUTIVIDADES TÉRMICAS EFETIVAS ANISOTRÓPICAS

O cálculo das condutividades canônicas para PCBs foi apresentado na Seção 3.4, onde expressões para o cálculo de  $k_p$ ,  $k_s$  e  $k_{sp}$  a partir das propriedades das placas foram mostradas. Estas equações são simplificadas, e foram elaboradas com várias suposições.

Particularmente, a equação de  $k_p$  foi elaborada supondo-se que as camadas condutivas são homogêneas e não leva em conta a influência de irregularidade na distribuição das trilhas nas camadas condutivas, o que teoricamente pioraria a condutividade térmica no plano da placa. Ainda, a equação de  $k_s$  não leva em conta a influência dos furos metalizados, os quais teoricamente melhorariam a condutividade no sentido transversal ao plano da placa. Por outro lado, a equação de  $k_{sp}$  foi elaborada com a suposição que a metalização de furos está distribuída homogeneamente no volume do material da placa, o que resulta valores muito otimistas para condutividade transversal ao plano.

A seguir, expressões criadas com a introdução de fatores corretivos são apresentadas. Mesmo sabendo que as expressões de  $k_p$  e  $k_s$  foram elaboradas com a hipótese que as camadas condutivas são homogêneas, com os fatores  $\xi$  e  $\zeta$  é possível adaptá-las para a obtenção das condutividades térmicas efetivas de PCBs reais com menor incerteza. Os resultados baseados em dados experimentais são apresentadas a seguir.

### 8.1. Expressão de $k_{p,eff}$ com fator de ajuste $\xi$

Propõe-se a incorporação de um fator  $\xi$  na expressão para calcular  $k_p$ , o qual será ajustado a partir dos resultados experimentais de  $k_{p,eff}$  apresentados no Capítulo 7 e será responsável por representar o impacto da não-homogeneidade na distribuição das tilhas de cobre na condutividade térmica efetiva no plano da PCB, ou seja, se este fator for igual a 1 significa que as camadas condutivas são absolutamente homogêneas, com condutividade

única proporcional a porcentagem de cobertura de cobre, o que é apenas uma idealização. Por isso espera-se valores ajustados a partir de dados experimentais menores que 1. A Equação 8.1 mostra a expressão já com o fator  $\xi$  embutido.

$$k_{p,eff} = \frac{\sum_{i=J[1]} k_{FR4} t_i + \xi \sum_{i=J[2]} f_{ai} k_{Cu} t_i}{\sum_{i=1}^N t_i} \quad (8.1)$$

Onde  $k_{Cu}$  – condutividade do cobre

$k_{FR4}$  – condutividade do FR4

$t_i$  – espessura da camada  $i$

$f_{ai}$  – porcentagem de área coberta por cobre, ou  $f_a = 1$  para camadas de FR4

J[1] – conjunto de números de sub-camadas FR4

J[2] – conjunto de números de sub-camadas metalizadas

## 8.2. Expressão de $k_{s,eff}$ com fator de ajuste $\zeta$

Para a expressão de  $k_s$ , propõe-se a incorporação de um fator  $\zeta$ , o qual também será ajustado a partir dos resultados obtidos experimentalmente de  $k_{s,eff}$  apresentados na Seção 7.4 e será responsável por representar a influência dos furos metalizados na condutividade efetiva normal ao plano da PCB, uma vez que na área onde existe a metalização do furo, representada na expressão por  $f_h$ , a condutividade de um lado ao outro da placa se dá apenas no material condutivo, ou seja, no cobre e isso acaba melhorando o parâmetro  $k_{s,eff}$ . Se este valor for igual a 1, significa que todo o cobre usado na metalização dos furos está distribuído homogeneamente no volume de placa, mas é apenas uma idealização. Se este valor for igual a 0, significa que não existe influência da metalização dos furos no valor de  $k_s$ . O valor esperado está

entre 0 e 1, entretanto, considerando o carácter discreto dos furos, espera-se um valor próximo a 0.

Com isso na Equação 8.2 para condutividade transversal efetiva aparece um componente que melhora a magnitude de  $k_s$ :

$$k_{s,eff} = (1 - \zeta f_h) \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{\sum_{i=1}^N \frac{t_i}{f_{ai} k_i}} + \zeta f_h k_{Cu} \quad (8.2)$$

Onde  $k_{Cu}$  – condutividade do cobre

$k_i$  – condutividade do material da camada i (cobre ou FR4)

$t_i$  – espessura da camada i

$f_{ai}$  – porcentagem de área coberta por cobre, ou  $f_a = 1$  para camadas de FR4

$f_h$  – porcentagem da área da placa com metalização de furos passantes

A área de metalização transversal  $A_h$  deve ser levantada para todos os furos que a placa possui. A área de metalização para cada furo é calculada pela  $A_{h,i} = D_{h,i} t_{h,i}$ . A área total  $A_h$  será a soma de áreas de metalização de todos furos. Para considerar também condutividade através dos pés dos componentes eletrônicos, os quais são inseridos nos furos passantes, sugere-se o uso da expressão  $A_{h,i} = D_{h,i} t_{h,i} + (k_{ft,i} / k_{Cu}) \cdot (\pi/4) \cdot D_{h,i}^2$ . O fator de área de metalização dos furos passantes  $f_h$  é calculado por  $f_h = A_h / A_{PCB}$ .



### **8.3. Resultado do ajuste de $\xi$ e $\zeta$ e suas faixas de incerteza**

Utilizando as Equações 22 e 23 onde  $k_{p,eff}$  e  $k_{s,eff}$  são obtidos dos dados experimentais da Tabela 7.1 à Tabela 7.11 na seção 7.4, pode-se estimar os valores de  $\xi$  e  $\zeta$ .

Os valores de  $\xi$  foram calculados para cada uma das 44 condutividades térmicas efetivas no plano,  $k_{p,eff}$ , obtidas no ajuste experimental e estão apresentados na Tabela 8.1, onde T(P1)= teste em regime transiente com aquecedor na posição 1, T(P2)= teste em regime transiente com aquecedor na posição 2, T(P3)= teste em regime transiente com aquecedor na posição 3 e SS(P1)= teste em regime permanente com aquecedor na posição 1.

Tabela 8.1 – Resultados do cálculo dos valores do fator  $\xi$ .

Placa/Teste	$k_{p,eff}$ (W/m <sup>2</sup> C)	$\xi$	Placa/Teste	$k_{p,eff}$ (W/m <sup>2</sup> C)	$\xi$
PCB_01: T (P1)	5.9	0.38	PCB_07: T (P1)	2.7	0.63
PCB_01: T (P2)	7.5	0.49	PCB_07: T (P2)	2.0	0.45
PCB_01: T (P3)	6.5	0.42	PCB_07: T (P3)	1.7	0.38
PCB_01: SS (P1)	5.6	0.36	PCB_07: SS (P1)	2.0	0.45
PCB_02: T (P1)	1.3	0.22	PCB_08: T (P1)	13.5	0.79
PCB_02: T (P2)	1.9	0.34	PCB_08: T (P2)	11.0	0.64
PCB_02: T (P3)	2.0	0.36	PCB_08: T (P3)	15.5	0.91
PCB_02: SS (P1)	2.3	0.42	PCB_08: SS (P1)	12.0	0.70
PCB_03: T (P1)	1.7	0.30	PCB_09: T (P1)	12.0	0.29
PCB_03: T (P2)	1.5	0.26	PCB_09: T (P2)	11.0	0.27
PCB_03: T (P3)	1.9	0.34	PCB_09: T (P3)	14.5	0.35
PCB_03: SS (P1)	4.1	0.79	PCB_09: SS (P1)	10.5	0.25
PCB_04: T (P1)	15.0	0.23	PCB_10: T (P1)	12.0	0.54
PCB_04: T (P2)	13.0	0.20	PCB_10: T (P2)	13.0	0.58
PCB_04: T (P3)	15.0	0.23	PCB_10: T (P3)	13.0	0.58
PCB_04: SS (P1)	23.0	0.35	PCB_10: SS (P1)	8.5	0.38
PCB_05: T (P1)	9.5	0.45	PCB_11: T (P1)	18.5	0.34
PCB_05: T (P2)	8.5	0.40	PCB_11: T (P2)	19.0	0.35
PCB_05: T (P3)	10.5	0.49	PCB_11: T (P3)	18.0	0.33
PCB_05: SS (P1)	6.0	0.28	PCB_11: SS (P1)	20.0	0.37
PCB_06: T (P1)	8.0	0.36			
PCB_06: T (P2)	8.0	0.36			
PCB_06: T (P3)	11.5	0.52			
PCB_06: SS (P1)	8.0	0.36			

A média de todos os valores calculados para  $\xi$  é igual a 0.42 com desvio padrão de 0.16. A Figura 8.1 mostra um gráfico da distribuição normal dos valores de  $\xi$ .

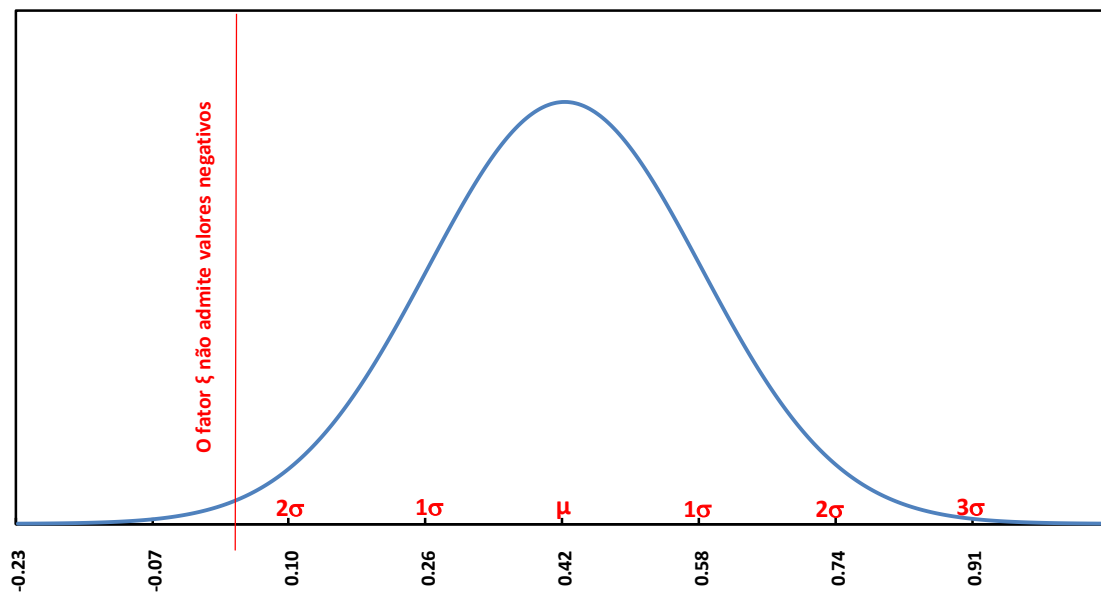


Figura 8.1 - Distribuição normal dos valores calculados de  $\xi$ .

Os valores de  $\zeta$  também foram calculados para cada uma das 44 condutividades térmicas efetivas no sentido transversal,  $k_{s,eff}$ , obtidas no ajuste experimental e estão apresentados na Tabela 8.2, onde T(P1)= teste em regime transiente com aquecedor na posição 1, T(P2)= teste em regime transiente com aquecedor na posição 2, T(P3)= teste em regime transiente com aquecedor na posição 3 e SS(P1)= teste em regime permanente com aquecedor na posição 1.

Tabela 8.2 – Resultados do cálculo dos valores do fator  $\zeta$ .

Placa/Teste	$k_{s,eff}$ (W/m°C)	$\zeta$	Placa/Teste	$k_{s,eff}$ (W/m°C)	$\zeta$
PCB_01: T (P1)	0.30	0.060	PCB_07: T (P1)	0.20	0.000
PCB_01: T (P2)	0.30	0.060	PCB_07: T (P2)	0.25	0.085
PCB_01: T (P3)	0.30	0.060	PCB_07: T (P3)	0.35	0.298
PCB_01: SS (P1)	0.40	0.140	PCB_07: SS (P1)	0.25	0.085
PCB_02: T (P1)	0.70		PCB_08: T (P1)	0.25	0.030
PCB_02: T (P2)	0.30	0.236	PCB_08: T (P2)	0.20	0.000
PCB_02: T (P3)	0.30	0.236	PCB_08: T (P3)	0.20	0.000
PCB_02: SS (P1)	0.30	0.236	PCB_08: SS (P1)	0.35	0.113
PCB_03: T (P1)	0.20	0.000	PCB_09: T (P1)	0.25	0.029
PCB_03: T (P2)	0.25	0.065	PCB_09: T (P2)	0.20	0.000
PCB_03: T (P3)	0.20	0.000	PCB_09: T (P3)	0.20	0.000
PCB_03: SS (P1)	0.25	0.065	PCB_09: SS (P1)	0.25	0.029
PCB_04: T (P1)	0.20	0.000	PCB_10: T (P1)	0.25	0.037
PCB_04: T (P2)	0.20	0.000	PCB_10: T (P2)	0.20	0.000
PCB_04: T (P3)	0.20	0.000	PCB_10: T (P3)	0.25	0.037
PCB_04: SS (P1)	0.30	0.000	PCB_10: SS (P1)	0.30	0.088
PCB_05: T (P1)	0.25	0.015	PCB_11: T (P1)	0.20	0.000
PCB_05: T (P2)	0.20	0.000	PCB_11: T (P2)	0.25	0.025
PCB_05: T (P3)	0.20	0.000	PCB_11: T (P3)	0.25	0.025
PCB_05: SS (P1)	0.40	0.140	PCB_11: SS (P1)	0.20	0.000
PCB_06: T (P1)	0.35	0.088			
PCB_06: T (P2)	0.25	0.015			
PCB_06: T (P3)	0.30	0.050			
PCB_06: SS (P1)	0.30	0.050			

A média de todos os valores calculados para  $\zeta$  é igual a 0.056 com desvio padrão de 0.075. A Figura 8.2 mostra um gráfico da distribuição normal dos valores de  $\zeta$ .

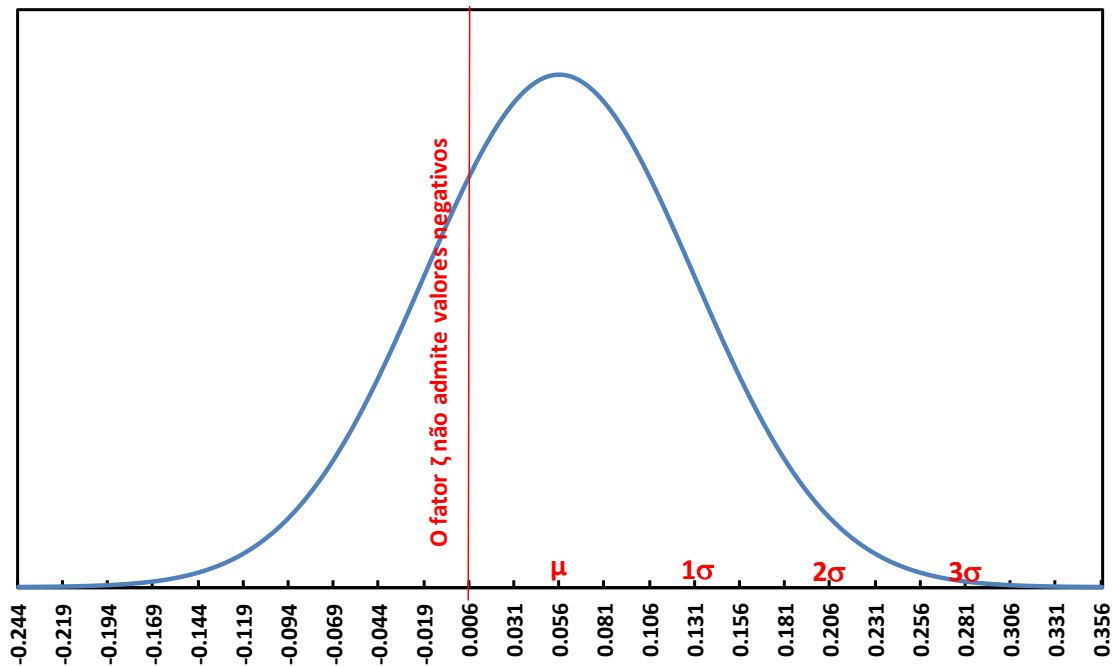


Figura 8.2 – Distribuição normal dos valores calculados de  $\zeta$ .

Baseado nos resultados calculados para  $\xi$  e  $\zeta$ , pode-se concluir que a não-homogeneidade das trilhas condutoras gera um impacto bastante significativo na condutividade efetiva no plano da placa  $k_p$ , enquanto os furos metalizados influenciam muito pouco na condutividade térmica efetiva normal ao plano da placa  $k_s$ .

Para aplicações práticas, aceita-se a faixa de confiabilidade em  $2\sigma$ , o que estatisticamente significa que 95.44% estão dentro deste intervalo. Com isso podemos obter os limites máximo e mínimo deste fatores. A partir destes limites, o projetista térmico do equipamento eletrônico pode calcular os valores de  $k_{p,eff}$  e  $k_{s,eff}$  médios, mínimos e máximos, obtendo assim as faixas de incerteza para estes parâmetros. Estes limite são:  $\xi = 0.42 \pm 0.32$ , ou seja, a faixa de incerteza é de 0.1 a 0.74;  $\zeta = 0.056 \pm 0.075$ , ou seja, a faixa de incerteza é de 0 a 0.206, uma vez que este fator não admite valores negativos.





## 9 CÁLCULO DA CONDUTIVIDADE EFETIVA ISOTRÓPICA A PARTIR DAS CONDUTIVIDADES EFETIVAS ANISOTRÓPICAS

Para realizar o projeto térmico de equipamentos eletrônicos, 2 tipos de modelos de PCBs podem ser usados, modelo isotrópico ou anisotrópico. Na prática, ambos são amplamente utilizados em empresas do ramo aeroespacial para realizar análises térmicas de PCBs. No caso do modelo isotrópico, a abordagem de cálculo mais comum é usar apenas alguma das médias canônicas, ou seja, médias simples aritmética (MA), geométrica (MG) ou harmônica (MH) de  $k_s$  e  $k_p$  para se obter valores para condutividade térmica isotrópica  $k_{eff}$  a partir das condutividades anisotrópicas. Entretanto, esta abordagem fornece uma faixa de incerteza inaceitável para o projeto de equipamentos para uso espacial, de aproximadamente uma ordem de grandeza, dependendo do tipo de média aplicada.

No lugar das médias de  $k_p$  e  $k_s$  simples, neste capítulo serão apresentadas as médias ponderadas de  $k_{p,eff}$  e  $k_{s,eff}$  obtidas com base em dados experimentais no Capítulo 7, são elas: Média Aritmética Ponderada (MAP), Média Geométrica Ponderada (MGP) e Média Harmônica Ponderada (MHP), as quais apresentam resultados significativamente melhores que as médias simples. As expressões elaboradas no Capítulo 8 para o cálculo das condutividades térmicas efetivas anisotrópicas  $k_{p,eff}$  e  $k_{s,eff}$  são usadas para o cálculo da condutividade térmica efetiva isotrópica  $k_{eff}$ .

### 9.1. Média Aritmética Ponderada

Na Média Aritmética Ponderada, os parâmetros  $k_{p,eff}$  e  $k_{s,eff}$  recebem os pesos  $\alpha$  e  $\beta$  respectivamente. Os dados das condutividades efetivas identificadas experimentalmente são utilizados para determinar os valores destes pesos.

A equação a seguir apresenta a forma básica da média aritmética ponderada de  $k_{p,eff}$  e  $k_{s,eff}$  para um conjunto de  $N_{tot}$  placas:



$$k_{i,eff} = \alpha k_{i,p,eff} + \beta k_{i,s,eff} \quad (9.1)$$

Onde  $i$  - o número da placa

Partindo da hipótese que  $\alpha + \beta = 1$ , temos:

$$k_{i,eff} = \alpha k_{i,p,eff} + (1 - \alpha) k_{i,s,eff} \quad (9.2)$$

Ou

$$k_{i,eff} = \alpha(k_{i,p,eff} - k_{i,s,eff}) + k_{i,s,eff} \quad (9.3)$$

A solução de  $\alpha$  é :

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^{N_{tot}} (k_{i,eff} - k_{i,s,eff})}{\sum_{i=1}^{N_{tot}} (k_{i,p,eff} - k_{i,s,eff})} \quad (9.4)$$

O valor de  $\alpha$  foi calculado utilizando os dados experimentais de todas as placas, assim como para grupos de placas de 2 camadas e de 6 camadas. Os resultados dos valores de  $\alpha$  e  $\beta$  para a MAP são apresentados na Tabela 9.1.

Tabela 9.1 – Valores de  $\alpha$  e  $\beta$  para equação da Média Aritmética Ponderada.

<b>Grupo</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b><math>\beta</math></b>
2 camadas	0.89	0.11
6 camadas	0.73	0.27
Todas	0.74	0.26

Para avaliar a faixa de incerteza da aplicação da MAP, partindo-se dos valores de  $\alpha$  e  $\beta$  estimou-se um valor de  $k_{eff}$  com o uso da Equação 9.1 para cada par de valores de  $k_{p,eff}$  e  $k_{s,eff}$  experimentais, o qual foi posteriormente comparado com o valor de  $k_{eff}$  obtido experimentalmente. Este procedimento foi realizado para cada grupo de placas. Os resultados são apresentados respectivamente na Tabela 9.2 à Tabela 9.4, onde T(P1)= teste em regime transiente com aquecedor na posição 1, T(P2)= teste em regime transiente com aquecedor na posição 2, T(P3)= teste em regime transiente com aquecedor na posição 3 e SS(P1)= teste em regime permanente com aquecedor na posição 1.

Tabela 9.2 - Resultados do cálculo de  $k_{eff}$  com o uso da MAP para o grupo de placas de 2 camadas.

	$k_{eff,exp}$ (W/m°C)	$k_{eff,MAP}$ (W/m°C)	$\Delta k_{eff}$ (W/m°C)	Desvio (%)		$k_{eff,exp}$ (W/m°C)	$k_{eff,MAP}$ (W/m°C)	$\Delta k_{eff}$ (W/m°C)	Desvio (%)
<b>PCB_02</b>					<b>PCB_07</b>				
T (P1)	3.2				T (P1)	2.4	2.42	0.02	0.81
T (P2)	1.2	1.72	0.52	43.37	T (P2)	2.0	1.80	0.20	9.82
T (P3)	1.9	1.81	0.09	4.78	T (P3)	5.0			
P (P1)	2.3	2.08	0.22	9.76	P (P1)	1.9	1.80	0.10	5.08
<b>PCB_03</b>									
T (P1)	1.5	1.53	0.03	2.11					
T (P2)	1.4	1.36	0.04	2.88					
T (P3)	1.3	1.71	0.41	31.48					
P (P1)	4.0	3.67	0.33	8.30					

Tabela 9.3 – Resultados do cálculo de  $k_{eff}$  com o uso da MAP para o grupo de placas de 6 camadas.

	$k_{eff,exp}$ (W/m°C)	$k_{eff,MAP}$ (W/m°C)	$\Delta k_{eff}$ (W/m°C)	Desvio (%)		$k_{eff,exp}$ (W/m°C)	$k_{eff,MAP}$ (W/m°C)	$\Delta k_{eff}$ (W/m°C)	Desvio (%)
<b>PCB_01</b>					<b>PCB_08</b>				
T (P1)	3.9	4.38	0.48	12.26	T (P1)	9.0	9.90	0.90	9.99
T (P2)	5.7	5.54	0.16	2.75	T (P2)	7.5	8.06	0.56	7.53
T (P3)	5.5	4.82	0.68	12.45	T (P3)	11.5	11.34	0.16	1.37
P (P1)	5.4	4.19	1.21	22.47	P (P1)	12.0	8.83	3.17	26.38
<b>PCB_04</b>					<b>PCB_09</b>				
T (P1)	8.0	10.98	2.98	37.22	T (P1)	8.0	8.81	0.81	10.08
T (P2)	7.5	9.52	2.02	26.95	T (P2)	7.6	8.06	0.46	6.12
T (P3)	7.7	10.98	3.28	42.57	T (P3)	10.5	10.61	0.11	1.08
P (P1)	17.0	16.83	0.17	0.99	P (P1)	9.0	7.71	1.29	14.28
<b>PCB_05</b>					<b>PCB_10</b>				
T (P1)	5.5	6.99	1.49	27.02	T (P1)	9.3	8.81	0.49	5.30
T (P2)	5.2	6.24	1.04	20.08	T (P2)	8.1	9.52	1.42	17.55
T (P3)	6.5	7.70	1.20	18.47	T (P3)	10.2	9.53	0.67	6.52
P (P1)	7.5	4.48	3.02	40.29	P (P1)	11.0	6.27	4.73	42.99
<b>PCB_06</b>					<b>PCB_11</b>				
T (P1)	6.0	5.92	0.08	1.32	T (P1)	13.5	13.53	0.03	0.20
T (P2)	5.5	5.89	0.39	7.16	T (P2)	13.1	13.90	0.80	6.14
T (P3)	8.7	8.46	0.24	2.80	T (P3)	13.5	13.18	0.32	2.40
P (P1)	7.5	5.91	1.59	21.23	P (P1)	50.0			

Tabela 9.4 – Resultados do cálculo de  $k_{eff}$  com o uso da MAP para o grupo de todas as placas.

	$k_{eff,exp}$ (W/m°C)	$k_{eff,MAP}$ (W/m°C)	$\Delta k_{eff}$ (W/m°C)	Desvio (%)		$k_{eff,exp}$ (W/m°C)	$k_{eff,MAP}$ (W/m°C)	$\Delta k_{eff}$ (W/m°C)	Desvio (%)
<b>PCB_01</b>					<b>PCB_07</b>				
T (P1)	3.9	4.25	0.35	9.04	T (P1)	2.4	1.96	0.44	18.14
T (P2)	5.7	5.38	0.32	5.58	T (P2)	2.0	1.49	0.51	25.74
T (P3)	5.5	4.68	0.82	14.98	T (P3)	5.0			
P (P1)	5.4	4.07	1.33	24.62	P (P1)	1.9	1.49	0.41	21.83
<b>PCB_02</b>					<b>PCB_08</b>				
T (P1)	3.2				T (P1)	9.0	9.60	0.60	6.69
T (P2)	1.2	1.43	0.23	19.11	T (P2)	7.5	7.82	0.32	4.31
T (P3)	1.9	1.50	0.40	21.06	T (P3)	11.5	11.00	0.50	4.35
P (P1)	2.3	1.71	0.59	25.58	P (P1)	12.0	8.57	3.43	28.56
<b>PCB_03</b>					<b>PCB_09</b>				
T (P1)	1.5	1.26	0.24	16.08	T (P1)	8.0	8.54	0.54	6.79
T (P2)	1.4	1.13	0.27	19.12	T (P2)	7.6	7.82	0.22	2.93
T (P3)	1.3	1.40	0.10	7.69	T (P3)	10.5	10.29	0.21	1.97
P (P1)	4.0	2.97	1.03	25.81	P (P1)	9.0	7.48	1.52	16.84
<b>PCB_04</b>					<b>PCB_10</b>				
T (P1)	8.0	10.65	2.65	33.08	T (P1)	9.3	8.54	0.76	8.13
T (P2)	7.5	9.23	1.73	23.13	T (P2)	8.1	9.23	1.13	14.01
T (P3)	7.7	10.65	2.95	38.26	T (P3)	10.2	9.25	0.95	9.32
P (P1)	17.0	16.32	0.68	3.99	P (P1)	11.0	6.09	4.91	44.66
<b>PCB_05</b>					<b>PCB_11</b>				
T (P1)	5.5	6.78	1.28	23.25	T (P1)	13.5	13.12	0.38	2.84
T (P2)	5.2	6.06	0.86	16.51	T (P2)	13.1	13.48	0.38	2.93
T (P3)	6.5	7.47	0.97	14.92	T (P3)	13.5	12.78	0.72	5.34
P (P1)	7.5	4.35	3.15	41.96	P (P1)	50.0			
<b>PCB_06</b>									
T (P1)	6.0	5.75	0.25	4.17					
T (P2)	5.5	5.72	0.22	4.00					
T (P3)	8.7	8.21	0.49	5.69					
P (P1)	7.5	5.73	1.77	23.53					

As médias do desvio de  $k_{eff}$  ficou em 11.84%, 14.65% e 15.76%, para grupos de placas de 2 camadas, 6 camadas e de todas as placas, respectivamente.

## 9.2. Média Geométrica Poderada

Na Média Geométrica Ponderada, os parâmetros  $k_{p,eff}$  e  $k_{s,eff}$  recebem os pesos  $\alpha$  e  $\beta$  respectivamente. Os dados das condutividades efetivas identificadas experimentalmente são utilizados para determinar os valores destes pesos.

A equação a seguir apresenta a forma básica da média geométrica ponderada de  $k_{p,eff}$  e  $k_{s,eff}$ .

$$k_{i,eff} = k_{i,p,eff}^{\alpha} k_{i,s,eff}^{\beta} \quad (9.5)$$

Partindo da definição que  $\alpha + \beta = 1$ , temos:

$$k_{i,eff} = k_{i,p,eff}^{\alpha} k_{i,s,eff}^{(1-\alpha)} \quad (9.6)$$

Ou

$$\ln(k_{i,eff}) = \alpha \ln(k_{i,p,eff}) + (1 - \alpha) \ln(k_{i,s,eff}) \quad (9.7)$$

Ou

$$\ln(k_{i,eff}) = \alpha (\ln(k_{i,p,eff}) - \ln(k_{i,s,eff})) + \ln(k_{i,s,eff}) \quad (9.8)$$

A solução de  $\alpha$  é:

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^{N_{tot}} (Ln(k_{i,eff}) - Ln(k_{i,s,eff}))}{\sum_{i=1}^{N_{tot}} (Ln(k_{i,p,eff}) - Ln(k_{i,s,eff}))} \quad (9.9)$$

O valor de  $\alpha$  foi calculado utilizando os dados experimentais de todas as placas, assim como para grupos de placas de 2 camadas e de 6 camadas. Os resultados dos valores de  $\alpha$  e  $\beta$  para a MGP são apresentados na Tabela 9.5.

Tabela 9.5 – Valores de  $\alpha$  e  $\beta$  para equação da Média Geométrica Ponderada.

<b>Grupo</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b><math>\beta</math></b>
2 camadas	0.94	0.06
6 camadas	0.92	0.08
Todas	0.92	0.08

Com os valores de  $\alpha$  e  $\beta$  estimou-se um valor de  $k_{eff}$  com o uso da Equação 9.5 para cada par de valores de  $k_{p,eff}$  e  $k_{s,eff}$  experimentais, o qual foi posteriormente comparado com o valor de  $k_{eff}$  obtido experimentalmente. Este procedimento foi realizado para cada grupo de placas. Os resultados são apresentados respectivamente na Tabela 9.6, Tabela 9.7 e Tabela 9.8, onde T(P1)= teste em regime transiente com aquecedor na posição 1, T(P2)= teste em regime transiente com aquecedor na posição 2, T(P3)= teste em regime transiente com aquecedor na posição 3 e SS(P1)= teste em regime permanente com aquecedor na posição 1.

Tabela 9.6 – Resultados do cálculo de  $k_{eff}$  com o uso da MGP para o grupo de placas de 2 camadas.

	$k_{eff,exp}$ (W/m°C)	$k_{eff,MGP}$ (W/m°C)	$\Delta k_{eff}$ (W/m°C)	Desvio (%)		$k_{eff,exp}$ (W/m°C)	$k_{eff,MGP}$ (W/m°C)	$\Delta k_{eff}$ (W/m°C)	Desvio (%)
<b>PCB_02</b>					<b>PCB_07</b>				
T (P1)	3.2				T (P1)	2.4	2.31	0.09	3.61
T (P2)	1.2	1.70	0.50	41.89	T (P2)	2.0	1.77	0.23	11.62
T (P3)	1.9	1.79	0.11	5.95	T (P3)	5.0			
P (P1)	2.3	2.04	0.26	11.39	P (P1)	1.9	1.77	0.13	6.97
<b>PCB_03</b>									
T (P1)	1.5	1.50	0.00	0.19					
T (P2)	1.4	1.35	0.05	3.67					
T (P3)	1.3	1.66	0.36	27.86					
P (P1)	4.0	3.47	0.53	13.19					

Tabela 9.7 – Resultados do cálculo de  $k_{eff}$  com o uso da MGP para o grupo de placas de 6 camadas.

	$k_{eff,exp}$ (W/m°C)	$k_{eff,MGP}$ (W/m°C)	$\Delta k_{eff}$ (W/m°C)	Desvio (%)		$k_{eff,exp}$ (W/m°C)	$k_{eff,MGP}$ (W/m°C)	$\Delta k_{eff}$ (W/m°C)	Desvio (%)
<b>PCB_01</b>					<b>PCB_08</b>				
T (P1)	3.9	4.65	0.75	19.16	T (P1)	9.0	9.81	0.81	8.96
T (P2)	5.7	5.80	0.10	1.67	T (P2)	7.5	7.98	0.48	6.39
T (P3)	5.5	5.08	0.42	7.63	T (P3)	11.5	10.94	0.56	4.88
P (P1)	5.4	4.53	0.87	16.06	P (P1)	12.0	9.04	2.96	24.66
<b>PCB_04</b>					<b>PCB_09</b>				
T (P1)	8.0	10.61	2.61	32.67	T (P1)	8.0	8.80	0.80	10.00
T (P2)	7.5	9.30	1.80	24.06	T (P2)	7.6	7.98	0.38	4.99
T (P3)	7.7	10.61	2.91	37.84	T (P3)	10.5	10.29	0.21	2.02
P (P1)	17.0	16.25	0.75	4.44	P (P1)	9.0	7.78	1.22	13.53
<b>PCB_05</b>					<b>PCB_10</b>				
T (P1)	5.5	7.10	1.60	29.06	T (P1)	9.3	8.80	0.50	5.38
T (P2)	5.2	6.29	1.09	21.04	T (P2)	8.1	9.30	1.20	14.87
T (P3)	6.5	7.64	1.14	17.61	T (P3)	10.2	9.47	0.73	7.14
P (P1)	7.5	4.83	2.67	35.60	P (P1)	11.0	6.50	4.50	40.89
<b>PCB_06</b>					<b>PCB_11</b>				
T (P1)	6.0	6.23	0.23	3.76	T (P1)	13.5	12.87	0.63	4.65
T (P2)	5.5	6.06	0.56	10.19	T (P2)	13.1	13.43	0.33	2.51
T (P3)	8.7	8.59	0.11	1.30	T (P3)	13.5	12.78	0.72	5.35
P (P1)	7.5	6.15	1.35	18.01	P (P1)	50.0			

Tabela 9.8 – Resultados do cálculo de  $k_{eff}$  com o uso da MGP para o grupo de todas as placas.

	$k_{eff,exp}$ (W/m°C)	$k_{eff,MGP}$ (W/m°C)	$\Delta k_{eff}$ (W/m°C)	Desvio (%)		$k_{eff,exp}$ (W/m°C)	$k_{eff,MGP}$ (W/m°C)	$\Delta k_{eff}$ (W/m°C)	Desvio (%)
<b>PCB_01</b>					<b>PCB_07</b>				
T (P1)	3.9	4.69	0.79	20.31	T (P1)	2.4	2.21	0.19	7.91
T (P2)	5.7	5.86	0.16	2.73	T (P2)	2.0	1.70	0.30	14.78
T (P3)	5.5	5.13	0.37	6.71	T (P3)	5.0			
P (P1)	5.4	4.57	0.83	15.34	P (P1)	1.9	1.70	0.20	10.29
<b>PCB_02</b>					<b>PCB_08</b>				
T (P1)	3.2				T (P1)	9.0	9.93	0.93	10.37
T (P2)	1.2	1.65	0.45	37.38	T (P2)	7.5	8.08	0.58	7.77
T (P3)	1.9	1.73	0.17	9.03	T (P3)	11.5	11.09	0.41	3.54
P (P1)	2.3	1.97	0.33	14.50	P (P1)	12.0	9.14	2.86	23.80
<b>PCB_03</b>					<b>PCB_09</b>				
T (P1)	1.5	1.44	0.06	3.86	T (P1)	8.0	8.91	0.91	11.38
T (P2)	1.4	1.31	0.09	6.65	T (P2)	7.6	8.08	0.48	6.35
T (P3)	1.3	1.60	0.30	22.92	T (P3)	10.5	10.43	0.07	0.66
P (P1)	4.0	3.31	0.69	17.34	P (P1)	9.0	7.88	1.12	12.48
<b>PCB_04</b>					<b>PCB_10</b>				
T (P1)	8.0	10.76	2.76	34.53	T (P1)	9.3	8.91	0.39	4.19
T (P2)	7.5	9.43	1.93	25.74	T (P2)	8.1	9.43	1.33	16.42
T (P3)	7.7	10.76	3.06	39.77	T (P3)	10.2	9.59	0.61	5.94
P (P1)	17.0	16.47	0.53	3.09	P (P1)	11.0	6.57	4.43	40.25
<b>PCB_05</b>					<b>PCB_11</b>				
T (P1)	5.5	7.18	1.68	30.58	T (P1)	13.5	13.06	0.44	3.25
T (P2)	5.2	6.37	1.17	22.52	T (P2)	13.1	13.62	0.52	3.96
T (P3)	6.5	7.74	1.24	19.12	T (P3)	13.5	12.96	0.54	4.04
P (P1)	7.5	4.87	2.63	35.04	P (P1)	50.0			
<b>PCB_06</b>									
T (P1)	6.0	6.29	0.29	4.82					
T (P2)	5.5	6.13	0.63	11.42					
T (P3)	8.7	8.69	0.01	0.14					
P (P1)	7.5	6.21	1.29	17.13					

As médias do desvio de  $k_{eff}$  ficou em 12.64%, 14.08% e 14.34%, para grupos de placas de 2 camadas, 6 camadas e no total, respectivamente.



### 9.3. Média Harmônica Ponderada

Na média harmônica ponderada, os parâmetros  $k_{p,eff}$  e  $k_{s,eff}$  recebem os pesos  $\alpha$  e  $\beta$  respectivamente. Os dados das condutividades efetivas identificadas experimentalmente são utilizados para determinar os valores destes pesos.

A equação a seguir apresenta a forma básica da média harmônica ponderada de  $k_{p,eff}$  e  $k_{s,eff}$ .

$$k_{i,eff} = \frac{1}{\frac{\alpha}{k_{i,p,eff}} + \frac{\beta}{k_{i,s,eff}}} \quad (9.10)$$

Partindo da hipótese que  $\alpha + \beta = 1$ , temos:

$$k_{i,eff} = \frac{1}{\frac{\alpha}{k_{i,p,eff}} + \frac{(1-\alpha)}{k_{i,s,eff}}} \quad (9.11)$$

Ou

$$\frac{\alpha}{k_{i,p,eff}} + \frac{(1-\alpha)}{k_{i,s,eff}} = \frac{1}{k_{i,eff}} \quad (9.12)$$

Ou

$$\frac{\alpha}{k_{i,p,eff}} + \frac{(1-\alpha)}{k_{i,s,eff}} = \frac{1}{k_{i,eff}} \quad (9.13)$$

Ou

$$\frac{\alpha}{k_{i,p,eff}} - \frac{\alpha}{k_{i,s,eff}} = \frac{1}{k_{i,eff}} - \frac{1}{k_{i,s,eff}} \quad (9.14)$$

A solução de  $\alpha$  é:

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^{N_{tot}} \left( \frac{1}{k_{i,eff}} - \frac{1}{k_{i,s,eff}} \right)}{\sum_{i=1}^{N_{tot}} \left( \frac{1}{k_{i,p,eff}} - \frac{1}{k_{i,s,eff}} \right)} \quad (9.15)$$

O valor de  $\alpha$  foi calculado utilizando os dados experimentais de todas as placas, assim como para dois grupos de placas de 2 camadas e de 6 camadas. Os resultados dos valores de  $\alpha$  e  $\beta$  para a média harmônica ponderada são apresentados na Tabela 9.9.

Tabela 9.9 – Valores de  $\alpha$  e  $\beta$  para equação da Média Harmônica Ponderada.

<b>Grupo</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b><math>\beta</math></b>
2 camadas	0.98	0.02
6 camadas	0.99	0.01
Todas	0.99	0.01

Com os valores de  $\alpha$  e  $\beta$  estimou-se um valor estimado de  $k_{eff}$  com o uso da Equação 9.10 para cada par de valores de  $k_{p,eff}$  e  $k_{s,eff}$  experimentais, o qual foi posteriormente comparado com o valor de  $k_{eff}$  obtido através do ajuste experimental. Este procedimento foi realizado para o cada grupo. Os resultados são apresentados respectivamente em Tabela 9.10, Tabela 9.11 e Tabela 9.12, onde T(P1)= teste em regime transiente com aquecedor na posição 1, T(P2)= teste em regime transiente com aquecedor na posição 2, T(P3)= teste em regime transiente com aquecedor na posição 3 e SS(P1)= teste em regime permanente com aquecedor na posição 1.

Tabela 9.10 – Resultados do cálculo de  $k_{eff}$  com o uso da MHP para o grupo de placas de 2 camadas.

	$k_{eff,exp}$ (W/m°C)	$k_{eff,MHP}$ (W/m°C)	$\Delta k_{eff}$ (W/m°C)	Desvio (%)		$k_{eff,exp}$ (W/m°C)	$k_{eff,MHP}$ (W/m°C)	$\Delta k_{eff}$ (W/m°C)	Desvio (%)
<b>PCB_02</b>					<b>PCB_07</b>				
<b>T (P1)</b>	3.2				<b>T (P1)</b>	2.4	2.13	0.27	11.42
<b>T (P2)</b>	1.2	1.70	0.50	41.97	<b>T (P2)</b>	2.0	1.74	0.26	13.14
<b>T (P3)</b>	1.9	1.78	0.12	6.22	<b>T (P3)</b>	5.0			
<b>P (P1)</b>	2.3	2.01	0.29	12.59	<b>P (P1)</b>	1.9	1.74	0.16	8.57
<b>PCB_03</b>									
<b>T (P1)</b>	1.5	1.46	0.04	2.47					
<b>T (P2)</b>	1.4	1.35	0.05	3.30					
<b>T (P3)</b>	1.3	1.61	0.31	23.47					
<b>P (P1)</b>	4.0	3.08	0.92	23.09					

Tabela 9.11 – Resultados do cálculo de  $k_{eff}$  com o uso da MHP para o grupo de placas de 6 camadas.

	$k_{eff,exp}$ (W/m°C)	$k_{eff,MHP}$ (W/m°C)	$\Delta k_{eff}$ (W/m°C)	Desvio (%)		$k_{eff,exp}$ (W/m°C)	$k_{eff,MHP}$ (W/m°C)	$\Delta k_{eff}$ (W/m°C)	Desvio (%)
<b>PCB_01</b>					<b>PCB_08</b>				
T (P1)	3.9	5.10	1.20	30.83	T (P1)	9.0	9.35	0.35	3.89
T (P2)	5.7	6.24	0.54	9.56	T (P2)	7.5	7.57	0.07	1.00
T (P3)	5.5	5.54	0.04	0.75	T (P3)	11.5	9.45	2.05	17.84
P (P1)	5.4	5.05	0.35	6.48	P (P1)	12.0	9.38	2.62	21.80
<b>PCB_04</b>					<b>PCB_09</b>				
T (P1)	8.0	9.26	1.26	15.77	T (P1)	8.0	8.61	0.61	7.64
T (P2)	7.5	8.46	0.96	12.85	T (P2)	7.6	7.57	0.03	0.33
T (P3)	7.7	9.26	1.56	20.28	T (P3)	10.5	9.07	1.43	13.62
P (P1)	17.0	14.08	2.92	17.18	P (P1)	9.0	7.82	1.18	13.15
<b>PCB_05</b>					<b>PCB_10</b>				
T (P1)	5.5	7.25	1.75	31.87	T (P1)	9.3	8.61	0.69	7.41
T (P2)	5.2	6.31	1.11	21.31	T (P2)	8.1	8.46	0.36	4.49
T (P3)	6.5	7.34	0.84	12.87	T (P3)	10.2	9.11	1.09	10.69
P (P1)	7.5	5.37	2.13	28.39	P (P1)	11.0	6.92	4.08	37.12
<b>PCB_06</b>					<b>PCB_11</b>				
T (P1)	6.0	6.76	0.76	12.71	T (P1)	13.5	10.47	3.03	22.41
T (P2)	5.5	6.35	0.85	15.48	T (P2)	13.1	11.67	1.43	10.91
T (P3)	8.7	8.76	0.06	0.70	T (P3)	13.5	11.29	2.21	16.38
P (P1)	7.5	6.58	0.92	12.20	P (P1)	50.0			

Tabela 9.12 – Resultados do cálculo de  $k_{eff}$  com o uso da MHP para o grupo de todas as placas.

	$k_{eff,exp}$ (W/m°C)	$k_{eff,MHP}$ (W/m°C)	$\Delta k_{eff}$ (W/m°C)	Desvio (%)		$k_{eff,exp}$ (W/m°C)	$k_{eff,MHP}$ (W/m°C)	$\Delta k_{eff}$ (W/m°C)	Desvio (%)
<b>PCB_01</b>					<b>PCB_07</b>				
T (P1)	3.9	4.86	0.96	24.74	T (P1)	2.4	2.36	0.04	1.53
T (P2)	5.7	5.89	0.19	3.32	T (P2)	2.0	1.85	0.15	7.39
T (P3)	5.5	5.26	0.24	4.35	T (P3)	5.0			
P (P1)	5.4	4.88	0.52	9.68	P (P1)	1.9	1.85	0.05	2.51
<b>PCB_02</b>					<b>PCB_08</b>				
T (P1)	3.2				T (P1)	9.0	8.42	0.58	6.49
T (P2)	1.2	1.79	0.59	49.26	T (P2)	7.5	6.81	0.69	9.21
T (P3)	1.9	1.88	0.02	1.12	T (P3)	11.5	8.28	3.22	28.00
P (P1)	2.3	2.14	0.16	7.06	P (P1)	12.0	8.70	3.30	27.50
<b>PCB_03</b>					<b>PCB_09</b>				
T (P1)	1.5	1.57	0.07	4.41	T (P1)	8.0	7.81	0.19	2.32
T (P2)	1.4	1.42	0.02	1.37	T (P2)	7.6	6.81	0.79	10.41
T (P3)	1.3	1.73	0.43	33.25	T (P3)	10.5	7.99	2.51	23.91
P (P1)	4.0	3.49	0.51	12.80	P (P1)	9.0	7.16	1.84	20.49
<b>PCB_04</b>					<b>PCB_10</b>				
T (P1)	8.0	8.14	0.14	1.71	T (P1)	9.3	7.81	1.49	15.98
T (P2)	7.5	7.52	0.02	0.23	T (P2)	8.1	7.52	0.58	7.20
T (P3)	7.7	8.14	0.44	5.68	T (P3)	10.2	8.22	1.98	19.40
P (P1)	17.0	12.35	4.65	27.36	P (P1)	11.0	6.48	4.52	41.08
<b>PCB_05</b>					<b>PCB_11</b>				
T (P1)	5.5	6.68	1.18	21.49	T (P1)	13.5	9.06	4.44	32.92
T (P2)	5.2	5.77	0.57	10.97	T (P2)	13.1	10.24	2.86	21.80
T (P3)	6.5	6.62	0.12	1.79	T (P3)	13.5	9.95	3.55	26.30
P (P1)	7.5	5.17	2.33	31.01	P (P1)	50.0			
<b>PCB_06</b>									
T (P1)	6.0	6.40	0.40	6.74					
T (P2)	5.5	5.91	0.41	7.48					
T (P3)	8.7	8.07	0.63	7.27					
P (P1)	7.5	6.19	1.31	17.47					

As médias do desvio de  $k_{eff}$  ficou em 14.63%, 14.13% e 14.51%, para grupos de placas de 2 camadas, 6 camadas e no total, respectivamente.

#### 9.4. Escolha da melhor média ponderada

A fim de escolher qual das médias fornece a melhor estimativa para valor de  $k_{eff}$  a partir dos valores de  $k_{p,eff}$  e  $k_{s,eff}$ , a média dos desvios entre valor de  $k_{eff}$  calculado e medido foi determinada para cada uma das 3 médias e é apresentada na Tabela 9.13.

Tabela 9.13 – Desvio médio dos valores de  $k_{eff}$  experimentais e calculados através das médias.

GRUPO	Média do desvio de $k_{eff}$ (%)		
	MAP	MGP	MHP
<b>TOTAL</b>	15.76	14.34	14.51
<b>2 LAYERS</b>	11.84	12.64	14.63
<b>6 LAYERS</b>	14.65	14.08	14.13
<b>MÉDIA</b>	<b>14.08</b>	<b>13.69</b>	<b>14.42</b>

Nota-se que a menor média de desvios entre o  $k_{eff}$  experimental e calculado é a fornecida pela Média Geométrica Ponderada (MGP), portanto é a média que fornece um valor de  $k_{eff}$  com maior precisão. Entretanto, deve-se enfatizar que a diferença entre as médias ponderadas mostra-se bastante pequena enquanto a diferença entre as médias canônicas simples apresenta-se muito maior.

A Tabela 9.14 mostra um exemplo de cálculo da condutividade térmica efetiva isotrópica  $k_{eff}$  para a PCB\_11 através das Médias Canônicas Simples em comparação com as Médias Ponderadas.

Tabela 9.14 – Exemplo de comparação dos resultados obtidos com diferentes métodos para a PCB\_11.

<b>PCB_11</b>				
<b>Métodos Canônicos Simplificados</b>				
$k_p$ (W/m°C)	$k_s$ (W/m°C)	$k_{eff}$ MA (W/m°C)	$k_{eff}$ MG (W/m°C)	$k_{eff}$ MH (W/m°C)
32.37	0.22	16.29	2.64	0.43
<b>Métodos com Médias Ponderadas</b>				
$k_{p,eff}$ (W/m°C)	$k_{s,eff}$ (W/m°C)	$k_{eff}$ MAP (W/m°C)	$k_{eff}$ MGP (W/m°C)	$k_{eff}$ MHP (W/m°C)
13.69	0.29	10.21	10.07	9.40

Nota-se que neste exemplo a incerteza é grande no valor de  $k_{eff}$  usando médias canônicas ( $k_{eff}= 0.43 - 16.29$  W/mK). A incerteza ficou bem menor com o uso de médias ponderadas ( $k_{eff}= 9.40 - 10.21$  W/mK).

Por fim, a recomendação elaborada neste estudo é usar a MGP para determinar a condutividade térmica isotrópica efetiva de PCBs que sejam constituídas de 2 a 6 camadas, na forma a seguir:

$$k_{eff} = k_{p,eff}^{0.92} k_{s,eff}^{0.08} \quad (9.16)$$

Os parâmetros  $k_{p,eff}$  e  $k_{s,eff}$  são definidos somente a partir das propriedades das PCBs (Capítulo 3) combinados com os fatores obtidos através do ajuste experimental apresentados no Capítulo 8.

## **10 ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS TRILHAS CONDUTORAS NO CAMPO DE TEMPERATURAS ATRAVÉS DE IMAGENS OBTIDAS COM CÂMERA INFRAVERMELHA**

Neste capítulo, os resultados de um teste complementar usando uma câmera de infravermelhos para imageamento sobre as PCBs aquecidas são apresentados. Através da análise destas imagens existe a possibilidade de se obter uma estimativa da faixa de incerteza de condutividade térmica efetiva isotrópica  $k_{\text{eff}}$  de placa devido a variação de propriedades térmicas em função da irregularidade na distribuição das trilhas condutivas.

### **10.1. Configuração e equipamento do teste**

No teste, uma câmera de infravermelhos modelo *ThermaCAM SC640* do fabricante *FLIR Systems* é utilizada para fotografar o mapa de temperaturas na superfície das PCBs já com os elementos que simulam componentes eletrônicos dissipativos em operação. O objetivo é registrar imagens ds campos de temperatura ao longo da placa, os quais serão utilizadas para analisar o mapa de temperaturas não homogêneo que ocorre principalmente devido a influência das trilhas condutoras e dos furos. A câmera utilizada no estudo pode ser vista na Figura 10.1.





Figura 10.1 – Câmera de infravermelhos ThermoCAM SC640 utilizada nos testes.

A câmera determina a temperatura da superfície a partir da radiação que chega até o seu sensor mas para que isto seja possível, deve-se informar a emissividade da superfície imageada. Como a superfície da PCB tem diferentes materiais, com diferentes emissividades, uma camada de fita Kapton® foi aplicada na superfície da placa a fim de homogeneizar a emissividade e garantir boa precisão nas imagens. A Figura 10.2 mostra uma das placas durante o teste.

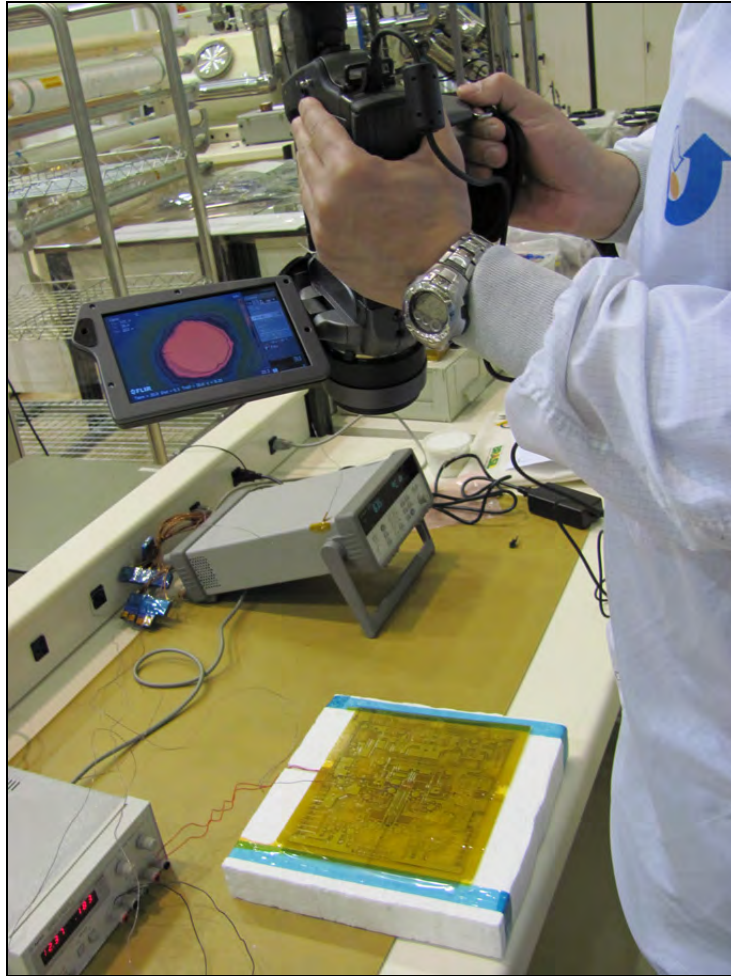


Figura 10.2 – PCB\_12 durante o teste de imageamento infravermelho.

O teste de captura de imagens foi realizado para 2 PCBs, uma com 2 camadas (PCB\_12, de dimensões 245.5 x 170 x 1.6 mm ) e a outra com 6 camadas (PCB\_08, de dimensões 272 x 141.15 x 1.8 mm). A PCB de 6 camadas foi também utilizada nos testes de ajuste geral das condutividades. Em ambas, a fonte de calor utilizada foi um “*skin-heater*”. Na de 2 camadas, o “*skin-heater*” tinha formato circular com 100 mm de diâmetro e na de 6 camadas formato quadrado com lado de 13 mm, colados na superfície inferior das placas. Os “*skin-heaters*” tiveram a tensão controlada por uma fonte da *Agilent* para se atingir a potência desejada de 2.1 W para a PCB\_12 e 2.7 W para a PCB\_08. Um tripé modificado foi usado para fixar a câmera acima da placa em uma distância de aproximadamente 1 m.

As medidas foram realizadas em sala limpa de classe 100 mil (ISO 8) com temperatura e umidade controladas em  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  e  $50\% \pm 10\%$  respectivamente.

## **10.2. Resultados da estimativa da faixa de incerteza na identificação da condutividade térmica devido a irregularidade na distribuição das trilhas condutivas.**

A fim de demonstrar o impacto que a não-homogeneidade da distribuição das trilhas de cobre pode causar no mapa de temperaturas, um círculo foi desenhado no centro de aquecimento de cada uma das placas, observando-se as temperaturas no perímetro desse círculo, o qual em um material homogêneo deveria apresentar a mesma temperatura, devido à simetria em relação ao aquecedor na posição central e a geometria da placa.

A Figura 10.3 mostra a PCB\_12 com o círculo desenhado e as temperaturas máxima ( $\sim 37^{\circ}\text{C}$ ) e mínima ( $\sim 30^{\circ}\text{C}$ ) observadas no perímetro deste círculo. Utilizando um modelo numérico isotrópico da PCB com as mesmas condições do experimento, foi realizado um ajuste para identificar a condutividade térmica efetiva isotrópica da PCB  $k_{\text{eff}}$  para se atingir as temperaturas máxima e mínima no perímetro do círculo, resultando nos valores de  $2.0 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$  para  $37^{\circ}\text{C}$  e  $7.0 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$  para  $30^{\circ}\text{C}$ . Com o valor médio desta condutividade em  $4.5 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ , tem-se um parâmetro importante que é faixa de incerteza de condutividade efetiva isotrópica devido a não-homogeneidade na distribuição das trilhas condutivas. A incerteza para este caso fica em  $\pm 2.5 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$  ou seja,  $\pm 55.5\%$  do seu valor médio.

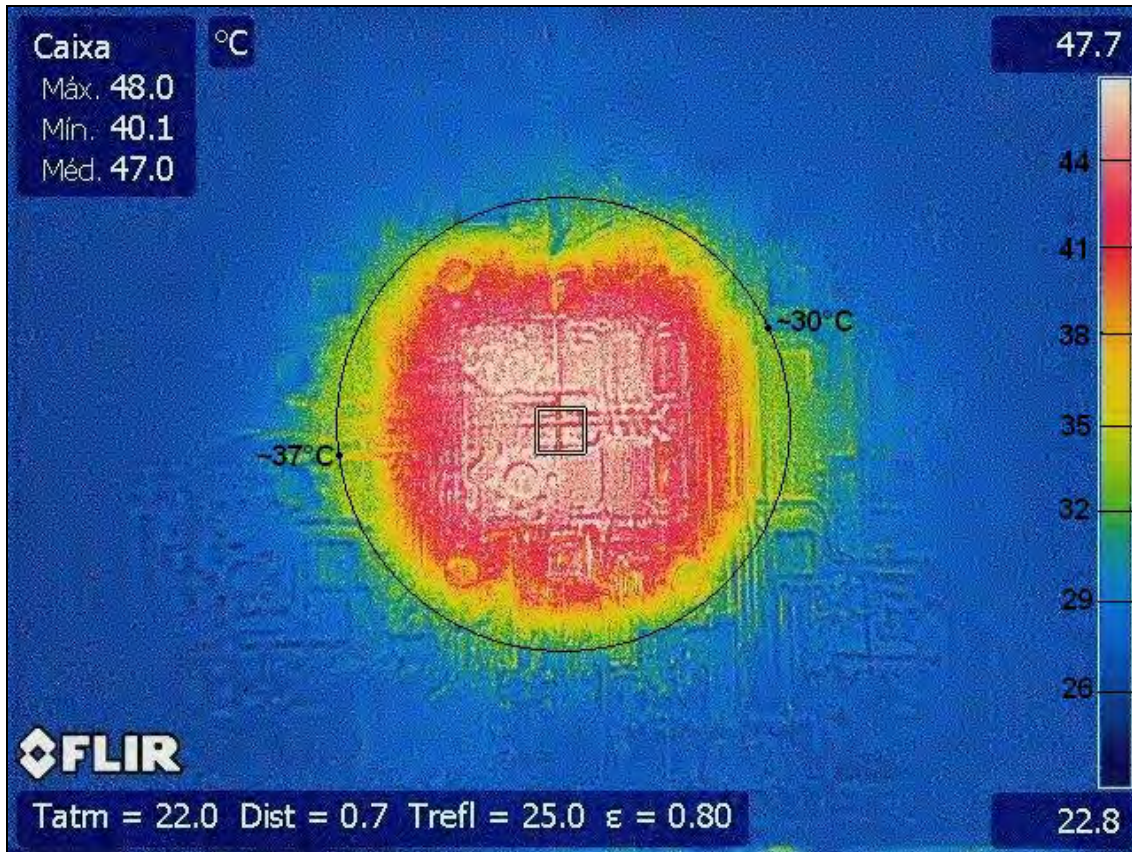


Figura 10.3 – Imagem infravermelha da PCB\_12 de 2 camadas com círculo simétrico a fonte de calor, mostrando as temperaturas máxima e mínima no seu perímetro.

A Figura 10.4 mostra a PCB\_08 de 6 camadas com o círculo desenhado e as temperaturas máxima ( $\sim 45^{\circ}\text{C}$ ) e mínima ( $\sim 38^{\circ}\text{C}$ ) observadas no perímetro deste círculo. Utilizando um modelo numérico com as mesmas condições do experimento, foi realizado um ajuste da  $k_{\text{eff}}$  para se atingir as temperaturas máxima e mínima no perímetro do círculo, os resultados foram  $11 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$  para  $45^{\circ}\text{C}$  e  $18 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$  para  $38^{\circ}\text{C}$ . Estes resultados estão próximos dos valores anteriormente obtidos para esta placa (PCB\_08), porém os resultados do estudo anterior apresentam valores mais conservativos. Com o valor médio de condutividade em  $14.5 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ , também temos um parâmetro importante que é faixa de incerteza de condutividade efetiva isotrópica devido a não-homogeneidade na distribuição das trilhas condutivas. A incerteza para este caso fica em  $\pm 3.5 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$  ou seja,  $\pm 24.1\%$  do seu valor médio.

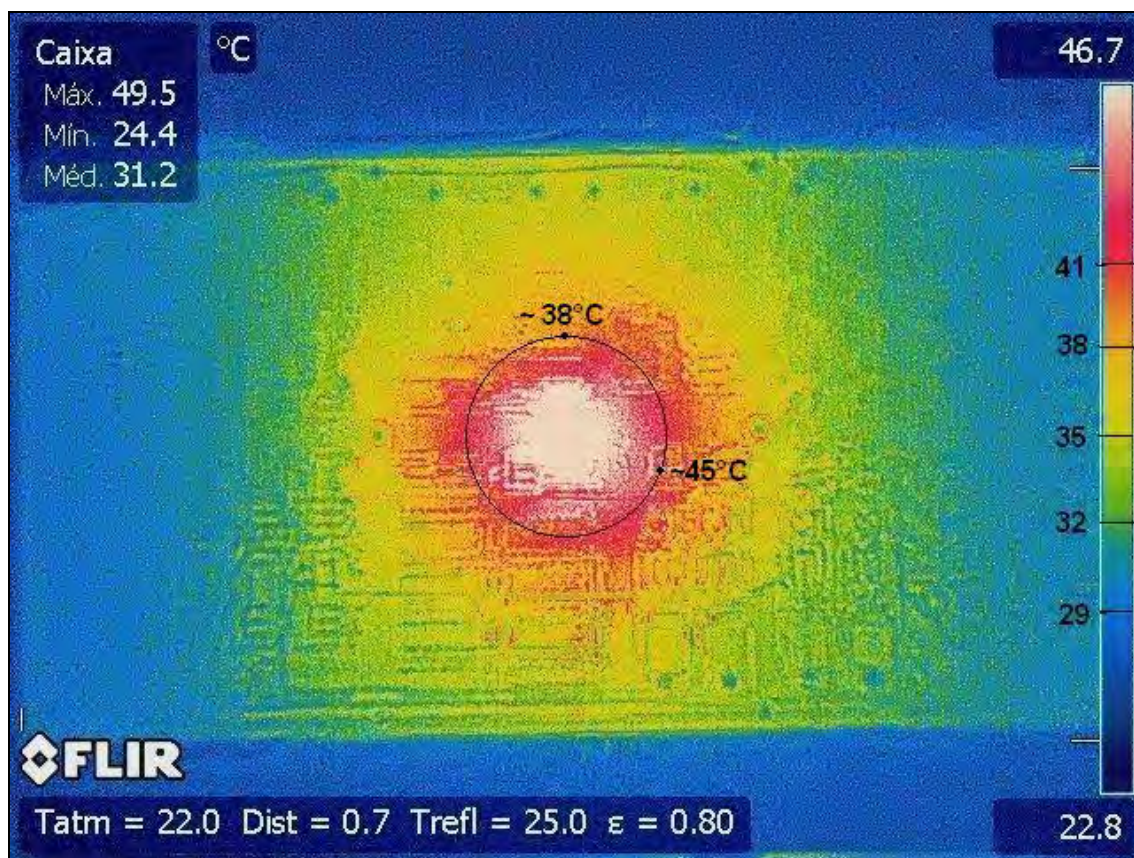


Figura 10.4 - Imagem infravermelha da PCB\_08 de 6 camadas com círculo simétrico a fonte de calor, mostrando as temperaturas máxima e mínima no seu perímetro.

O valor médio do desvio da média para as 2 PCBs testadas fica em  $\pm 39.8\%$ . Este resultado está muito próximo ao valor de  $\pm 37.1\%$  encontrado para a identificação de  $k_{\text{eff}}$  a partir dos outros métodos experimentais (Seção 7.6, Tabela 7.13 ) e novamente confirma como a não-homogeneidade na distribuição das trilhas condutoras pode afetar o comportamento térmico das PCBs e conseqüentemente nos valores de condutividade efetiva.

O gráfico na Figura 10.5 mostra a tendência de redução de faixa de incerteza com o aumento do número de camadas na placa.

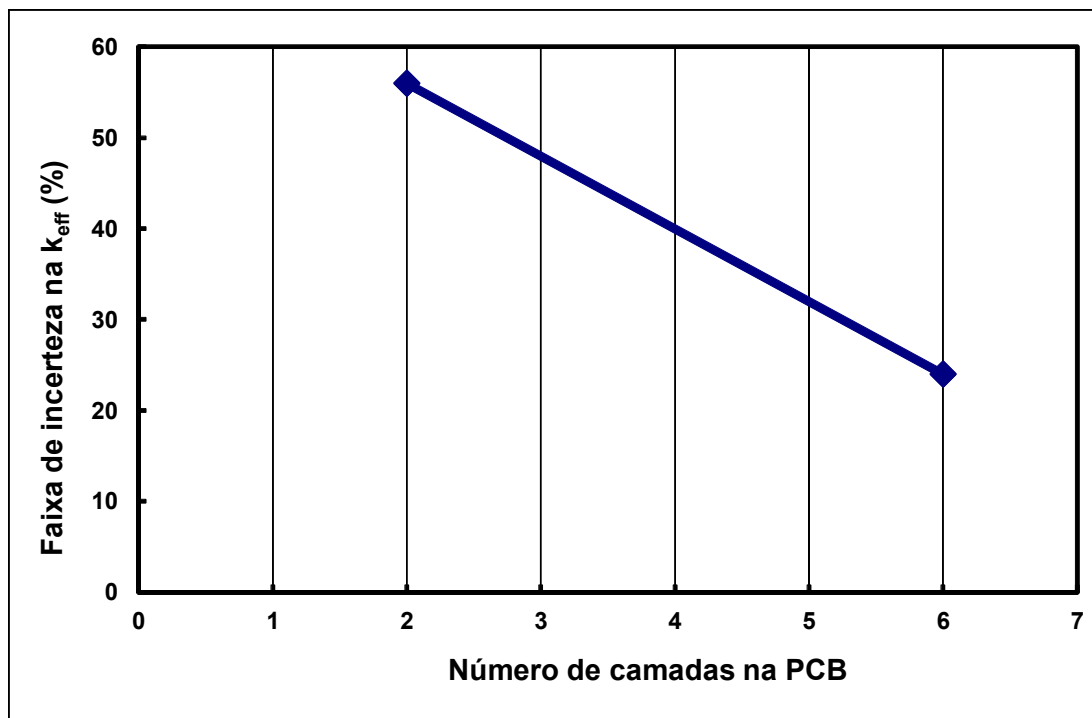
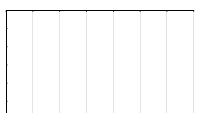


Figura 10.5 - Tendência de redução da faixa de incerteza versus número de camadas na placa

Nota-se que a faixa de incerteza de  $k_{eff}$  depende de número de camadas na placa, ou seja, quanto mais camadas com trilhas condutivas, menor a influência da irregularidade na distribuição dessas trilhas no comportamento térmico da PCB.

### 10.3. Comparação com modelo numérico e estimativa da faixa de incerteza adicional da condutividade efetiva

A Figura 10.6 mostra uma imagem do campo de temperaturas gerado pela simulação numérica da placa de 6 camadas (em escala de cores diferente da imagem da câmera infravermelha).



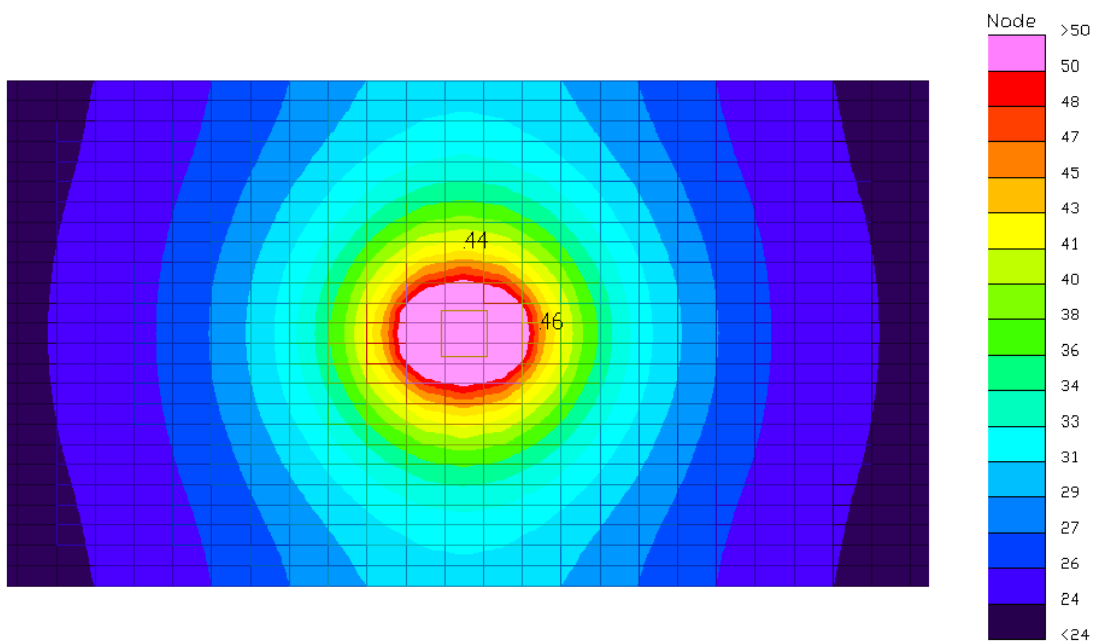


Figura 10.6 - Campo de temperaturas gerado pela simulação para a PCB\_08 de 6 camadas.

Fazendo a comparação das imagens do campo de temperaturas gerado no experimento e o campo de temperaturas gerado pela simulação nota-se claramente que na imagem infravermelha existe uma maior não-homogeneidade na distribuição das temperaturas, devido a influência da irregularidade na distribuição de cobre nas camadas com trilhas condutoras, as quais não são reproduzidas no modelo.

## 11 GUIA PRÁTICO PARA DETERMINAÇÃO DAS CONDUTIVIDADES EFETIVAS EM PCBs

Este guia tem por objetivo mostrar um roteiro de cálculo prático para a utilização das expressões apresentadas neste trabalho.

Uma vez que é comum a utilização tanto de modelos anisotrópicos como isotrópicos, o procedimento para ambos é apresentado. Porém, deve-se ressaltar que o cálculo da condutividade térmica efetiva isotrópica  $k_{\text{eff}}$  depende do cálculo das condutividades térmicas anisotrópicas  $k_{p,\text{eff}}$  e  $k_{s,\text{eff}}$ , por isso estes últimos devem ser calculados em ambos os casos.

Devido a faixa de incerteza intrínseca das condutividades efetivas de PCBs pelo fato da irregularidade no desenho das trilhas condutivas, os valores médios e mínimos de condutividades efetivas devem ser calculados. Na análise térmica de PCBs com componentes montados, usando os valores médios das condutividades térmicas efetivas da placa, o projetista deve observar que as temperaturas nos componentes eletrônicos não ultrapassem seu limites "*derated*" da temperatura operacional máxima.

Além disso, a análise deve ser repetida usando valores mínimos das condutividade térmicas efetivas da placa. Neste caso, o projetista deve cuidar para que as temperaturas nos componentes eletrônicos não ultrapassem seu limites operacionais máximos, descontando ainda uma faixa de incerteza, que engloba outras incertezas do projeto térmico do equipamento eletrônico.

### 11.1. Dados necessários

Os dados a seguir são indispensáveis para que o cálculo das condutividades térmicas efetivas de PCBs seja possível.

- Condutividade do FR4 –  $k_{\text{FR4}}$  [W/(mK)].  
Se não informado pelo fabricante, utilizar valor 0.2 W/(mK)



- Condutividade do cobre –  $k_{Cu}$  [W/(mK)].  
Normalmente varia entre 380 e 400 [W/(mK)].
- Área total da PCB -  $A_{PCB}$  [m<sup>2</sup>].
- Espessura total da placa -  $t_{PCB}$  [m].
- Espessuras de cada camada condutiva de cobre –  $t_{Cu,i}$  [m]  
A espessura das camadas condutivas normalmente é expressa em onças [oz], o que significa que 1 oz está distribuído em 1 ft<sup>2</sup>, e que corresponde a uma espessura de por exemplo 1oz=35μm=0.000035m de cobre.  
Se todas as camadas condutivas possuem a mesma espessura, este valor único é usado,  $t_{Cu}$ .
- Espessura total de todas as camadas de FR4 –  $t_{FR4}$  [m].  
Normalmente este valor está bem próximo a espessura total da placa,  $t_{PCB}$ .
- Fatores de área coberta com material condutor em cada camada com trilhas condutivas -  $f_{a,i}$ . Estes fatores, que podem variar de 0 a 1, devem ser levantados a partir de projeto elétrico da placa.
- Área total de metalização dos furos passantes –  $A_h$ . A área de metalização transversal deve ser levantada para todos os furos que a placa possui. A área de metalização para cada furo é calculada pela  $A_{h,i} = D_{h,i}t_{h,i}$ . Área total  $A_h$  será a soma de áreas de metalização de todos furos. Para considerar também condutividade através dos pés dos componentes eletrônicos, os quais são inseridos nos furos passantes, sugere-se o uso da expressão  $A_{h,i} = D_{h,i}t_{h,i} + (k_{ft,i}/k_{Cu}) \cdot (\pi/4) \cdot D_{h,i}^2$ .
- Fator de área de metalização dos furos passantes –  $f_h$ . Calculado por  
$$f_h = \frac{A_h}{A_{PCB}}$$

## 11.2. Cálculo das condutividades térmicas efetivas anisotrópicas

Para o cálculo de  $k_{p,eff}$  recomenda-se a utilização da Equação 11.1.

$$k_{p,eff} = \frac{k_{FR4}t_{FR4} + 0.42 \left( \sum_{i=J[2]} f_{ai} k_{Cu} t_{Cu,i} \right)}{t_{PCB}} \quad (11.1)$$

Onde: J[2] representa o conjunto das camadas metalizadas.

Para o cálculo de  $k_{p,eff}$  mínimo recomenda-se a utilização da Equação 11.2.

$$k_{p,eff}^{\min} = \frac{k_{FR4}t_{FR4} + 0.10 \left( \sum_{i=J[2]} f_{ai} k_{Cu} t_{Cu,i} \right)}{t_{PCB}} \quad (11.2)$$

Onde: J[2] representa o conjunto das camadas metalizadas

Para o cálculo de  $k_{s,eff}$  recomenda-se a utilização da Equação 11.3.

$$k_{s,eff} = (1 - 0.056f_h) \frac{t_{PCB}}{\left( \frac{t_{FR4}}{k_{FR4}} + \sum_{i=J[2]} \frac{t_{Cu,i}}{f_{ai} k_{Cu}} \right)} + 0.056f_h k_{Cu} \quad (11.3)$$

Onde: J[2] representa o conjunto das camadas metalizadas

Para o cálculo de  $k_{s,eff}$  mínimo recomenda-se a utilização da Equação 11.4.

$$k_{s,eff}^{\min} = \frac{t_{PCB}}{\left( \frac{t_{FR4}}{k_{FR4}} + \sum_{i=J[2]}^N \frac{t_{Cu,i}}{f_{ai} k_{Cu}} \right)} \quad (11.4)$$

Onde: J[2] representa o conjunto das camadas metalizadas

### 11.3. Cálculo da condutividade térmica isotrópica

Para o cálculo da condutividade térmica isotrópica  $k_{eff}$  sugere-se o uso da Médio Geométrica Ponderada (MGP) das condutividades  $k_{p,eff}$  e  $k_{s,eff}$ , conforme a Equação 11.5.

$$k_{eff} = (k_{p,eff})^{0.92} \cdot (k_{s,eff})^{0.08} \quad (11.5)$$

O cálculo da condutividade térmica isotrópica mínima é baseado nas condutividades anisotrópicas mínimas, usando formulação similar.

Além disso, esta condutividade isotrópica mínima deve ser reduzida em 6.5% quando a PCB está conectada termicamente às molduras nas suas extremidades, que é o caso típico para equipamentos de uso espacial. Isso reflete uma incerteza adicional da abordagem com condutividade isotrópica,

ligado a incerteza de posicionamento dos componentes (ver Capítulo 4). A expressão final recomendada é:

$$k_{eff}^{\min} = 0.935(k_{p,eff}^{\min})^{0.92} \cdot (k_{s,eff}^{\min})^{0.08} \quad (11.6)$$

#### 11.4. Uso das condutividade térmicas efetivas em projetos térmicos

Para calcular valores médios de  $k_{p,eff}$ ,  $k_{s,eff}$ , e  $k_{eff}$  recomenda-se a aplicação dos fatores  $\xi = 0.42$  e  $\zeta = 0.056$  de acordo com as expressões apresentadas nas Equações 40, 42 e 44. Devido à grande faixa de incerteza, os valores mínimos das condutividades efetivas  $k_{p,eff}^{\min}$ ,  $k_{s,eff}^{\min}$  e  $k_{eff}^{\min}$  devem ser calculados com a aplicação dos fatores  $\xi = 0.10$  e  $\zeta = 0$ .

Nos casos em que os limites máximos de temperatura dos componentes “*derated*” são utilizados, recomenda-se o uso dos valores médios das condutividades térmicas efetivas. Já para os casos em que os limites máximos de operação informados pelo fabricante dos componentes são utilizados, recomenda-se o uso das condutividades térmicas mínimas e ainda adicionar uma margem de segurança de 10° C devido a outras incertezas no projeto.

O projetista térmico de equipamentos eletrônicos deve escolher qual modelo de PCB vai usar – com condutividade isotrópica ou anisotrópica, o que depende de preferências e limitações de *software* a ser usado.

Independente do modelo escolhido, a placa PCB deve ser representada por uma malha numérica bastante fina, ou seja a divisão nodal no sentido Z (transversal) não deve ser menor de 4 ou 5 nós, enquanto a malha no plano para dimensões típicas não deve ter a divisão menor do 25x25. Para placas maiores deve-se preservar o tamanho das células numéricas, compatível com a área do componente, aproximadamente 10 x 10 mm, ou mesmo menor.

O projetista deve executar a análise térmica em duas etapas. Na primeira etapa deve-se usar os valores médios das condutividades térmicas efetivas da placa. As temperaturas nos componentes eletrônicos não devem ultrapassar seus limites "*derated*" da temperatura operacional máxima. Na segunda etapa, a análise deve ser repetida usando os valores mínimos das condutividades térmicas efetivas da placa. As temperaturas nos componentes eletrônicos não devem ultrapassar seus limites operacionais máximos, descontando ainda uma faixa de 10°C, para contornar outras incertezas de projeto.

Por exemplo, um transistor semicondutor possui o limite operacional máximo é 150°C, com o desconto da faixa de incerteza adicional tem-se 140°C e o limite *derated* é de 110°C. Neste caso, o projeto da PCB baseado nas condutividades térmicas efetivas médias da PCB, a temperatura do componente não deve ultrapassar 110°C, e quando as condutividades térmicas efetivas mínimas são usadas, a temperatura não deve ultrapassar 140°C.

Entretanto, a gerência do programa de satélite pode exigir o uso de uma abordagem mais conservativa. Para este caso é recomendado usar somente os valores mínimos de condutividades térmicas efetivas de PCBs. Aplicado ao exemplo, o transistor não deveria ultrapassar 110°C.

## 12 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo teórico e experimental da condutividade térmica efetiva de placas de circuito impresso para aplicações espaciais. A partir da combinação de dados de diferentes tipos de testes experimentais e simulações numéricas é gerada uma metodologia para a obtenção e generalização dos valores das condutividades térmicas efetivas de PCBs, tanto para modelos isotrópicos, como anisotrópicos.

Esta metodologia foi validada qualitativamente e quantitativamente (dentro do desvio de 32.7%) a partir de comparação com resultados publicados disponíveis, assim como através do confronto dos resultados obtidos com diferentes tipos de testes experimentais e ainda por testes numéricos que confirmaram a estabilidade dos resultados em função de parâmetros de malha e escolha de métodos numéricos combinados com seus critérios de convergência e passo de simulação.

Foram realizados 3 tipos de testes experimentais: em regime permanente em ambiente convectivo, em regime transiente em ambiente convectivo e em regime transiente no vácuo. Estes testes geraram um montante de dados que foi analisado estatisticamente e posteriormente utilizado no ajuste dos modelos numéricos criados.

Foram elaboradas duas expressões com fatores de ajuste embutidos, os quais foram obtidos através dos dados ajustados experimentalmente, para estimar os valores das condutividades térmicas efetivas anisotrópicas  $k_{p,eff}$  e  $k_{s,eff}$  a partir das características da PCB determinadas pelo projeto elétrico da placa.

Concluiu-se que a melhor aproximação para a condutividade térmica efetiva isotrópica  $k_{eff}$ , para utilização em modelos isotrópicos, é obtida através do cálculo da Média Geométrica Ponderada (MGP) das condutividades anisotrópicas  $k_{p,eff}$  e  $k_{s,eff}$ , apresentando resultados com incertezas muito menores do que os anteriormente obtidos com o uso de médias canônicas simples.

A identificação dos valores das condutividades efetivas com base nos dados dos experimentos revelam que a média do desvio percentual com  $2\sigma$  devido a não-homogeneidade na distribuição das trilhas condutoras é de  $\pm 37.1\%$  para  $k_{\text{eff}}$ ,  $\pm 30.6\%$  para  $k_{p,\text{eff}}$  e  $\pm 43.8\%$  para  $k_{s,\text{eff}}$ .

Para análises térmicas com modelos isotrópicos, recomenda-se a aplicação de uma faixa de incerteza adicional de  $\pm 6.4\%$ , se o resfriamento é feito através de molduras nas extremidades da placa, o que é o caso típico em aplicações espaciais.

Um teste com imageamento no espectro infravermelho foi realizado com o objetivo de comparação com os outros testes experimentais. O resultado de  $\pm 39.8\%$  de incerteza no valor de ajuste da  $k_{\text{eff}}$  devido a irregularidade na distribuição das trilhas está muito próximo da incerteza de  $\pm 37.1\%$  para  $k_{\text{eff}}$  obtida através dos outros testes. Isto confirma a existência de uma faixa de incerteza desta grandeza na definição de condutividade térmica efetiva de PCBs, e valida a afirmação de que os resultados obtidos não dependem do tipo de teste experimental.

Um guia prático para projetistas térmicos de equipamentos eletrônicos para a utilização da metodologia desenvolvida neste trabalho foi criado, apresentando um passo a passo de como calcular as condutividades efetivas de PCBs para utilização em análises térmicas tanto com modelos isotrópicos como anisotrópicos, além de recomendações práticas sobre como tratar as incertezas envolvidas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDONOVA, A.; KAFADAROVA, N.; VIDEKOV, V.; ANDREEV, S.,  
**Investigation of thermal conductivity of PCB.** In: INTERNATIONAL SPRING SEMINAR ON ELECTRONICS TECHNOLOGY (ISSE 2009), 32., 2009, Brno, Czech Republic. Proceedings... Brno: Brno University of Technology, 2009. v., n., p.1-5.

CARCHIA, M. **Electronic/Electrical reliability.** Pittsburgh, Pennsylvania, USA: Carnegie Mellon University, 1999.

CULHAM, J. R., YOVANOVICH, M. M., **Thermal Characterization of Electronic Packages Using a Three-Dimensional Fourier Series Solution,** The Pacific Rim/ASME International, Intersociety Electronic and Photonic Packaging Conference, INTERpack '97, Kohala Coast, Island of Hawaii, pp. 1955-1965, June 15-19, 1997.

CULHAM, J.R.; YOVANOVICH, M.M., **Factors affecting the calculation of effective conductivity in printed circuit boards [thermal analysis],** Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, 1998. I THERM '98. The Sixth Intersociety Conference on , vol., no., pp.460-467, 27-30 May 1998.

ESA-ESTEC. **Space product assurance: Derating – EEE components.** ECSS-Q-ST-30-11C, 31 July 2008. ECSS Secretariat ESA-ESTEC Requirements & Standards Division Noordwijk, The Netherlands. 59 pp.

LEMCZYK, T.F.; MACK, B.; CULHAM, J.R.; YOVANOVICH, M.M., **PCB trace thermal analysis and effective conductivity,** Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 1991. SEMI-THERM VII. Proceedings., Seventh Annual IEEE , vol., no., pp.15-22.

LOHAN, J.; TIILIKKA, P.; RODGERS, P.; FAGER, C.-M.; RANTALA, J., **Using experimental analysis to evaluate the influence of printed circuit board**



**construction on the thermal performance of four package types in both natural and forced convection**, Thermal and Thermo-mechanical Phenomena in Electronic Systems, 2000. IThERM 2000. The Seventh Intersociety Conference on , vol.2, no., pp.213-225 vol. 2.

MANNO, V.P.; KURITA, N.R.; AZAR, K., **Experimental characterization of board conduction sheets**, Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 1993. SEMI-THERM IX., Ninth Annual IEEE , vol., no., pp.127-135.

MATWEB – **Material Property Data**. Disponível em:  
<<http://www.matweb.com>>. Acesso em: 19 de janeiro de 2012.

REMSBURG, R., **Thermal Design of Electronic Equipment**, 1st Edition. CRC Press, USA, p. 400, 2001.

SARVAR, F., POOLE, N. J., WITTING, P. A. **PCB glass-fibre laminates: thermal conductivity measurements and their effect on simulation**. Journal of Electronic Materials, v. 19, n. 12, p. 1345-1350, 1990.

SHABANY, Y., **Component size and effective thermal conductivity of printed circuit boards**, Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, 2002. IThERM 2002. The Eighth Intersociety Conference on , vol., no., pp. 489- 494, 2002.

TEERSTRA, P., CULHAM, J.R., AND YOVANOVICH, M.M., **An Investigation of the Relationship between Packaging Density and Effective Thermal Conductivity in Laminated Printed Circuit Boards**, XXth International Electronic Packaging Society, San Diego, CA, Sept. 24-27, 1995.

VLASSOV, V.V. **Analytical Model of the Two-Dimensional Temperature Distribution over a Single Electronic Circuit Board**. RETERM - Thermal Engineering, ISSN 1676-1790. No 3, pp. 32-37, 2003.

YOVANOVICH, M. M., MUZYCHKA, Y. S., CULHAM, J. R. **Spreading Resistance of Isoflux Rectangles and Strips on Compound Flux Channels**, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 12, No. 4, pp. 495-500, 1999.



## APÊNDICE A – PROPRIEDADES TÉRMICAS BÁSICAS DAS PLACAS TESTADAS

### TESTADAS

Imagens reais de todas as placas testadas são mostradas da Figura A.1 à Figura A.11 e suas propriedades térmicas básicas podem ser vistas da Tabela A.1 à Tabela A.11.

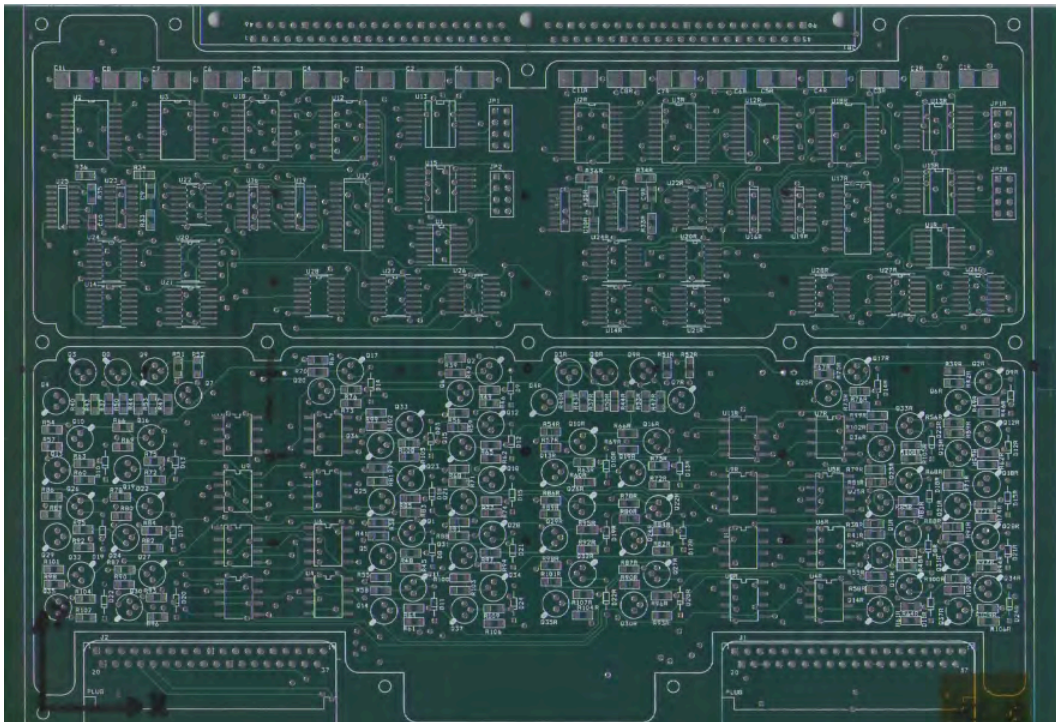


Figura A.1 – Imagem real da PCB\_01.

Tabela A.1 - Propriedades da PCB\_01.

<b>PCB_01</b>			
Espessura da placa (mm)	2.0		
Espessura das camadas de cobre (mm)	0.035		
Espessura das camadas de FR4 (mm)	0.358		
Camada	t - Espessura (mm)	k - Condutividade do material (W/mK)	f <sub>a</sub> - Fração da área de cobertura
Top	0.035	400	0.14
FR4	0.358	0.2	1.00
GND	0.035	400	0.93
FR4	0.358	0.2	1.00
PWR	0.035	400	0.76
FR4	0.358	0.2	1.00
Inner 1	0.035	400	0.11
FR4	0.358	0.2	1.00
Inner 2	0.035	400	0.12
FR4	0.358	0.2	1.00
Bottom	0.035	400	0.09

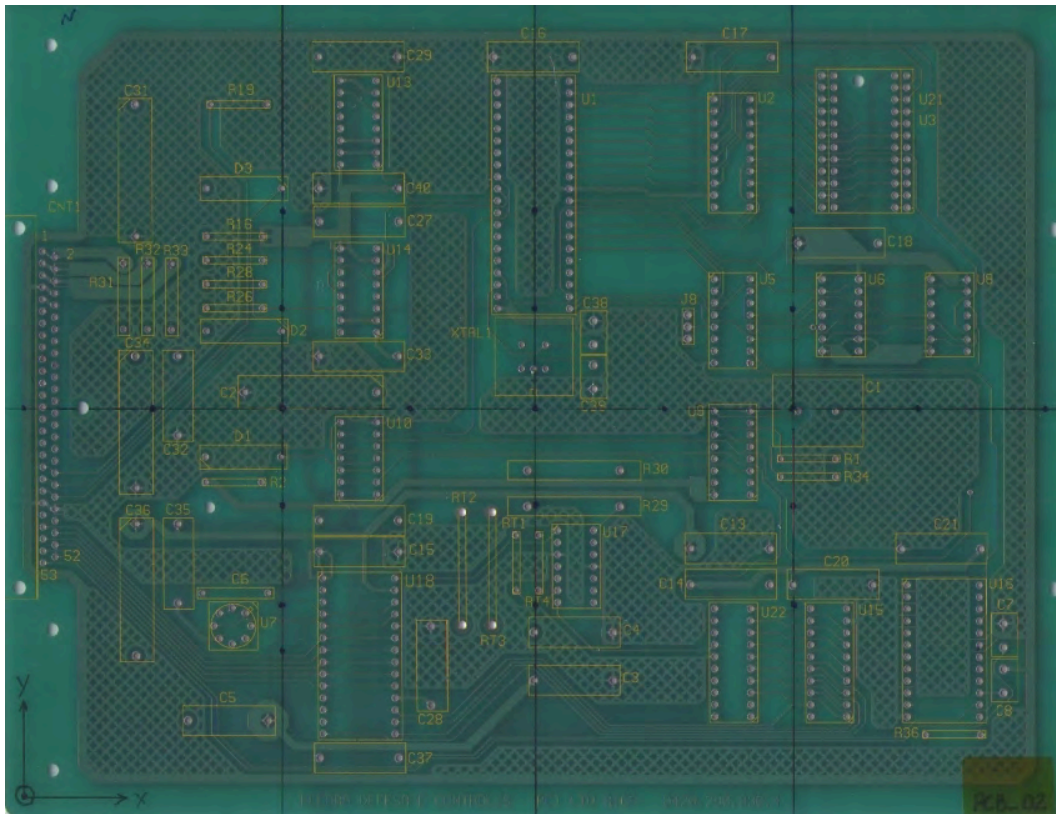


Figura A.2 – Imagem real da PCB\_02.

Tabela A.2 - Propriedades da PCB\_02.

PCB_02			
Espessura da placa (mm)	2.0		
Espessura das camadas de cobre (mm)	0.035		
Espessura das camadas de FR4 (mm)	1.93		
Camada	t - Espessura (mm)	k - Condutividade do material (W/mK)	f <sub>a</sub> - Fração da área de cobertura
Top	0.035	400	0.41
FR4	1.930	0.2	1.00
Bottom	0.035	400	0.30

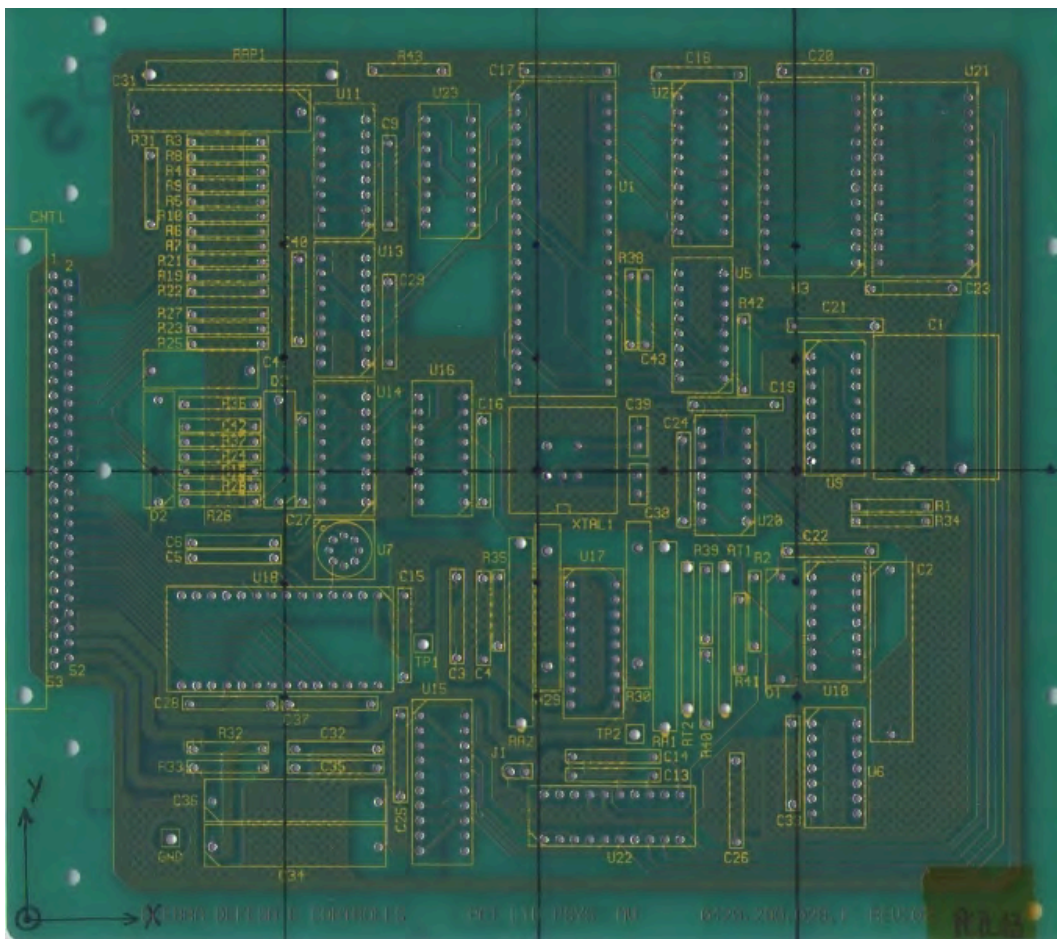


Figura A.3 – Imagem real da PCB\_03.

Tabela A.3 - Propriedades da PCB\_03.

<b>PCB_03</b>			
Espessura da placa (mm)	2.0		
Espessura das camadas de cobre (mm)	0.035		
Espessura das camadas de FR4 (mm)	1.93		
Camada	t - Espessura (mm)	k - Condutividade do material (W/mK)	f <sub>a</sub> - Fração da área de cobertura
Top	0.035	400	0.41
FR4	1.930	0.2	1.00
Bottom	0.035	400	0.30

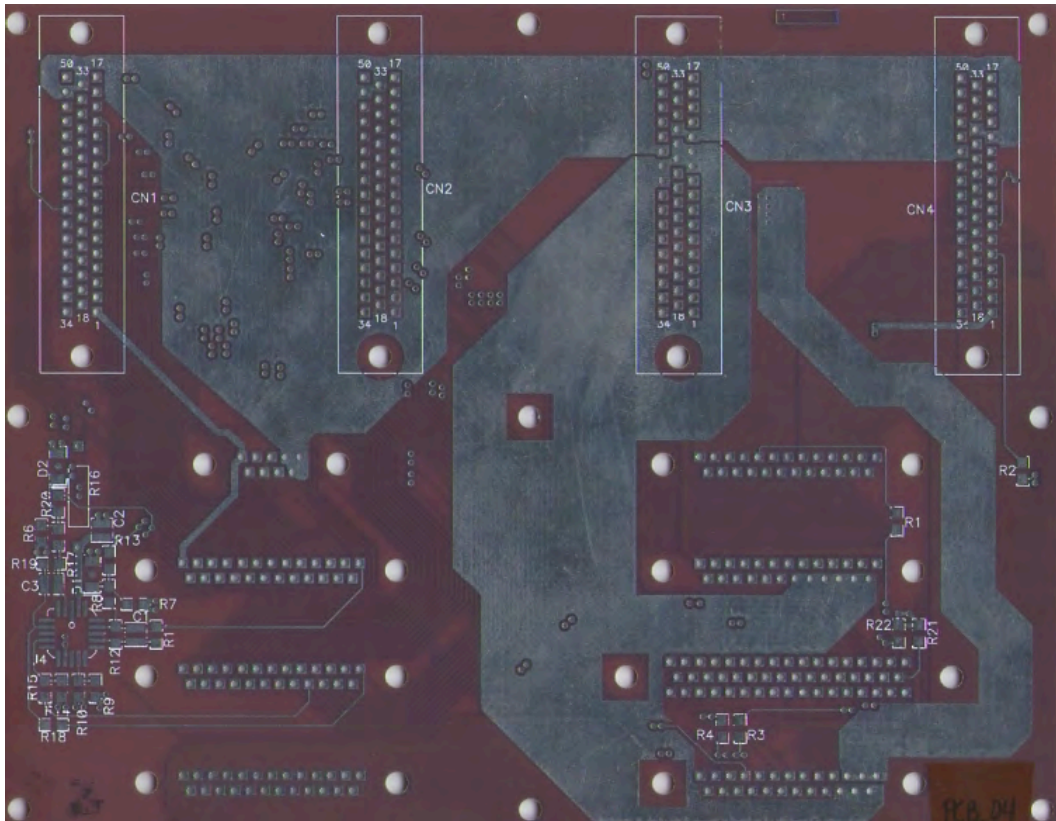


Figura A.4 – Imagem real da PCB\_04.

Tabela A.4 - Propriedades da PCB\_04.

PCB_04			
Espessura da placa (mm)	1.6		
Espessura das camadas de cobre (mm)	0.105		
Espessura das camadas de FR5 (mm)	0.194		
Camada	t - Espessura (mm)	k - Condutividade do material (W/mK)	f <sub>a</sub> - Fração da área de cobertura
Top	0.105	400	0.42
FR4	0.194	0.2	1.00
Inner 1	0.105	400	0.33
FR4	0.194	0.2	1.00
Inner 2	0.105	400	0.22
FR4	0.194	0.2	1.00
Inner 3	0.105	400	0.92
FR4	0.194	0.2	1.00
Inner 4	0.105	400	0.27
FR4	0.194	0.2	1.00
Bottom	0.105	400	0.31

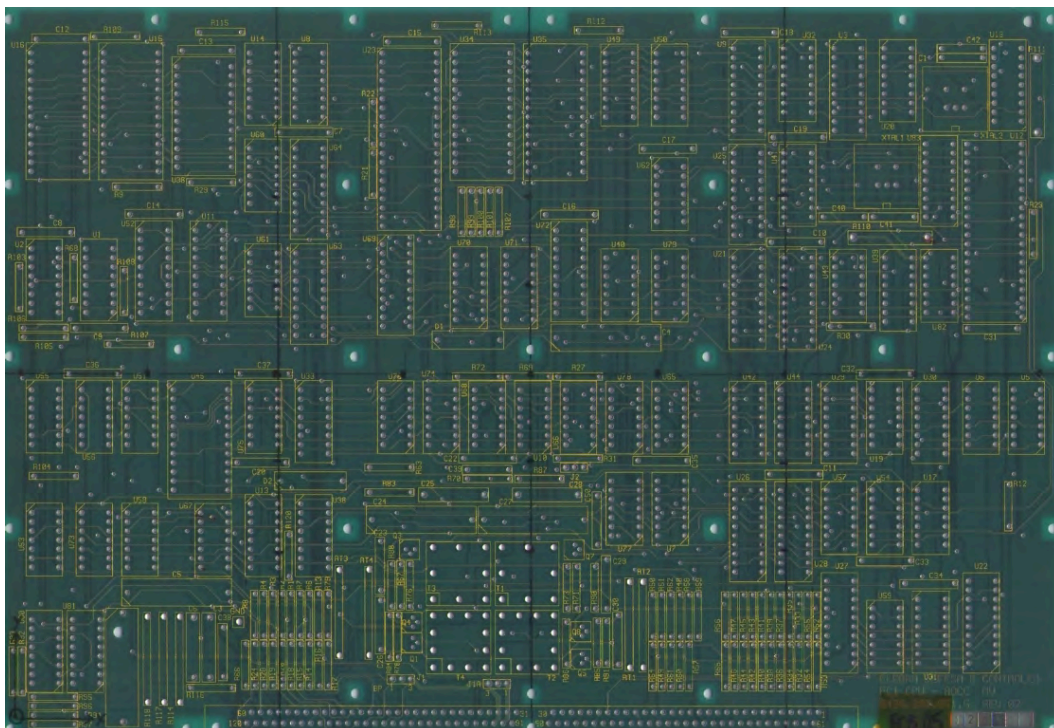


Figura A.5 – Imagem real da PCB\_05.



Tabela A.5 - Propriedades da PCB\_05.

PCB_05			
Espeçura da placa (mm)	1.6		
Espeçura das camadas de cobre (mm)	0.035		
Espeçura das camadas de FR4 (mm)	0.278		
Camada	t - Espeçura (mm)	k - Condutividade do material (W/mK)	f <sub>a</sub> - Fração da área de cobertura
Top	0.035	400	0.18
FR4	0.278	0.2	1.00
Inner 1	0.035	400	0.16
FR4	0.278	0.2	1.00
VDD	0.035	400	0.84
FR4	0.278	0.2	1.00
GND	0.035	400	0.86
FR4	0.278	0.2	1.00
Inner 2	0.035	400	0.18
FR4	0.278	0.2	1.00
Bottom	0.035	400	0.17

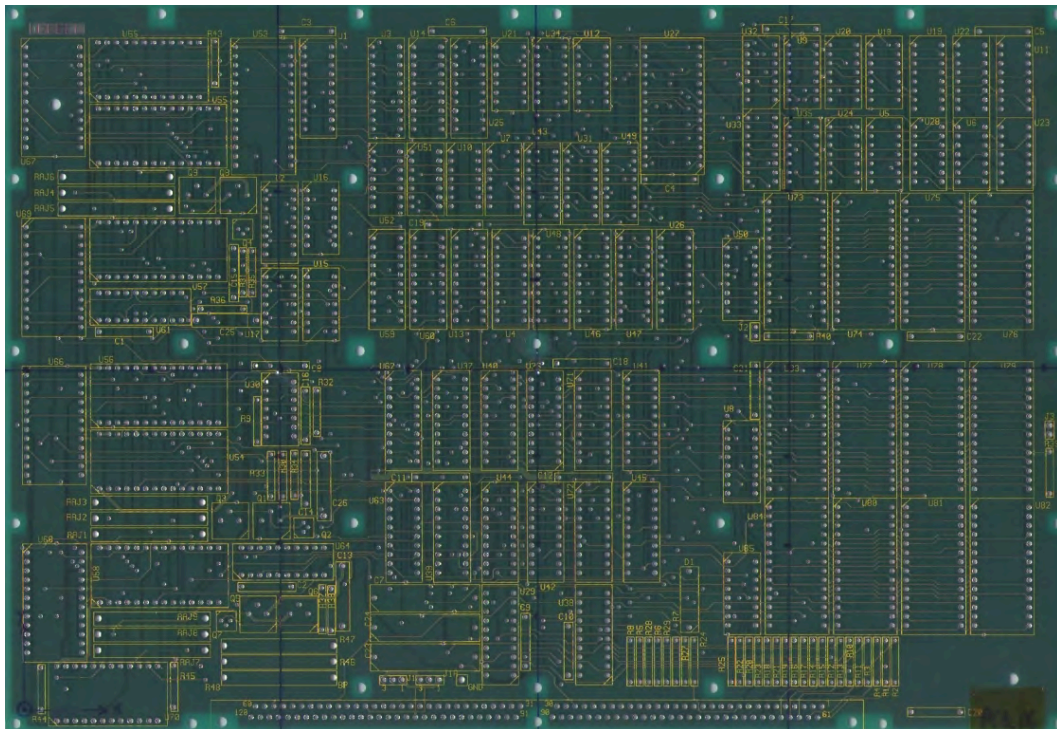


Figura A.6 – Imagem real da PCB\_06.

Tabela A.6 - Propriedades da PCB\_06.

<b>PCB_06</b>			
Espessura da placa (mm)	1.6		
Espessura das camadas de cobre (mm)	0.035		
Espessura das camadas de FR4 (mm)	0.278		
<b>Camada</b>	<b>t - Espessura (mm)</b>	<b>k - Condutividade do material (W/mK)</b>	<b>f<sub>a</sub> - Fração da área de cobertura</b>
Top	0.035	400	0.21
FR4	0.278	0.2	1.00
Inner 1	0.035	400	0.18
FR4	0.278	0.2	1.00
GND	0.035	400	0.85
FR4	0.278	0.2	1.00
VCC	0.035	400	0.84
FR4	0.278	0.2	1.00
Inner 2	0.035	400	0.20
FR4	0.278	0.2	1.00
Bottom	0.035	400	0.20

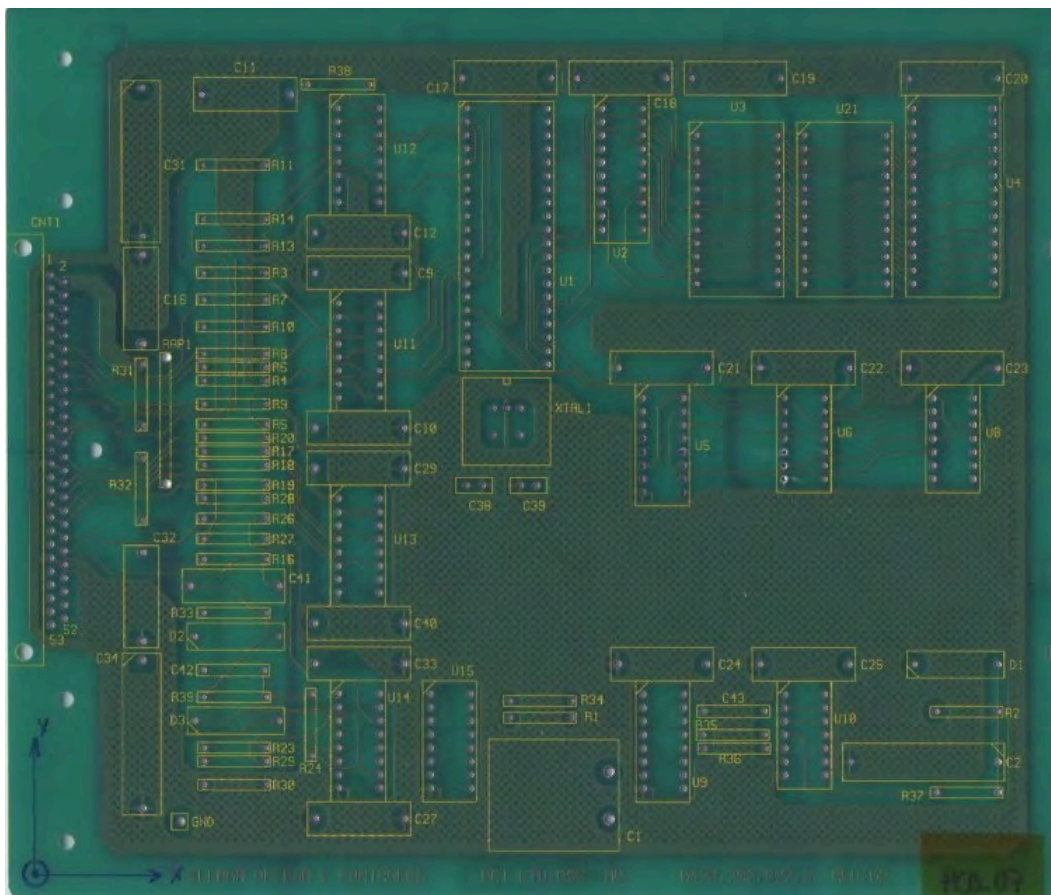


Figura A.7 – Imagem real da PCB\_07.

Tabela A.7 - Propriedades da PCB\_07.

<b>PCB_07</b>			
Espessura da placa (mm)	2.0		
Espessura das camadas de cobre (mm)	0.035		
Espessura das camadas de FR4 (mm)	1.93		
<b>Camada</b>	<b>t - Espessura (mm)</b>	<b>k - Condutividade do material (W/mK)</b>	<b>f<sub>a</sub> - Fração da área de cobertura</b>
Top	0.035	400	0.35
FR4	1.930	0.2	1.00
Bottom	0.035	400	0.22

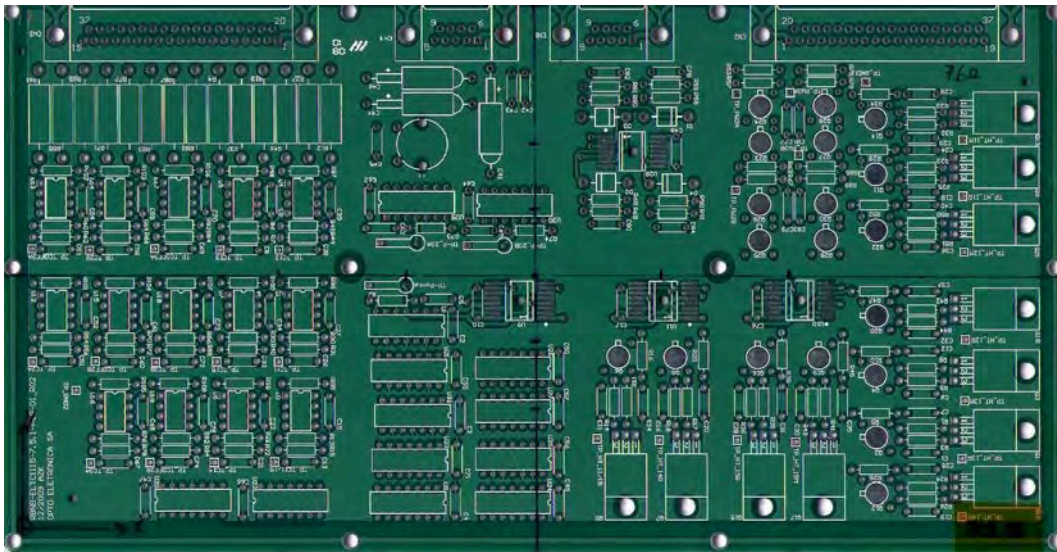


Figura A.8 – Imagem real da PCB\_08.

Tabela A.8 - Propriedades da PCB\_08.

<b>PCB_08</b>			
Espessura da placa (mm)	1.8		
Espessura das camadas de cobre (mm)	0.035		
Espessura das camadas de FR4 (mm)	0.318		
<b>Camada</b>	<b>t - Espessura (mm)</b>	<b>k - Condutividade e do material (W/mK)</b>	<b>f<sub>a</sub> – Fração da área de cobertura</b>
Top	0.035	400	0.75
FR4	0.318	0.19	1.00
Inner 1	0.035	400	0.06
FR4	0.318	0.19	1.00
Inner 2	0.035	400	0.11
FR4	0.318	0.19	1.00
Inner 3	0.035	400	0.32
FR4	0.318	0.19	1.00
Inner 4	0.035	400	0.08
FR4	0.318	0.19	1.00
Bottom	0.035	400	0.84

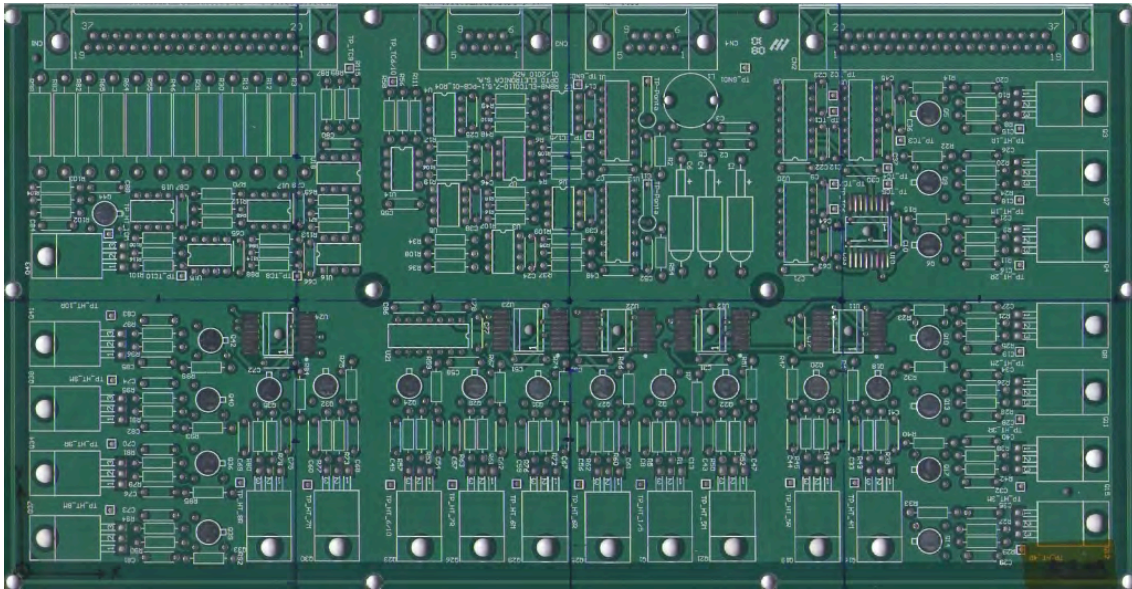


Figura A.9 – Imagem real da PCB\_09

Tabela A.9 - Propriedades da PCB\_09.

<b>PCB_09</b>			
Espessura da placa (mm)	1.8		
Espessura das camadas de cobre (mm)	0.035		
Espessura das camadas de FR4 (mm)	0.318		
<b>Camada</b>	<b>t - Espessura (mm)</b>	<b>k - Condutividade do material (W/mK)</b>	<b>f<sub>a</sub> – Fração da área de cobertura</b>
Top	0.035	400	0.75
FR4	0.318	0.19	1.00
Inner 1	0.035	400	0.09
FR4	0.318	0.19	1.00
Inner 2	0.035	400	0.11
FR4	0.318	0.19	1.00
Inner 3	0.035	400	0.04
FR4	0.318	0.19	1.00
Inner 4	0.035	400	0.29
FR4	0.318	0.19	1.00
Bottom	0.035	400	0.84

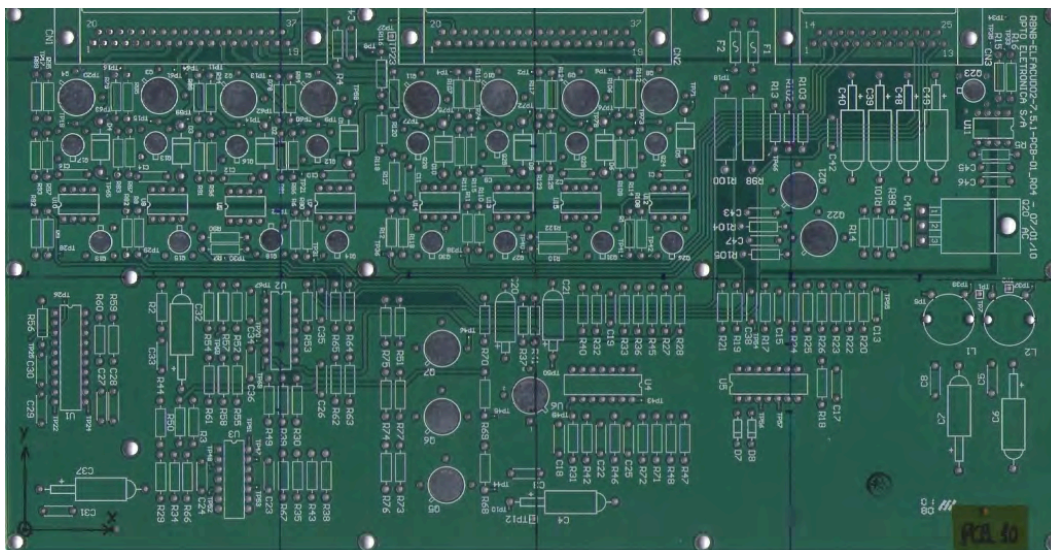


Figura A.10 – Imagem real da PCB\_10.

Tabela A.10 - Propriedades da PCB\_10.

<b>PCB_10</b>			
Espessura da placa (mm)	1.8		
Espessura das camadas de cobre (mm)	0.035		
Espessura das camadas de FR4 (mm)	0.318		
Camada	t - Espessura (mm)	k - Condutividade do material (W/mK)	f <sub>a</sub> - Fração da área de cobertura
Top	0.035	400	0.86
FR4	0.318	0.19	1.00
Inner 1	0.035	400	0.05
FR4	0.318	0.19	1.00
Inner 2	0.035	400	0.67
FR4	0.318	0.19	1.00
Inner 3	0.035	400	0.84
FR4	0.318	0.19	1.00
Inner 4	0.035	400	0.46
FR4	0.318	0.19	1.00
Bottom	0.035	400	0.15

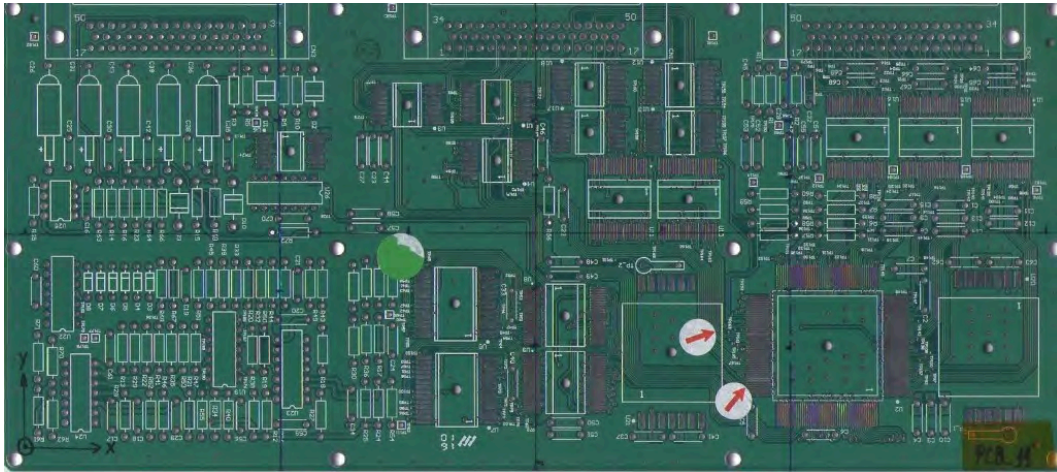


Figura A.11 – Imagem real da PCB\_11.

Tabela A.11 - Propriedades da PCB\_11.

<b>PCB_11</b>			
Espeçsura da placa (mm)	1.8		
Espeçsura das camadas de cobre (mm)	0.035		
Espeçsura das camadas de FR4 (mm)	0.318		
Camada	t - Espeçsura (mm)	k - Condutividade do material (W/mK)	f <sub>a</sub> – Fração da área de cobertura
Top	0.035	400	0.70
FR4	0.318	0.19	1.00
Inner 1	0.035	400	0.34
FR4	0.318	0.19	1.00
Inner 2	0.035	400	0.79
FR4	0.318	0.19	1.00
Inner 3	0.035	400	0.83
FR4	0.318	0.19	1.00
Inner 4	0.035	400	0.62
FR4	0.318	0.19	1.00
Bottom	0.035	400	0.86

### 13 APÊNDICE B – PROPRIEDADES DE FURAÇÃO DAS PLACAS

As características dos furos passantes metalizados das 11 placas testadas são mostradas da Tabela B.1 à Tabela B.11.

Tabela B.1 – Informações dos furos metalizados da PCB\_01.

<b>Diâmetro do furo (mm)</b>	<b>Espessura da placa (mm)</b>	<b>Quantidade de furos</b>	<b>Área total metalizada (mm<sup>2</sup>)</b>
0.7	2.0	923	75.731
0.8	2.0	222	20.075
0.9	2.0	32	3.162
0.9	2.0	80	8.575
1.0	2.0	10	1.100
1.1	2.0	74	8.965

Tabela B.2 - Informações dos furos metalizados da PCB\_02.

<b>Diâmetro do furo (mm)</b>	<b>Espessura da placa (mm)</b>	<b>Quantidade de furos</b>	<b>Área total metalizada (mm<sup>2</sup>)</b>
1.4	2.0	4	0.631
0.8	2.0	62	5.692
0.7	2.0	422	34.105
0.4	2.0	2	0.096

Tabela B.3 - Informações dos furos metalizados da PCB\_03.

<b>Diâmetro do furo (mm)</b>	<b>Espessura da placa (mm)</b>	<b>Quantidade de furos</b>	<b>Área total metalizada (mm<sup>2</sup>)</b>
1.4	2.0	13	2.051
1.0	2.0	2	0.228
0.8	2.0	6	0.551
0.7	2.0	532	42.995



Tabela B.4 - Informações dos furos metalizados da PCB\_04.

<b>Diâmetro do furo (mm)</b>	<b>Espessura da placa (mm)</b>	<b>Quantidade de furos</b>	<b>Área total metalizada (mm<sup>2</sup>)</b>
0.7112	1.6	195	52.501
0.8890	1.6	2	0.656
1.1176	1.6	409	164.948

Tabela B.5 - Informações dos furos metalizados da PCB\_05.

<b>Diâmetro do furo (mm)</b>	<b>Espessura da placa (mm)</b>	<b>Quantidade de furos</b>	<b>Área total metalizada (mm<sup>2</sup>)</b>
1.50	1.6	55	9.283
1.20	1.6	4	0.543
0.90	1.6	17	1.748
0.70	1.6	1769	142.966
0.50	1.6	480	28.237

Tabela B.6 - Informações dos furos metalizados da PCB\_06.

<b>Diâmetro do furo (mm)</b>	<b>Espessura da placa (mm)</b>	<b>Quantidade de furos</b>	<b>Área total metalizada (mm<sup>2</sup>)</b>
1.50	1.6	25	4.220
0.90	1.6	16	1.645
0.70	1.6	1985	160.423
0.50	1.6	699	41.120

Tabela B.7 - Informações dos furos metalizados da PCB\_07.

<b>Diâmetro do furo (mm)</b>	<b>Espessura da placa (mm)</b>	<b>Quantidade de furos</b>	<b>Área total metalizada (mm<sup>2</sup>)</b>
1.4	2.0	3	0.473
1.0	2.0	2	0.228
0.8	2.0	39	3.581
0.7	2.0	442	35.721

Tabela B.8 - Informações dos furos metalizados da PCB\_08.

<b>Diâmetro do furo (mm)</b>	<b>Espessura da placa (mm)</b>	<b>Quantidade de furos</b>	<b>Área total metalizada (mm<sup>2</sup>)</b>
0.3810	1.8	24	1.098
0.7110	1.8	24	1.969
0.7366	1.8	182	15.441
0.8128	1.8	57	5.314
0.8636	1.8	162	16.007
0.9652	1.8	306	33.653
1.0160	1.8	36	4.160
1.1430	1.8	92	11.917
1.1684	1.8	33	4.367
1.1999	1.8	24	3.259
1.3462	1.8	36	5.467
2.0320	1.8	2	0.455
2.2999	1.8	4	1.027
3.1999	1.8	12	4.268
3.2512	1.8	8	2.891
4.3180	1.8	11	5.265

Tabela B.9 - Informações dos furos metalizados da PCB\_09.

<b>Diâmetro do furo (mm)</b>	<b>Espessura da placa (mm)</b>	<b>Quantidade de furos</b>	<b>Área total metalizada (mm<sup>2</sup>)</b>
0.3180	1.8	24	0.932
0.7112	1.8	37	3.036
0.7366	1.8	84	7.127
0.8128	1.8	66	6.153
0.8636	1.8	170	16.797
0.9652	1.8	310	34.093
1.0160	1.8	40	4.623
1.1430	1.8	92	11.917
1.1684	1.8	66	8.733
1.1999	1.8	24	3.259
1.3462	1.8	24	3.645
2.0320	1.8	2	0.455
2.2999	1.8	6	1.540
3.1999	1.8	12	4.268
3.2512	1.8	8	2.891
4.3180	1.8	22	10.530

Tabela B.10 - Informações dos furos metalizados da PCB\_10.

<b>Diâmetro do furo (mm)</b>	<b>Espessura da placa (mm)</b>	<b>Quantidade de furos</b>	<b>Área total metalizada (mm<sup>2</sup>)</b>
0.3180	1.8	24	0.932
0.8128	1.8	93	8.670
0.8382	1.8	8	0.768
0.8636	1.8	76	7.509
0.9652	1.8	416	45.751
1.0160	1.8	8	0.925
1.1430	1.8	103	13.341
1.1999	1.8	8	1.086
1.3462	1.8	16	2.430
1.4224	1.8	3	0.481
2.0320	1.8	4	0.909
3.1999	1.8	14	4.980
3.2512	1.8	6	2.168
4.3180	1.8	1	0.479

Tabela B.11 - Informações dos furos metalizados da PCB\_11.

<b>Diâmetro do furo (mm)</b>	<b>Espessura da placa (mm)</b>	<b>Quantidade de furos</b>	<b>Área total metalizada (mm<sup>2</sup>)</b>
0.3810	1.8	707	32.339
0.5080	1.8	41	2.448
0.7366	1.8	42	3.563
0.8382	1.8	12	1.152
0.8636	1.8	134	13.240
0.9652	1.8	226	24.855
1.0160	1.8	15	1.733
1.1430	1.8	150	19.429
1.1999	1.8	24	3.259
1.3462	1.8	8	1.215
2.2999	1.8	20	5.135
3.1999	1.8	12	4.268
3.2512	1.8	6	2.168

## 14 APÊNDICE C – POSICIONAMENTO DE SENSORES E AQUECEDOR

Os posicionamentos dos sensores de temperatura (termopares tipo T) e do aquecedor para todas as 11 PCBs utilizadas nos testes são mostrados da Tabela C.1 a Tabela C.11, as coordenadas das posições são apresentadas em metros (m).

Tabela C.1 – Posicionamento do aquecedor e termopares na PCB\_01.

POSIÇÃO 1		POSIÇÃO 2		POSIÇÃO 3	
TC	(x;y)	TC	(x;y)	TC	(x;y)
TC1	(0.1168 ; 0.0800)	TC1	(0.0607 ; 0.0800)	TC1	(0.1728 ; 0.0800)
TC2	(0.0607 ; 0.0800)	TC2	(0.0047 ; 0.0800)	TC2	(0.1168 ; 0.0800)
TC3	(0.0887 ; 0.0800)	TC3	(0.0327 ; 0.0800)	TC3	(0.1448 ; 0.0800)
TC4	(0.1448 ; 0.0800)	TC4	(0.0887 ; 0.0800)	TC4	(0.2008 ; 0.0800)
TC5	(0.1728 ; 0.0800)	TC5	(0.1168 ; 0.0800)	TC5	(0.2288 ; 0.0800)
TC6	(0.1168 ; 0.0416)	TC6	(0.0607 ; 0.0416)	TC6	(0.1728 ; 0.0416)
TC7	(0.1168 ; 0.0608)	TC7	(0.0607 ; 0.0608)	TC7	(0.1728 ; 0.0608)
TC8	(0.1168 ; 0.0992)	TC8	(0.0607 ; 0.0992)	TC8	(0.1728 ; 0.0992)
TC9	(0.1168 ; 0.1184)	TC9	(0.0607 ; 0.1184)	TC9	(0.1728 ; 0.1184)
TC10	(0.1168 ; 0.0800)	TC10	(0.0607 ; 0.0800)	TC10	(0.1728 ; 0.0800)
TC11	ambiente	TC11	ambiente	TC11	ambiente

Tabela C.2 – Posicionamento do aquecedor e termopares na PCB\_02.

POSIÇÃO 1		POSIÇÃO 2		POSIÇÃO 3	
TC	(x;y)	TC	(x;y)	TC	(x;y)
TC1	(0.1125 ; 0.0870)	TC1	(0.0585 ; 0.0870)	TC1	(0.1665 ; 0.0870)
TC2	(0.0585 ; 0.0870)	TC2	(0.0045 ; 0.0870)	TC2	(0.1125 ; 0.0870)
TC3	(0.0855 ; 0.0870)	TC3	(0.0315 ; 0.0870)	TC3	(0.1395 ; 0.0870)
TC4	(0.1395 ; 0.0870)	TC4	(0.8555 ; 0.0870)	TC4	(0.1935 ; 0.0870)
TC5	(0.1665 ; 0.0870)	TC5	(0.1125 ; 0.0870)	TC5	(0.2205 ; 0.0870)
TC6	(0.1125 ; 0.0452)	TC6	(0.0585 ; 0.0452)	TC6	(0.1665 ; 0.0452)
TC7	(0.1125 ; 0.0661)	TC7	(0.0585 ; 0.0661)	TC7	(0.1665 ; 0.0661)
TC8	(0.1125 ; 0.1079)	TC8	(0.0585 ; 0.1079)	TC8	(0.1665 ; 0.1079)
TC9	(0.1125 ; 0.1288)	TC9	(0.0585 ; 0.1288)	TC9	(0.1665 ; 0.1288)
TC10	(0.1125 ; 0.0870)	TC10	(0.0585 ; 0.0870)	TC10	(0.1665 ; 0.0870)
TC11	ambiente	TC11	ambiente	TC11	ambiente

Tabela C.3 – Posicionamento do aquecedor e termopares na PCB\_03.

POSIÇÃO 1		POSIÇÃO 2		POSIÇÃO 3	
TC	(x;y)	TC	(x;y)	TC	(x;y)
TC1	(0.0900 ; 0.0800)	TC1	(0.0468 ; 0.0800)	TC1	(0.1332 ; 0.0800)
TC2	(0.0468 ; 0.0800)	TC2	(0.0036 ; 0.0800)	TC2	(0.0900 ; 0.0800)
TC3	(0.0684 ; 0.0800)	TC3	(0.0252 ; 0.0800)	TC3	(0.1116 ; 0.0800)
TC4	(0.1116 ; 0.0800)	TC4	(0.0684 ; 0.0800)	TC4	(0.1548 ; 0.0800)
TC5	(0.1332 ; 0.0800)	TC5	(0.0900 ; 0.0800)	TC5	(0.1764 ; 0.0800)
TC6	(0.0900 ; 0.0416)	TC6	(0.0468 ; 0.0416)	TC6	(0.1332 ; 0.0416)
TC7	(0.0900 ; 0.0608)	TC7	(0.0468 ; 0.0608)	TC7	(0.1332 ; 0.0608)
TC8	(0.0900 ; 0.0992)	TC8	(0.0468 ; 0.0992)	TC8	(0.1332 ; 0.0992)
TC9	(0.0900 ; 0.1184)	TC9	(0.0468 ; 0.1184)	TC9	(0.1332 ; 0.1184)
TC10	(0.0900 ; 0.0800)	TC10	(0.0468 ; 0.0800)	TC10	(0.1332 ; 0.0800)
TC11	ambiente	TC11	ambiente	TC11	ambiente

Tabela C.4 – Posicionamento do aquecedor e termopares na PCB\_04.

POSIÇÃO 1		POSIÇÃO 2		POSIÇÃO 3	
TC	(x;y)	TC	(x;y)	TC	(x;y)
TC1	(0.1000 ; 0.0842)	TC1	(0.0520 ; 0.0842)	TC1	(0.1480 ; 0.0842)
TC2	(0.0520 ; 0.0842)	TC2	(0.0040 ; 0.0842)	TC2	(0.1000 ; 0.0842)
TC3	(0.0760 ; 0.0842)	TC3	(0.0280 ; 0.0842)	TC3	(0.1240 ; 0.0842)
TC4	(0.1240 ; 0.0842)	TC4	(0.0760 ; 0.0842)	TC4	(0.1720 ; 0.0842)
TC5	(0.1480 ; 0.0842)	TC5	(0.1000 ; 0.0842)	TC5	(0.1960 ; 0.0842)
TC6	(0.1000 ; 0.0468)	TC6	(0.0520 ; 0.0468)	TC6	(0.1480 ; 0.0468)
TC7	(0.1000 ; 0.0655)	TC7	(0.0520 ; 0.0655)	TC7	(0.1480 ; 0.0655)
TC8	(0.1000 ; 0.1030)	TC8	(0.0520 ; 0.1030)	TC8	(0.1480 ; 0.1030)
TC9	(0.1000 ; 0.1217)	TC9	(0.0520 ; 0.1217)	TC9	(0.1480 ; 0.1217)
TC10	(0.1000 ; 0.0842)	TC10	(0.0520 ; 0.0842)	TC10	(0.1480 ; 0.0842)
TC11	ambiente	TC11	ambiente	TC11	ambiente

Tabela C.5 – Posicionamento do aquecedor e termopares na PCB\_05.

POSIÇÃO 1		POSIÇÃO 2		POSIÇÃO 3	
TC	(x;y)	TC	(x;y)	TC	(x;y)
TC1	(0.1480 ; 0.1025)	TC1	(0.0770 ; 0.1025)	TC1	(0.2190 ; 0.1025)
TC2	(0.0770 ; 0.1025)	TC2	(0.0059 ; 0.1025)	TC2	(0.1480 ; 0.1025)
TC3	(0.1125 ; 0.1025)	TC3	(0.0414 ; 0.1025)	TC3	(0.1835 ; 0.1025)
TC4	(0.1835 ; 0.1025)	TC4	(0.1125 ; 0.1025)	TC4	(0.2546 ; 0.1025)
TC5	(0.2190 ; 0.1025)	TC5	(0.1480 ; 0.1025)	TC5	(0.2901 ; 0.1025)
TC6	(0.1480 ; 0.0533)	TC6	(0.0770 ; 0.0533)	TC6	(0.2190 ; 0.0533)
TC7	(0.1480 ; 0.0779)	TC7	(0.0770 ; 0.0761)	TC7	(0.2190 ; 0.0779)
TC8	(0.1480 ; 0.1271)	TC8	(0.0770 ; 0.1271)	TC8	(0.2190 ; 0.1271)
TC9	(0.1480 ; 0.1517)	TC9	(0.0770 ; 0.1571)	TC9	(0.2190 ; 0.1517)
TC10	(0.1480 ; 0.1025)	TC10	(0.0770 ; 0.1025)	TC10	(0.2190 ; 0.1025)
TC11	ambiente	TC11	ambiente	TC11	ambiente

Tabela C.6 – Posicionamento do aquecedor e termopares na PCB\_06.

POSIÇÃO 1		POSIÇÃO 2		POSIÇÃO 3	
TC	(x;y)	TC	(x;y)	TC	(x;y)
TC1	(0.1480 ; 0.1025)	TC1	(0.0770 ; 0.1025)	TC1	(0.2190 ; 0.1025)
TC2	(0.0770 ; 0.1025)	TC2	(0.0059 ; 0.1025)	TC2	(0.1480 ; 0.1025)
TC3	(0.1125 ; 0.1025)	TC3	(0.0414 ; 0.1025)	TC3	(0.1835 ; 0.1025)
TC4	(0.1835 ; 0.1025)	TC4	(0.1125 ; 0.1025)	TC4	(0.2546 ; 0.1025)
TC5	(0.2190 ; 0.1025)	TC5	(0.1480 ; 0.1025)	TC5	(0.2901 ; 0.1025)
TC6	(0.1480 ; 0.0533)	TC6	(0.0770 ; 0.0533)	TC6	(0.2190 ; 0.0533)
TC7	(0.1480 ; 0.0779)	TC7	(0.0770 ; 0.0761)	TC7	(0.2190 ; 0.0779)
TC8	(0.1480 ; 0.1271)	TC8	(0.0770 ; 0.1271)	TC8	(0.2190 ; 0.1271)
TC9	(0.1480 ; 0.1517)	TC9	(0.0770 ; 0.1571)	TC9	(0.2190 ; 0.1517)
TC10	(0.1480 ; 0.1025)	TC10	(0.0770 ; 0.1025)	TC10	(0.2190 ; 0.1025)
TC11	ambiente	TC11	ambiente	TC11	ambiente

Tabela C.7 – Posicionamento do aquecedor e termopares na PCB\_07.

POSIÇÃO 1		POSIÇÃO 2		POSIÇÃO 3	
TC	(x;y)	TC	(x;y)	TC	(x;y)
TC1	(0.1000 ; 0.0850)	TC1	(0.0520 ; 0.0820)	TC1	(0.1480 ; 0.0850)
TC2	(0.0520 ; 0.0850)	TC2	(0.0040 ; 0.0850)	TC2	(0.1000 ; 0.0850)
TC3	(0.0760 ; 0.0850)	TC3	(0.0280 ; 0.0850)	TC3	(0.1240 ; 0.0850)
TC4	(0.1240 ; 0.0850)	TC4	(0.0760 ; 0.0850)	TC4	(0.1720 ; 0.0850)
TC5	(0.1480 ; 0.0850)	TC5	(0.1000 ; 0.0850)	TC5	(0.1960 ; 0.0850)
TC6	(0.1000 ; 0.0442)	TC6	(0.0520 ; 0.0442)	TC6	(0.1480 ; 0.0442)
TC7	(0.1000 ; 0.0646)	TC7	(0.0520 ; 0.0646)	TC7	(0.1480 ; 0.0646)
TC8	(0.1000 ; 0.1054)	TC8	(0.0520 ; 0.1054)	TC8	(0.1480 ; 0.1054)
TC9	(0.1000 ; 0.1258)	TC9	(0.0520 ; 0.1258)	TC9	(0.1480 ; 0.1258)
TC10	(0.1000 ; 0.0850)	TC10	(0.0520 ; 0.0820)	TC10	(0.1480 ; 0.0850)
TC11	ambiente	TC11	ambiente	TC11	ambiente

Tabela C.8 – Posicionamento do aquecedor e termopares na PCB\_08.

POSIÇÃO 1		POSIÇÃO 2		POSIÇÃO 3	
TC	(x;y)	TC	(x;y)	TC	(x;y)
TC1	(0.1360 ; 0.0707)	TC1	(0.0707 ; 0.0707)	TC1	(0.2013 ; 0.0707)
TC2	(0.0707 ; 0.0707)	TC2	(0.0054 ; 0.0707)	TC2	(0.1360 ; 0.0707)
TC3	(0.1034 ; 0.0707)	TC3	(0.0381 ; 0.0707)	TC3	(0.1686 ; 0.0707)
TC4	(0.1686 ; 0.0707)	TC4	(0.1034 ; 0.0707)	TC4	(0.2339 ; 0.0707)
TC5	(0.2013 ; 0.0707)	TC5	(0.1360 ; 0.0707)	TC5	(0.2666 ; 0.0707)
TC6	(0.1360 ; 0.0368)	TC6	(0.0707 ; 0.0368)	TC6	(0.2013 ; 0.0368)
TC7	(0.1360 ; 0.0538)	TC7	(0.0707 ; 0.0538)	TC7	(0.2013 ; 0.0538)
TC8	(0.1360 ; 0.0877)	TC8	(0.0707 ; 0.0877)	TC8	(0.2013 ; 0.0877)
TC9	(0.1360 ; 0.1047)	TC9	(0.0707 ; 0.1047)	TC9	(0.2013 ; 0.1047)
TC10	(0.1360 ; 0.0707)	TC10	(0.0707 ; 0.0707)	TC10	(0.2013 ; 0.0707)
TC11	ambiente	TC11	ambiente	TC11	ambiente

Tabela C.9 – Posicionamento do aquecedor e termopares na PCB\_09.

POSIÇÃO 1		POSIÇÃO 2		POSIÇÃO 3	
TC	(x;y)	TC	(x;y)	TC	(x;y)
TC1	(0.1360 ; 0.0707)	TC1	(0.0707 ; 0.0707)	TC1	(0.2013 ; 0.0707)
TC2	(0.0707 ; 0.0707)	TC2	(0.0054 ; 0.0707)	TC2	(0.1360 ; 0.0707)
TC3	(0.1034 ; 0.0707)	TC3	(0.0381 ; 0.0707)	TC3	(0.1686 ; 0.0707)
TC4	(0.1686 ; 0.0707)	TC4	(0.1034 ; 0.0707)	TC4	(0.2339 ; 0.0707)
TC5	(0.2013 ; 0.0707)	TC5	(0.1360 ; 0.0707)	TC5	(0.2666 ; 0.0707)
TC6	(0.1360 ; 0.0368)	TC6	(0.0707 ; 0.0368)	TC6	(0.2013 ; 0.0368)
TC7	(0.1360 ; 0.0538)	TC7	(0.0707 ; 0.0538)	TC7	(0.2013 ; 0.0538)
TC8	(0.1360 ; 0.0877)	TC8	(0.0707 ; 0.0877)	TC8	(0.2013 ; 0.0877)
TC9	(0.1360 ; 0.1047)	TC9	(0.0707 ; 0.1047)	TC9	(0.2013 ; 0.1047)
TC10	(0.1360 ; 0.0707)	TC10	(0.0707 ; 0.0707)	TC10	(0.2013 ; 0.0707)
TC11	ambiente	TC11	ambiente	TC11	ambiente

Tabela C.10 – Posicionamento do aquecedor e termopares na PCB\_10.

POSIÇÃO 1		POSIÇÃO 2		POSIÇÃO 3	
TC	(x;y)	TC	(x;y)	TC	(x;y)
TC1	(0.1360 ; 0.0707)	TC1	(0.0707 ; 0.0707)	TC1	(0.2013 ; 0.0707)
TC2	(0.0707 ; 0.0707)	TC2	(0.0054 ; 0.0707)	TC2	(0.1360 ; 0.0707)
TC3	(0.1034 ; 0.0707)	TC3	(0.0381 ; 0.0707)	TC3	(0.1686 ; 0.0707)
TC4	(0.1686 ; 0.0707)	TC4	(0.1034 ; 0.0707)	TC4	(0.2339 ; 0.0707)
TC5	(0.2013 ; 0.0707)	TC5	(0.1360 ; 0.0707)	TC5	(0.2666 ; 0.0707)
TC6	(0.1360 ; 0.0368)	TC6	(0.0707 ; 0.0368)	TC6	(0.2013 ; 0.0368)
TC7	(0.1360 ; 0.0538)	TC7	(0.0707 ; 0.0538)	TC7	(0.2013 ; 0.0538)
TC8	(0.1360 ; 0.0877)	TC8	(0.0707 ; 0.0877)	TC8	(0.2013 ; 0.0877)
TC9	(0.1360 ; 0.1047)	TC9	(0.0707 ; 0.1047)	TC9	(0.2013 ; 0.1047)
TC10	(0.1360 ; 0.0707)	TC10	(0.0707 ; 0.0707)	TC10	(0.2013 ; 0.0707)
TC11	ambiente	TC11	ambiente	TC11	ambiente



Tabela C.11 - Posicionamento do aquecedor e termopares na PCB\_11.

POSIÇÃO 1		POSIÇÃO 2		POSIÇÃO 3	
TC	(x;y)	TC	(x;y)	TC	(x;y)
TC1	(0.1360 ; 0.0610)	TC1	(0.0707 ; 0.0610)	TC1	(0.2013 ; 0.0610)
TC2	(0.0707 ; 0.0610)	TC2	(0.0054 ; 0.0610)	TC2	(0.1360 ; 0.0610)
TC3	(0.1034 ; 0.0610)	TC3	(0.0381 ; 0.0610)	TC3	(0.1686 ; 0.0610)
TC4	(0.1686 ; 0.0610)	TC4	(0.1034 ; 0.0610)	TC4	(0.2339 ; 0.0610)
TC5	(0.2013 ; 0.0610)	TC5	(0.1360 ; 0.0610)	TC5	(0.2666 ; 0.0610)
TC6	(0.1360 ; 0.0317)	TC6	(0.0707 ; 0.0317)	TC6	(0.2013 ; 0.0317)
TC7	(0.1360 ; 0.0464)	TC7	(0.0707 ; 0.0464)	TC7	(0.2013 ; 0.0464)
TC8	(0.1360 ; 0.0756)	TC8	(0.0707 ; 0.0756)	TC8	(0.2013 ; 0.0756)
TC9	(0.1360 ; 0.0903)	TC9	(0.0707 ; 0.0903)	TC9	(0.2013 ; 0.0903)
TC10	(0.1360 ; 0.0610)	TC10	(0.0707 ; 0.0610)	TC10	(0.2013 ; 0.0610)
TC11	ambiente	TC11	ambiente	TC11	ambiente

## 15 APÊNDICE D – GRÁFICOS DE TEMPERATURAS DOS TESTES

Os gráficos com as curvas de temperatura de todos os testes em regime transiente em ambiente convectivo são mostrados da Figura D.1 a Figura D.33.

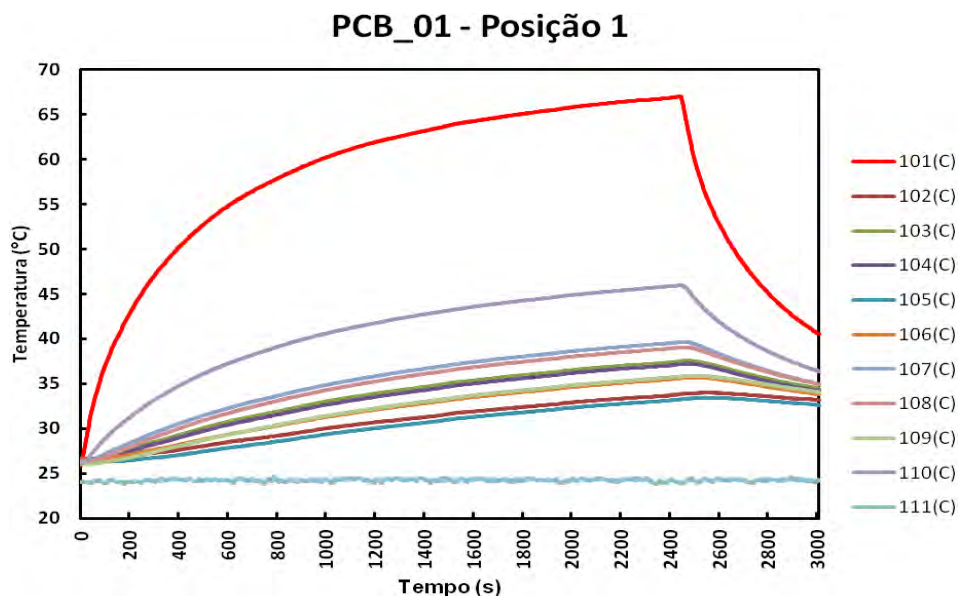


Figura D.1 - Curvas de temperatura da PCB\_01 com aquecedor na posição 1.

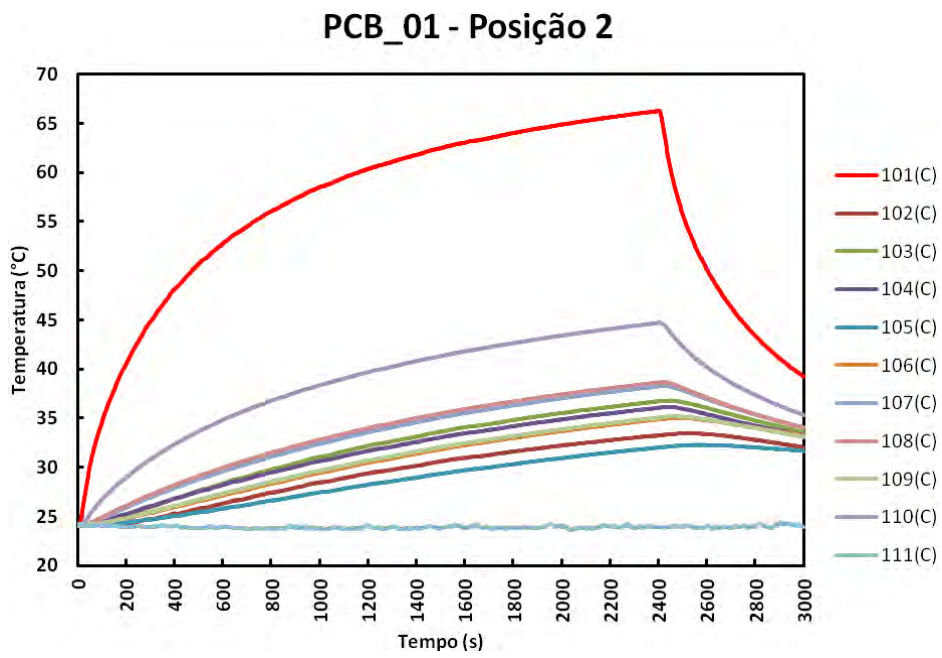


Figura D.2 - Curvas de temperatura da PCB\_01 com aquecedor na posição 2.

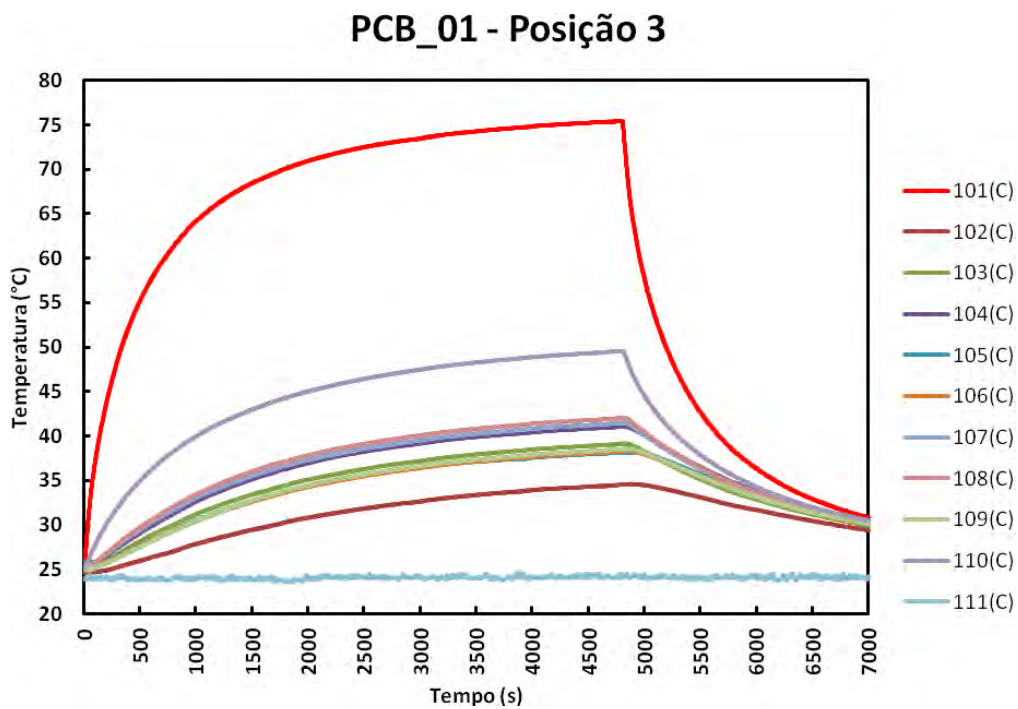


Figura D.3 - Curvas de temperatura da PCB\_01 com aquecedor na posição 3.

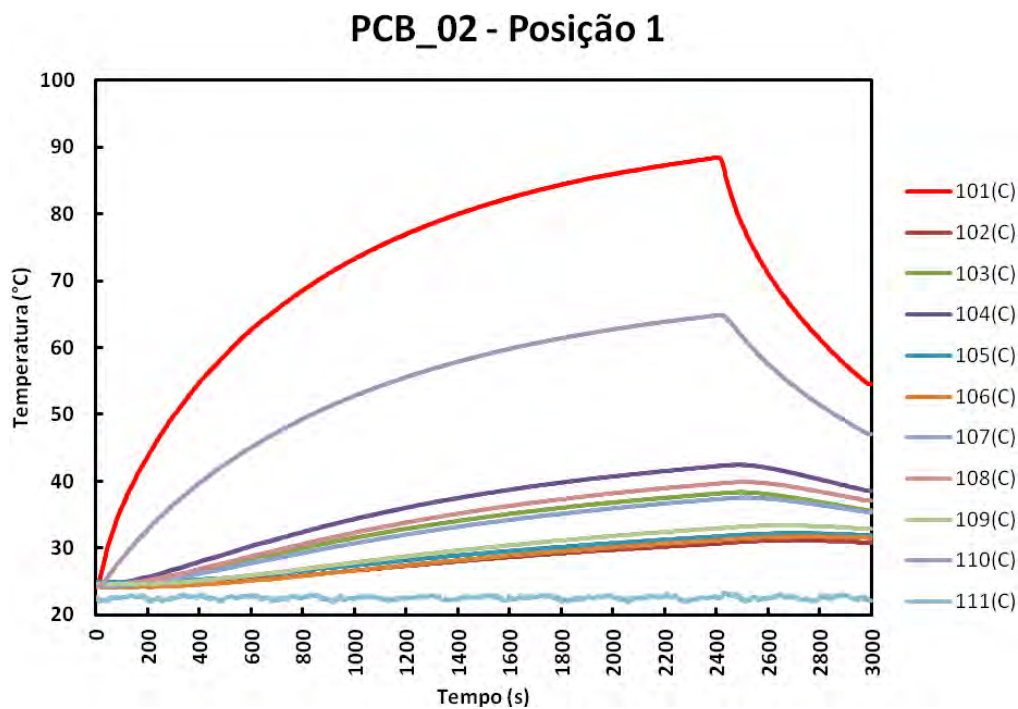


Figura D.4 - Curvas de temperatura da PCB\_02 com aquecedor na posição 1.

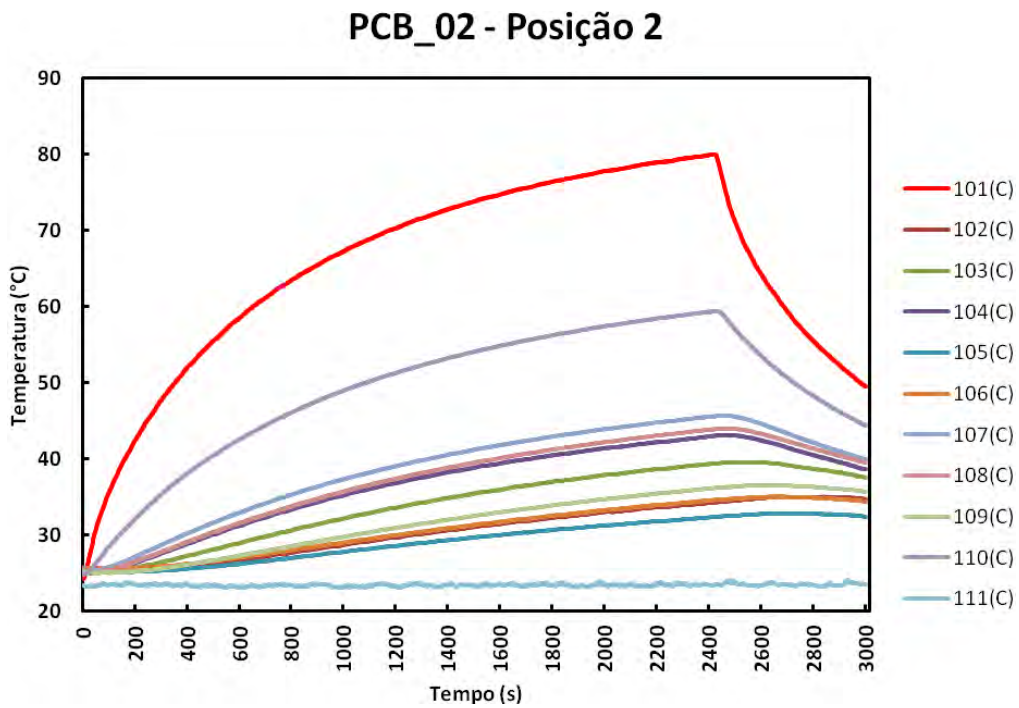


Figura D.5 Curvas de temperatura da PCB\_02 com aquecedor na posição 2.

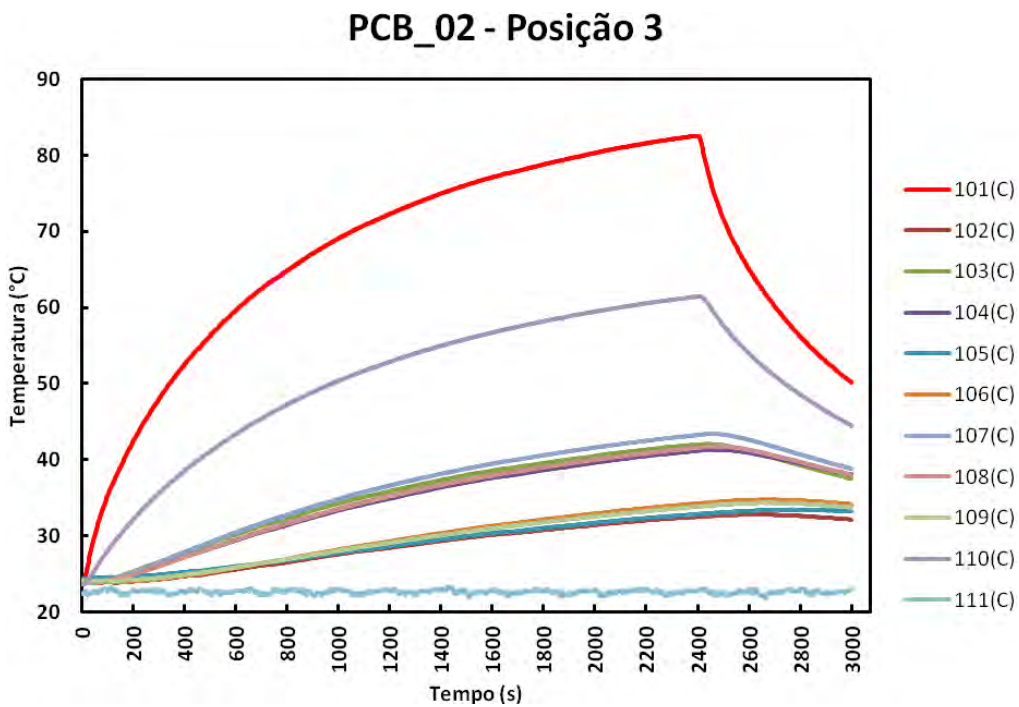


Figura D.6 - Curvas de temperatura da PCB\_02 com aquecedor na posição 3.

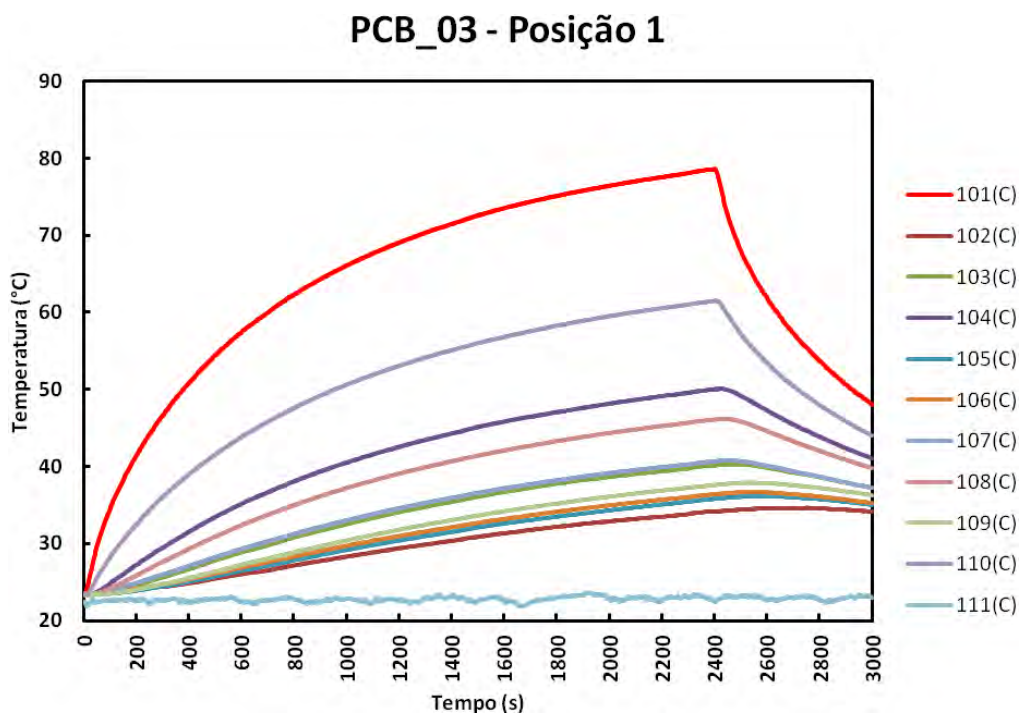


Figura D.7 - Curvas de temperatura da PCB\_03 com aquecedor na posição 1.

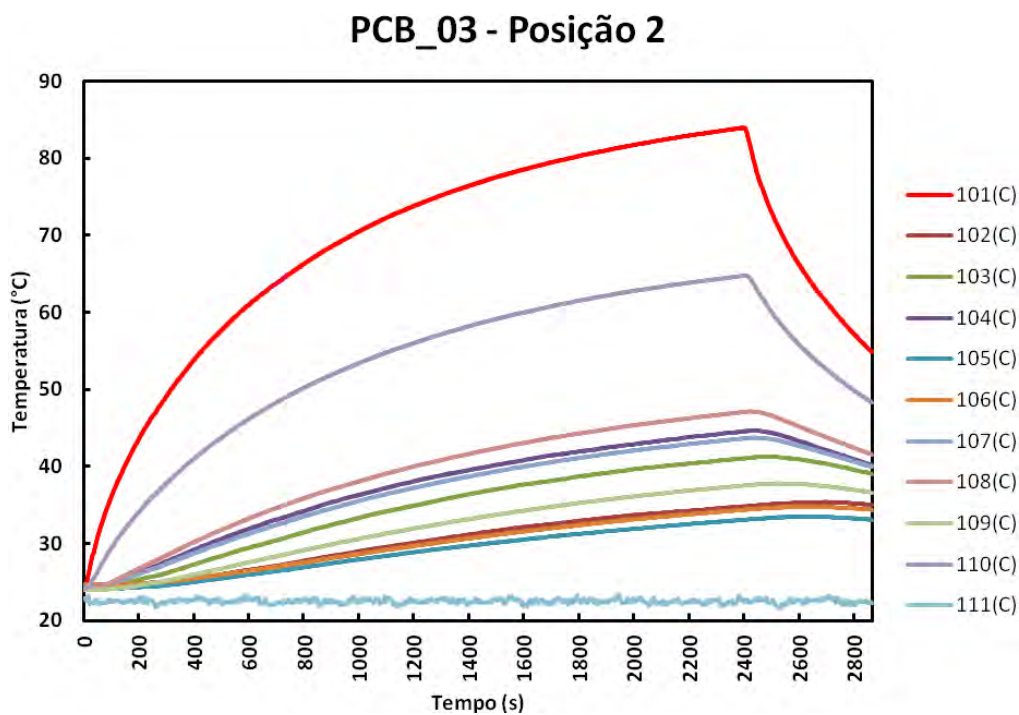


Figura D.8 - Curvas de temperatura da PCB\_03 com aquecedor na posição 2.

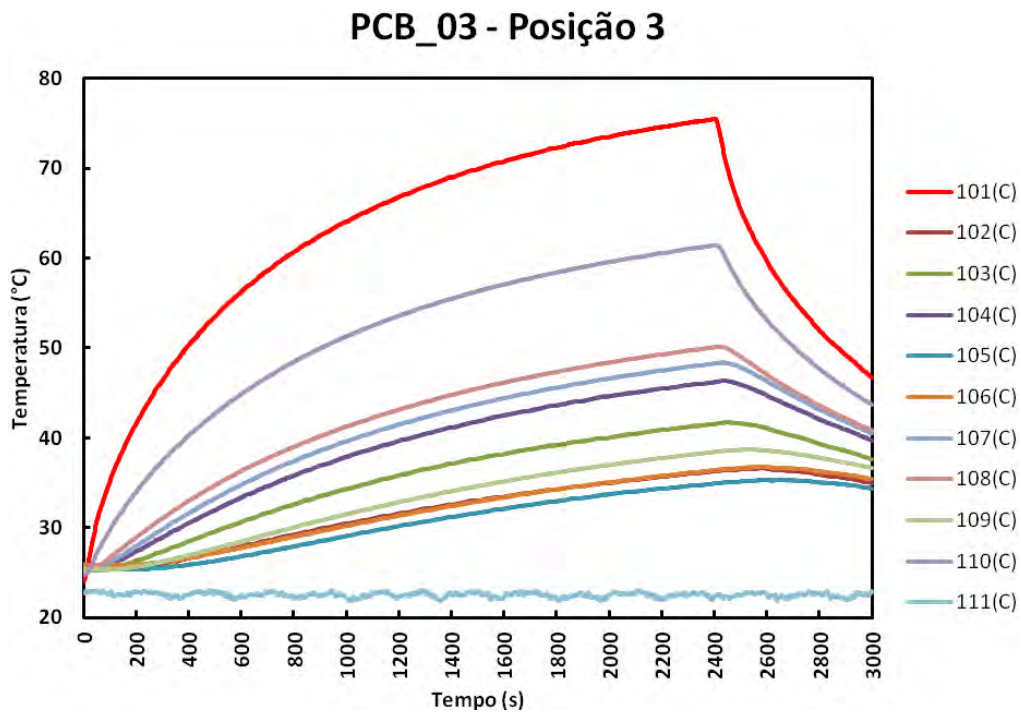


Figura D.9 - Curvas de temperatura da PCB\_03 com aquecedor na posição 3.

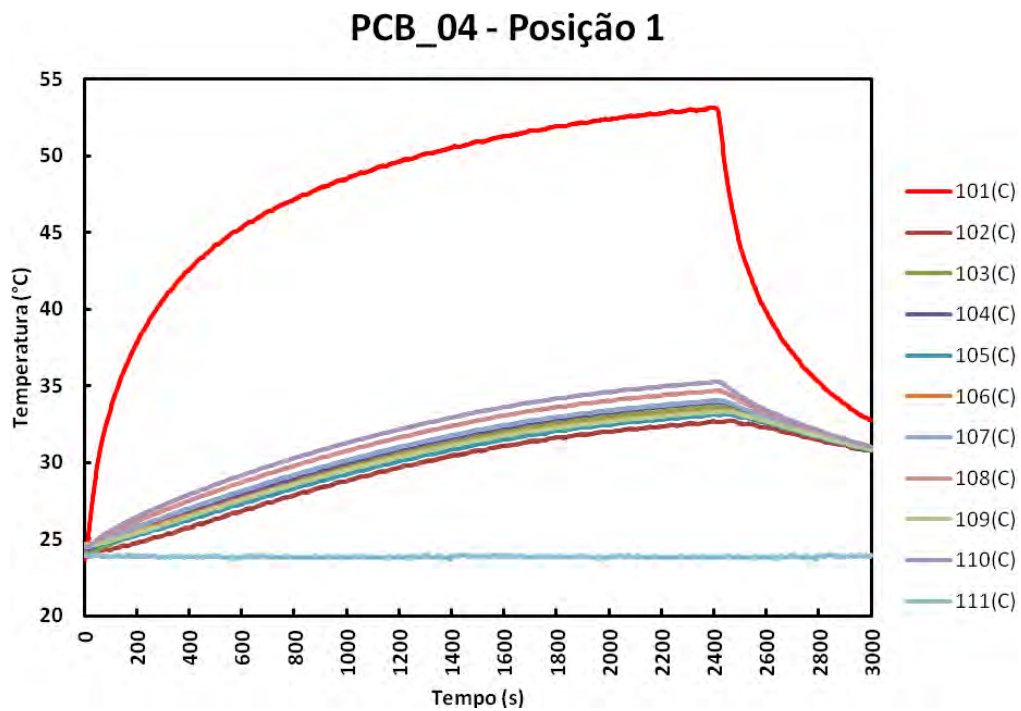


Figura D.10 - Curvas de temperatura da PCB\_02 com aquecedor na posição 1.

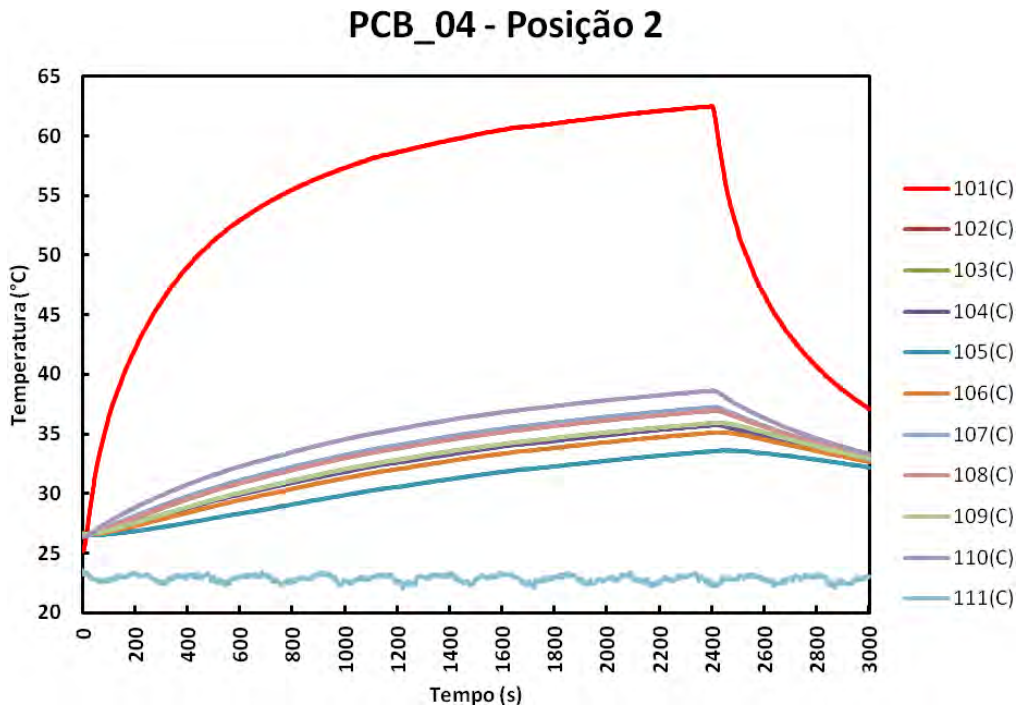


Figura D.11 - Curvas de temperatura da PCB\_04 com aquecedor na posição 2.

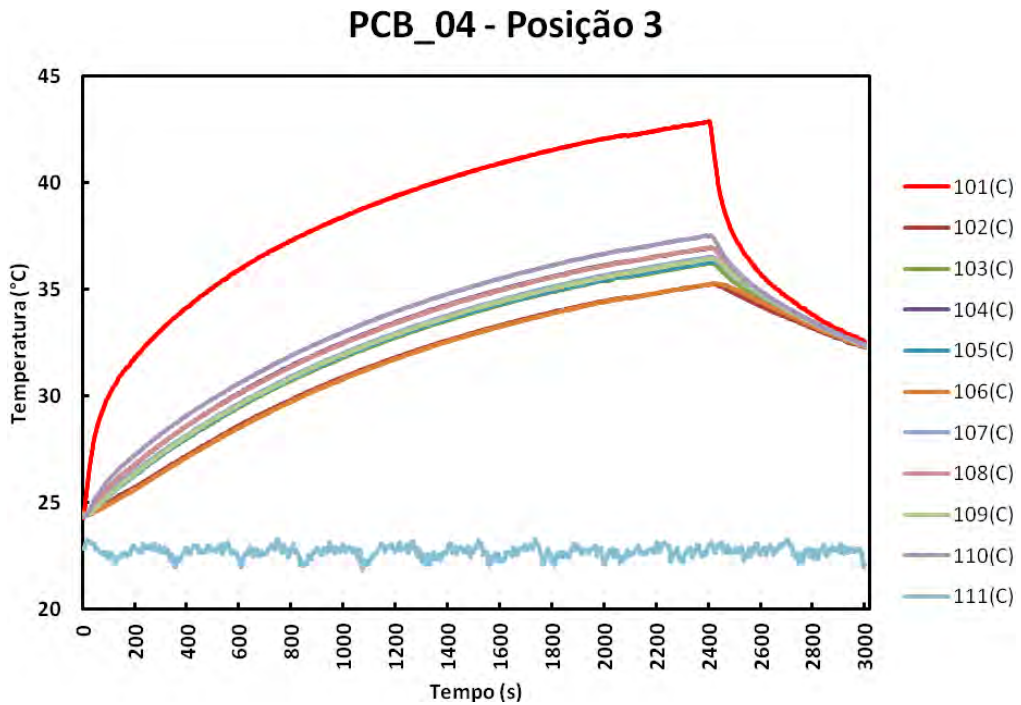


Figura D.12 - Curvas de temperatura da PCB\_04 com aquecedor na posição 3.



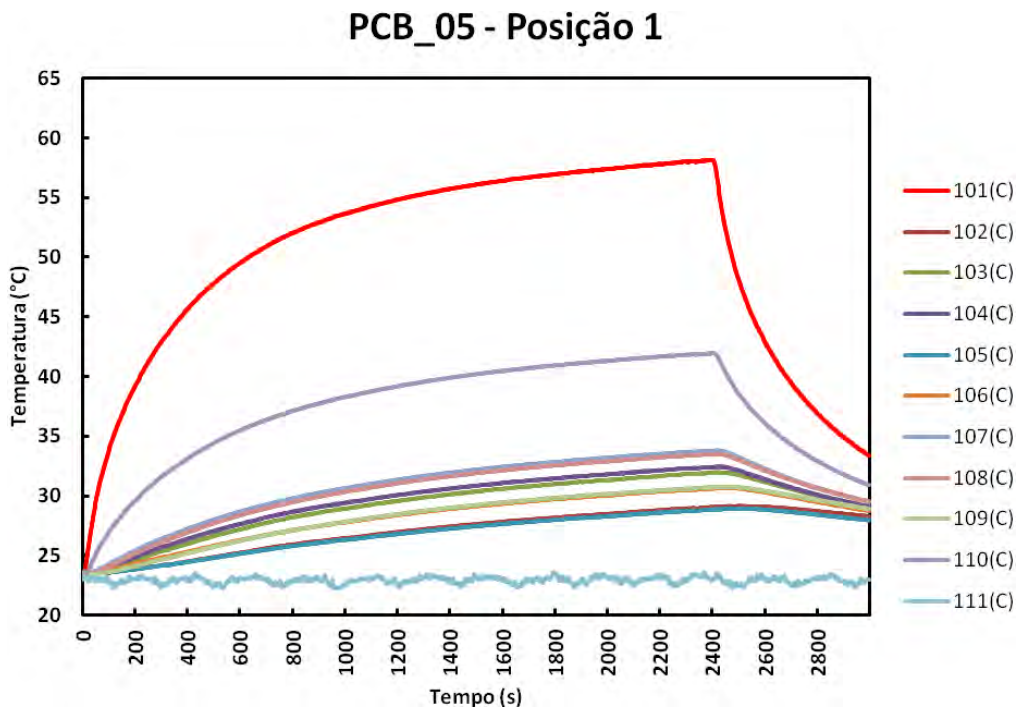


Figura D.13 - Curvas de temperatura da PCB\_05 com aquecedor na posição 1.

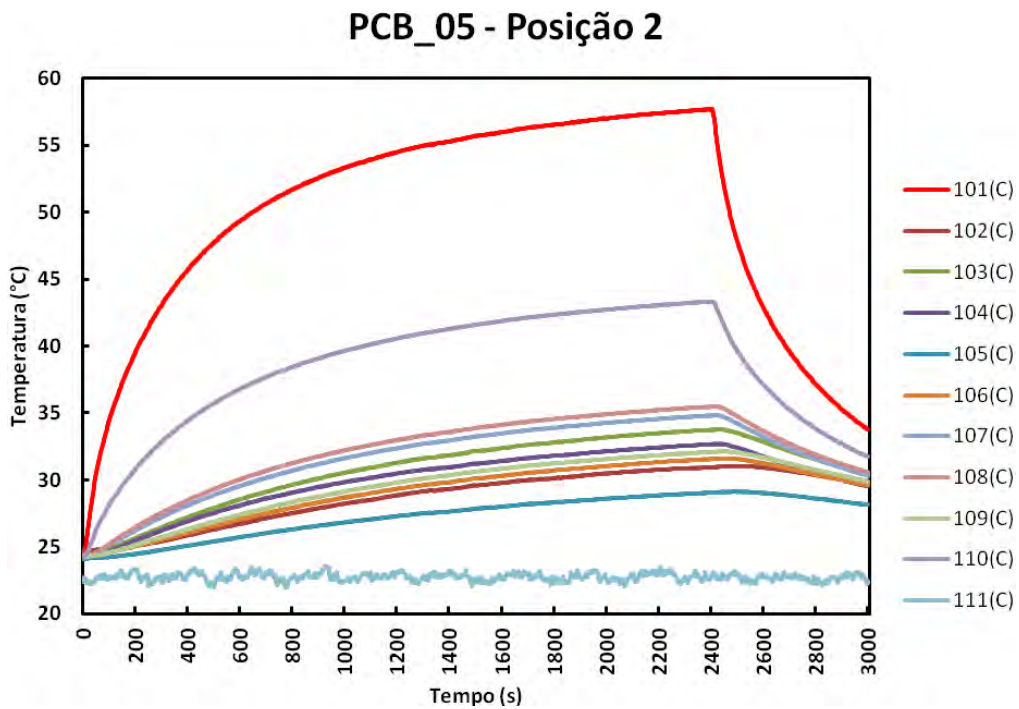


Figura D.14 - Curvas de temperatura da PCB\_05 com aquecedor na posição 2.

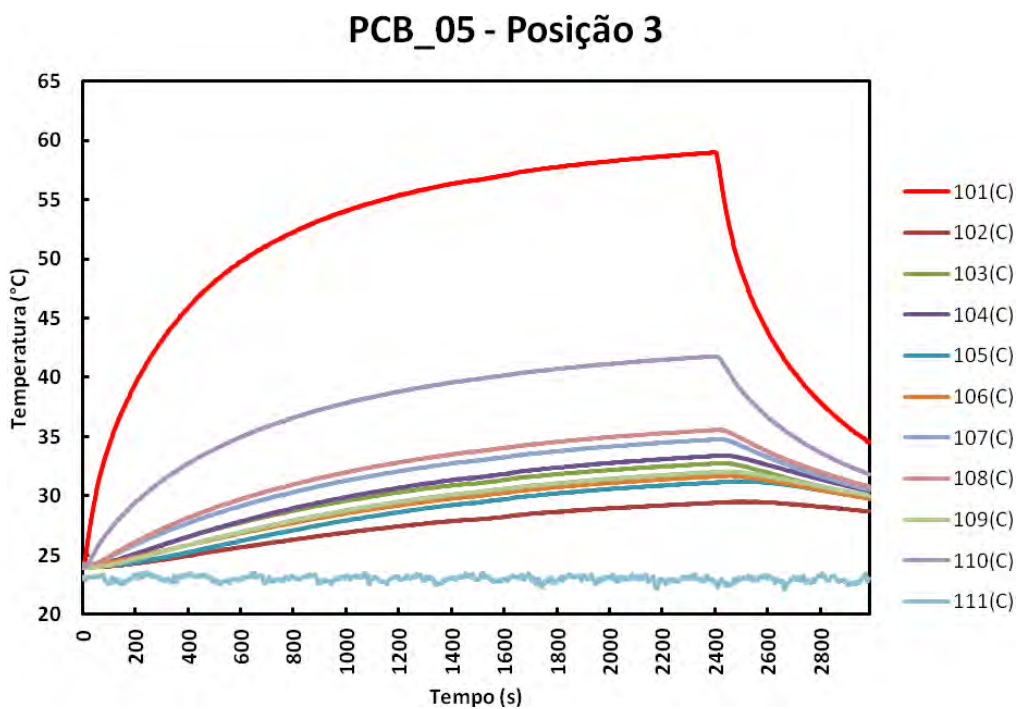


Figura D.15 - Curvas de temperatura da PCB\_05 com aquecedor na posição 3.

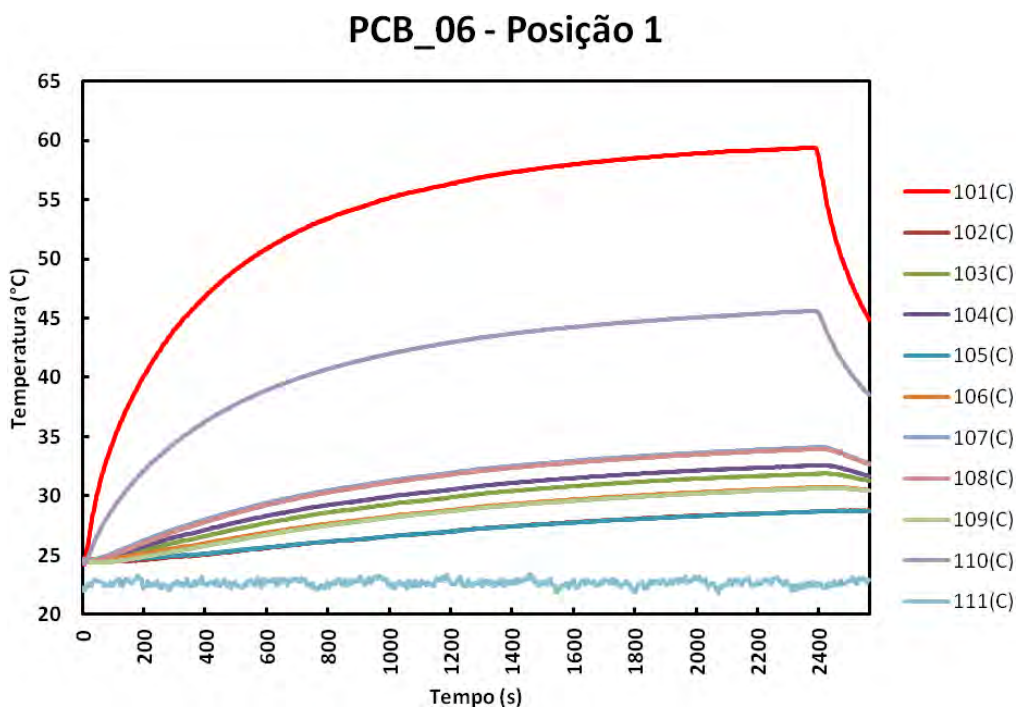


Figura D.16 - Curvas de temperatura da PCB\_06 com aquecedor na posição 1.

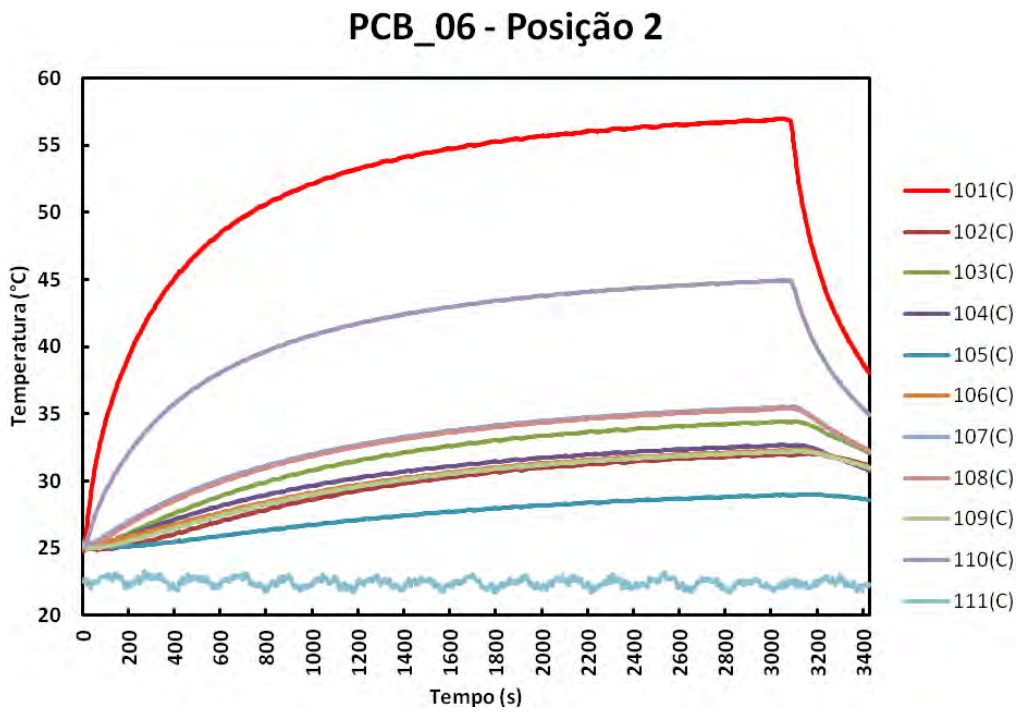


Figura D.17 - Curvas de temperatura da PCB\_06 com aquecedor na posição 2.

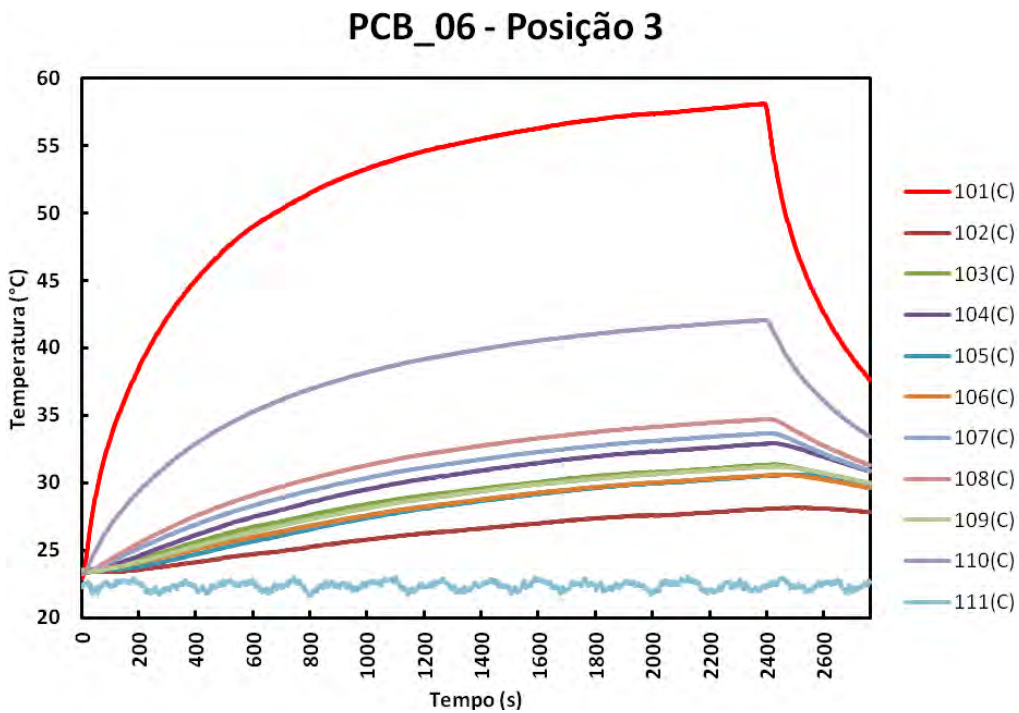


Figura D.18 - Curvas de temperatura da PCB\_06 com aquecedor na posição 3.

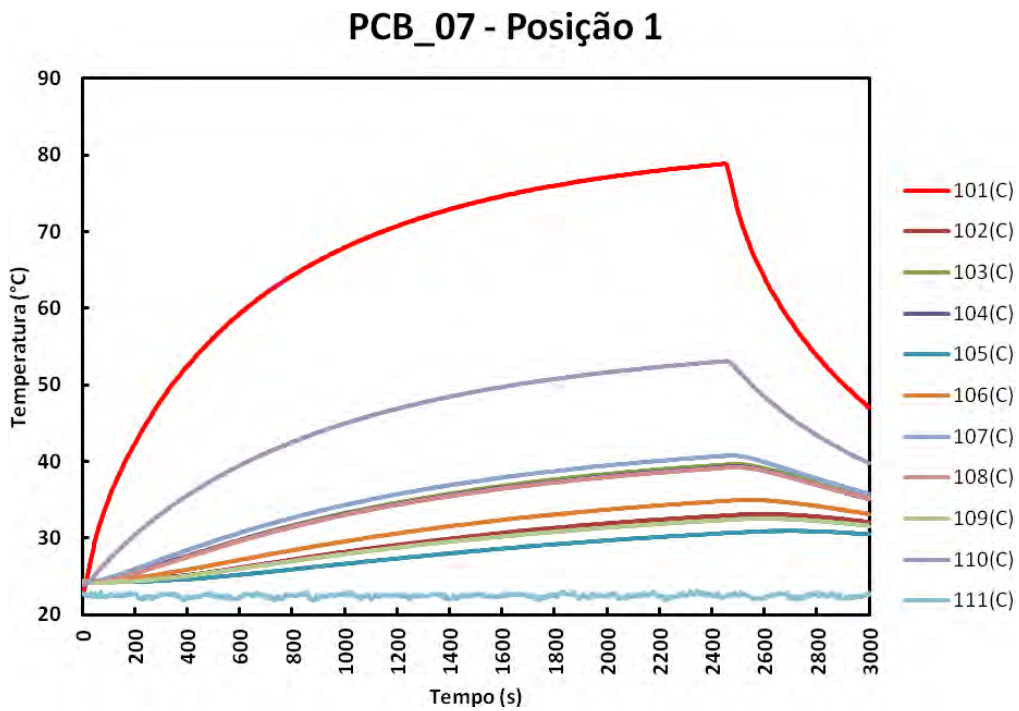


Figura D.19 - Curvas de temperatura da PCB\_07 com aquecedor na posição 1.

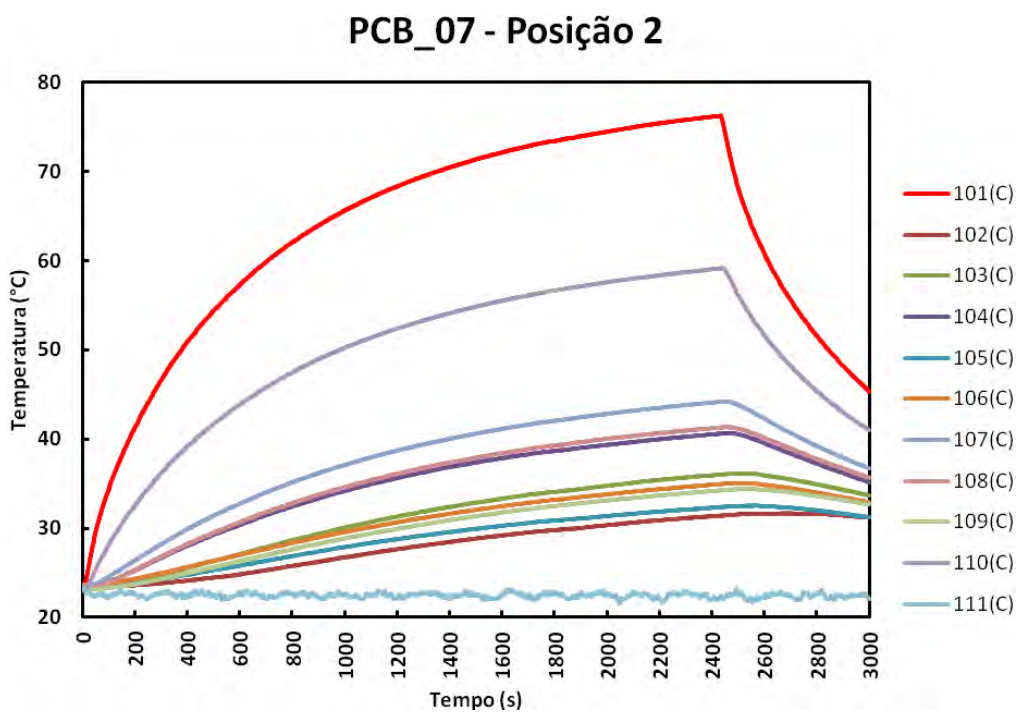


Figura D.20 - Curvas de temperatura da PCB\_07 com aquecedor na posição 2.

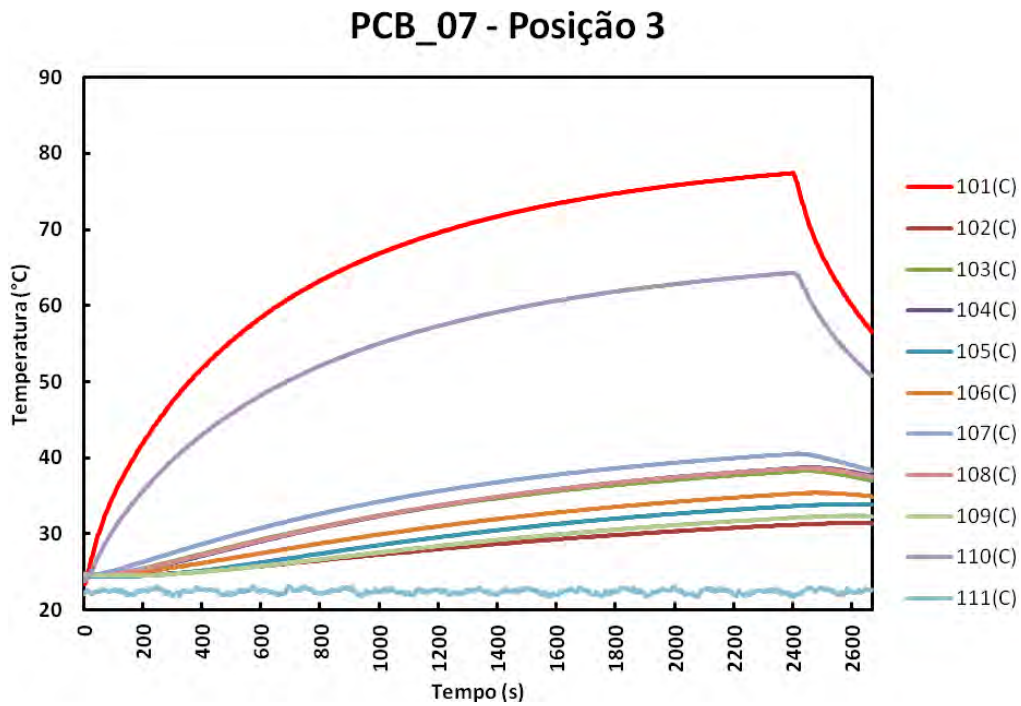


Figura D.21 - Curvas de temperatura da PCB\_07 com aquecedor na posição 3.

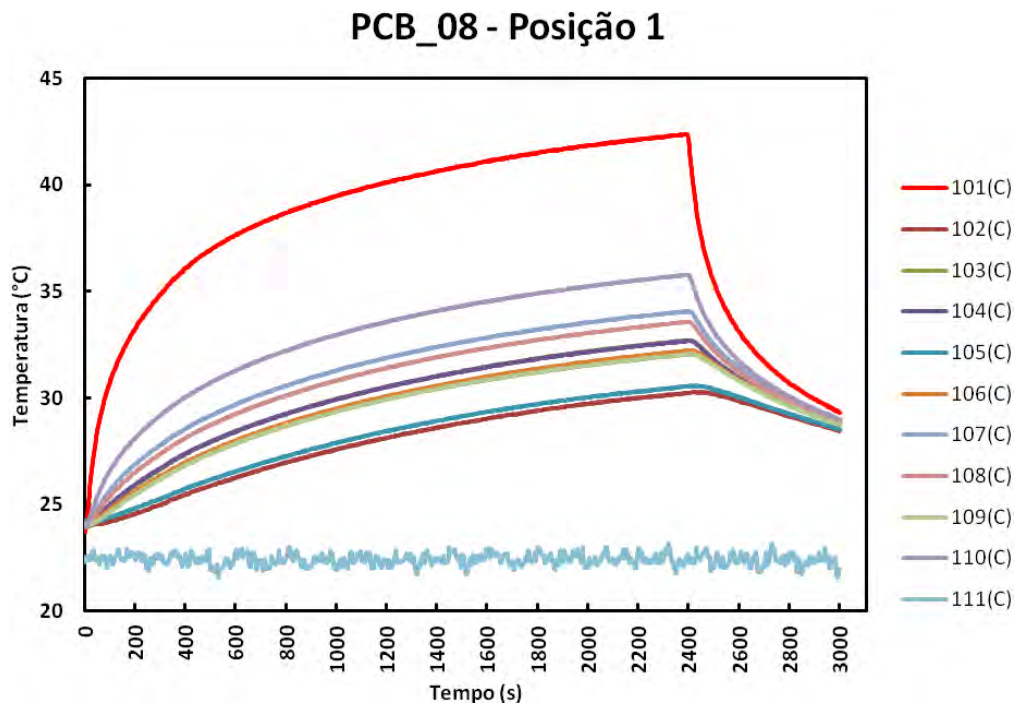


Figura D.22 - Curvas de temperatura da PCB\_08 com aquecedor na posição 1.

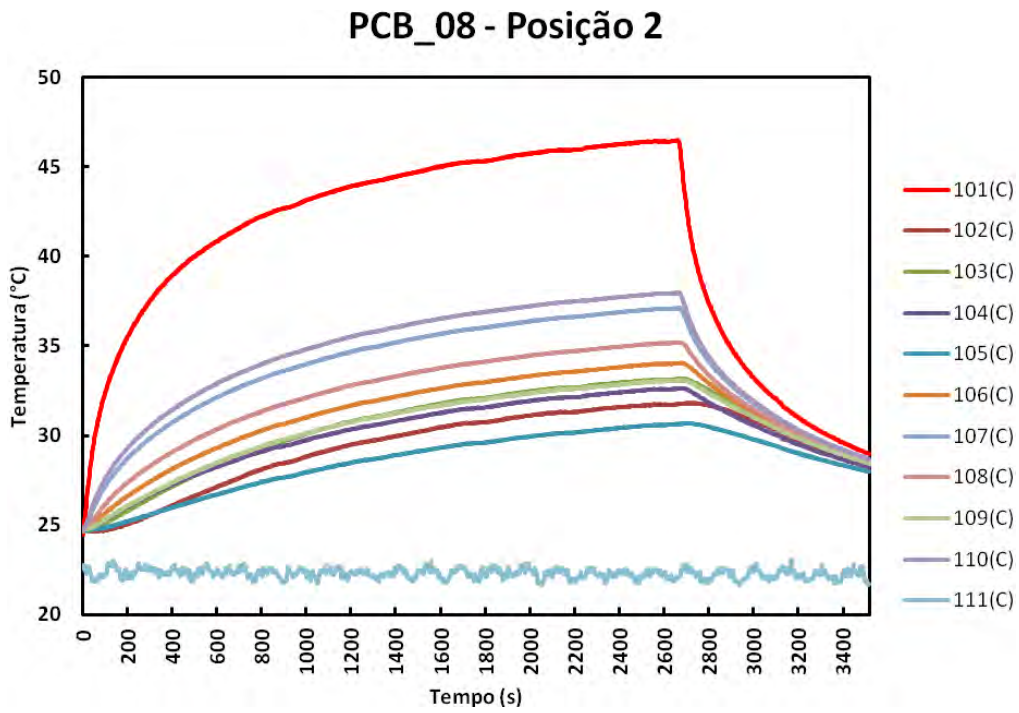


Figura D.23 - Curvas de temperatura da PCB\_08 com aquecedor na posição 2.

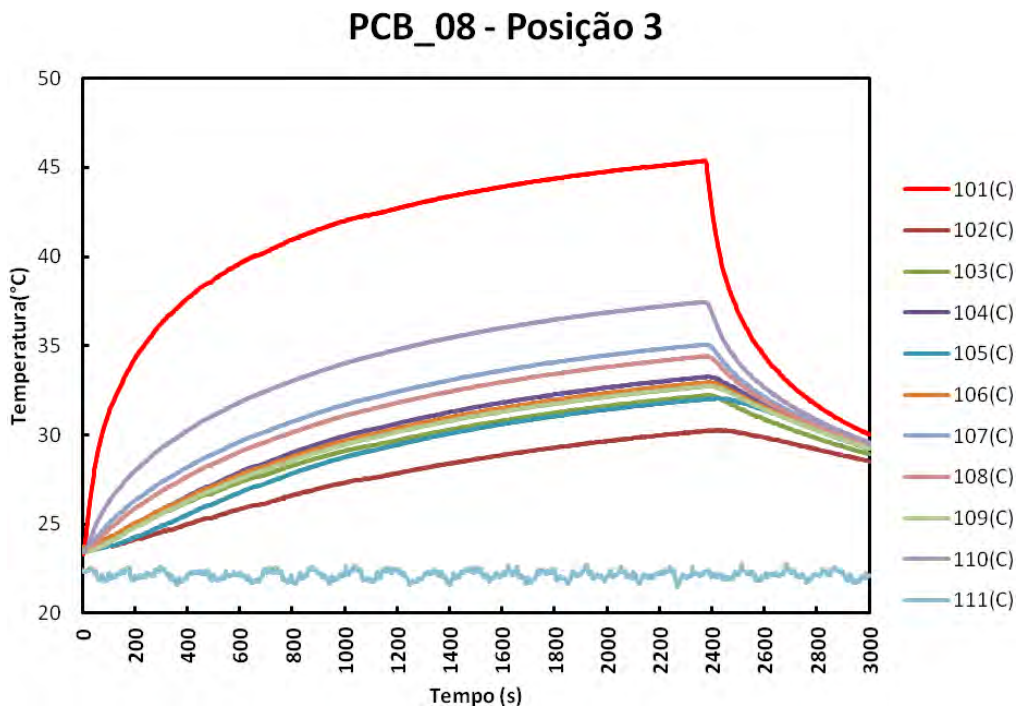


Figura D.24 - Curvas de temperatura da PCB\_08 com aquecedor na posição 3.

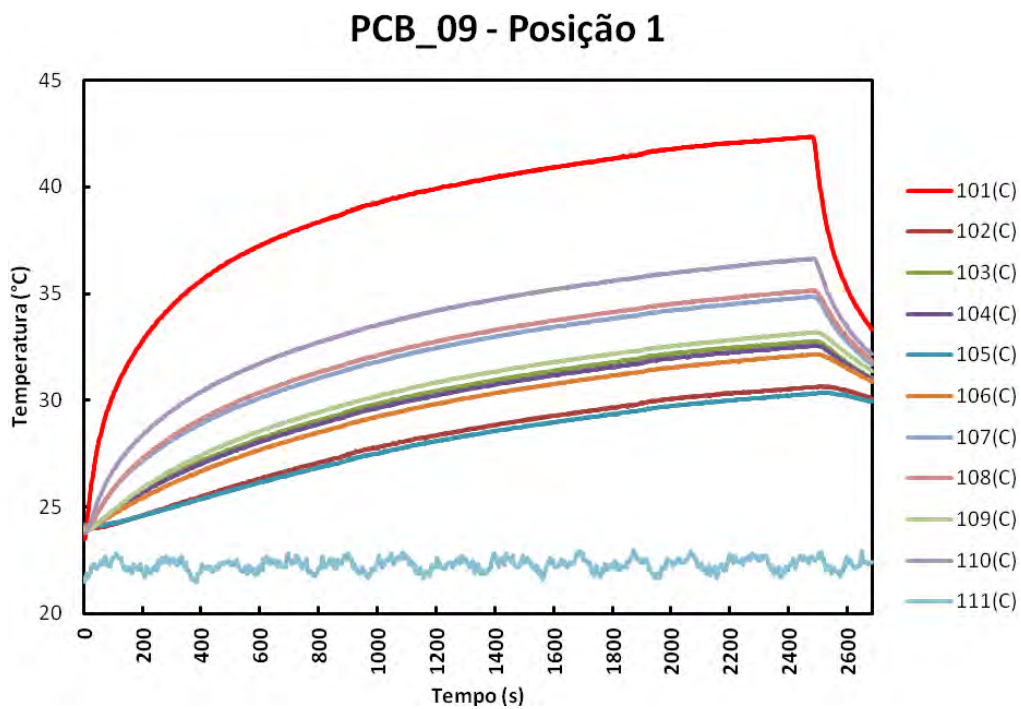


Figura D.25 - Curvas de temperatura da PCB\_09 com aquecedor na posição 1.

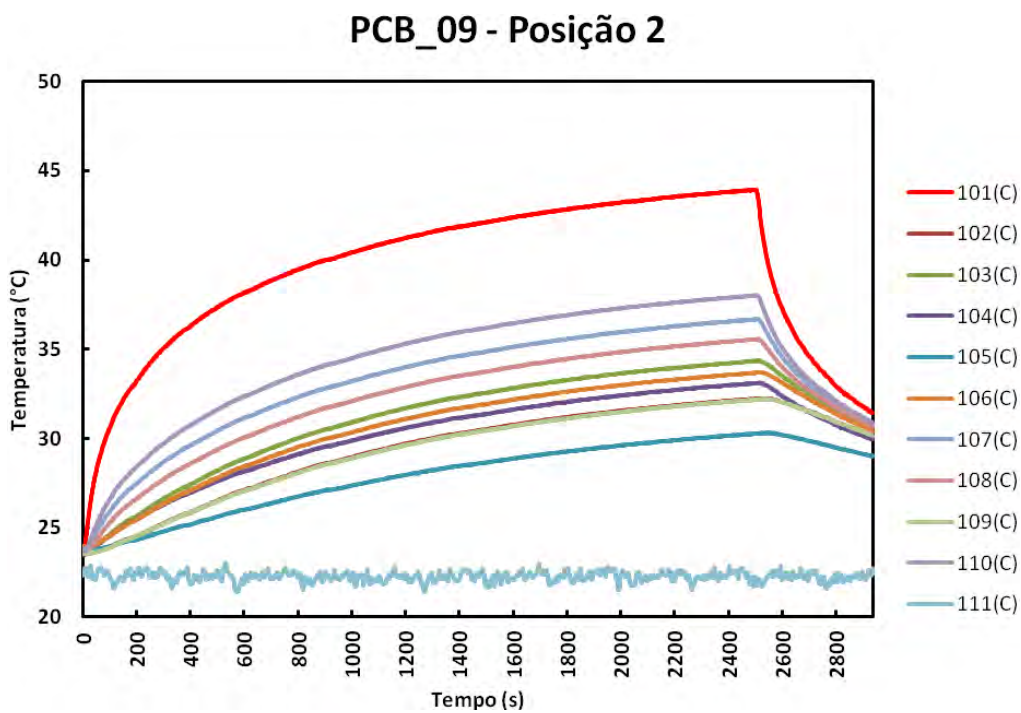


Figura D.26 - Curvas de temperatura da PCB\_09 com aquecedor na posição 2.

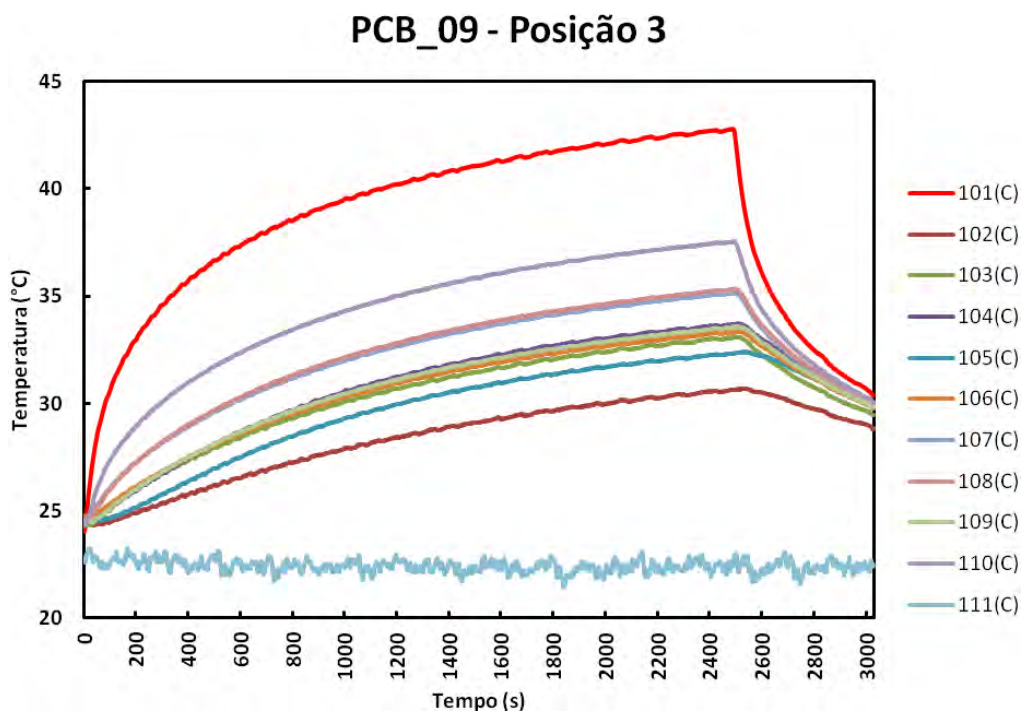


Figura D.27 - Curvas de temperatura da PCB\_09 com aquecedor na posição 3.

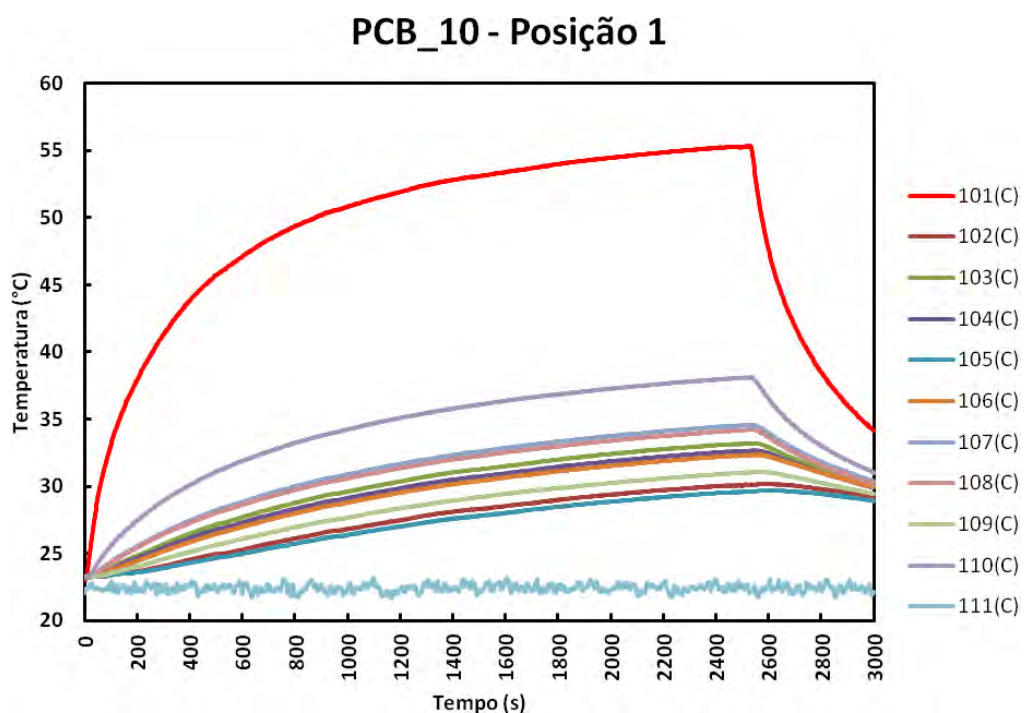


Figura D.28 - Curvas de temperatura da PCB\_10 com aquecedor na posição 1.



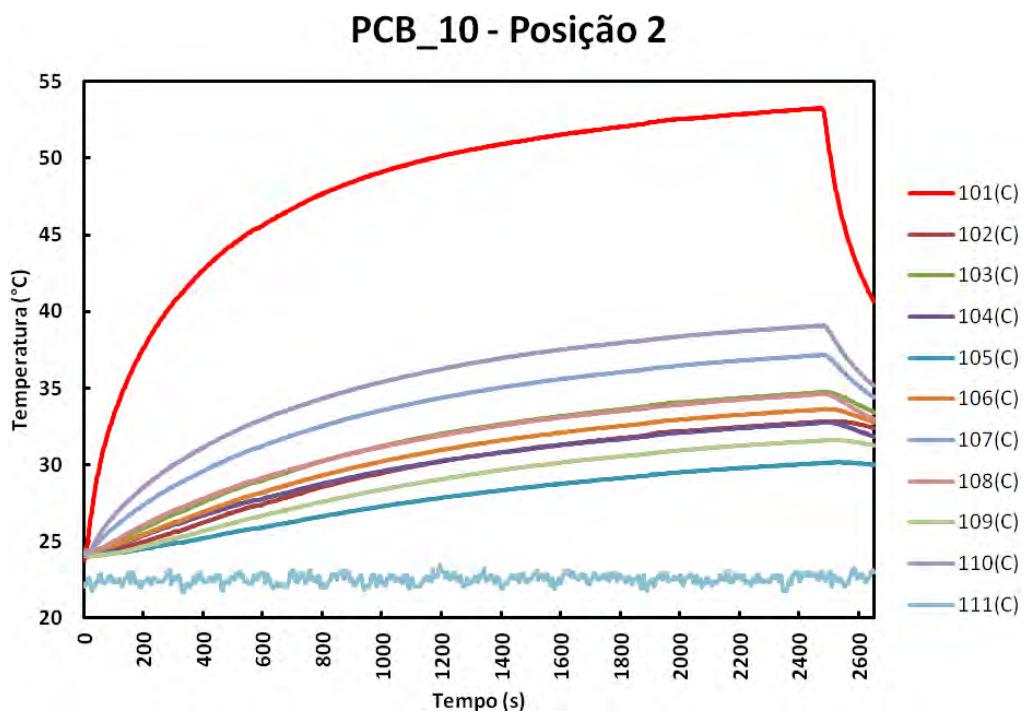


Figura D.29 – Curvas de temperatura da PCB\_10 com aquecedor na posição 2.

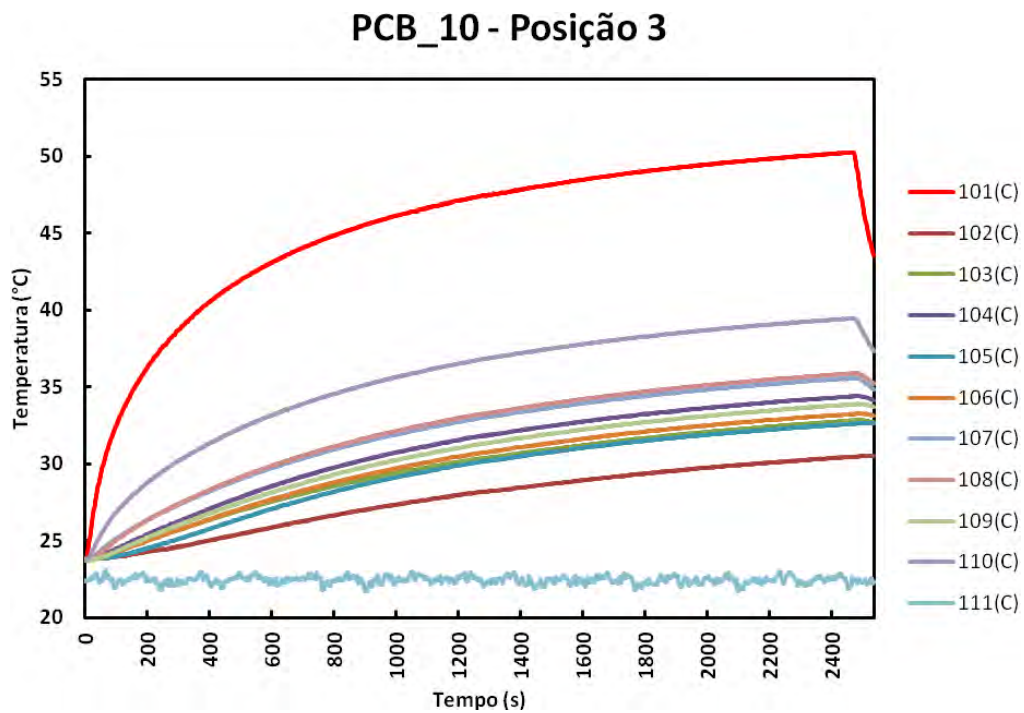


Figura D.30 – Curvas de temperatura da PCB\_10 com aquecedor na posição 3.

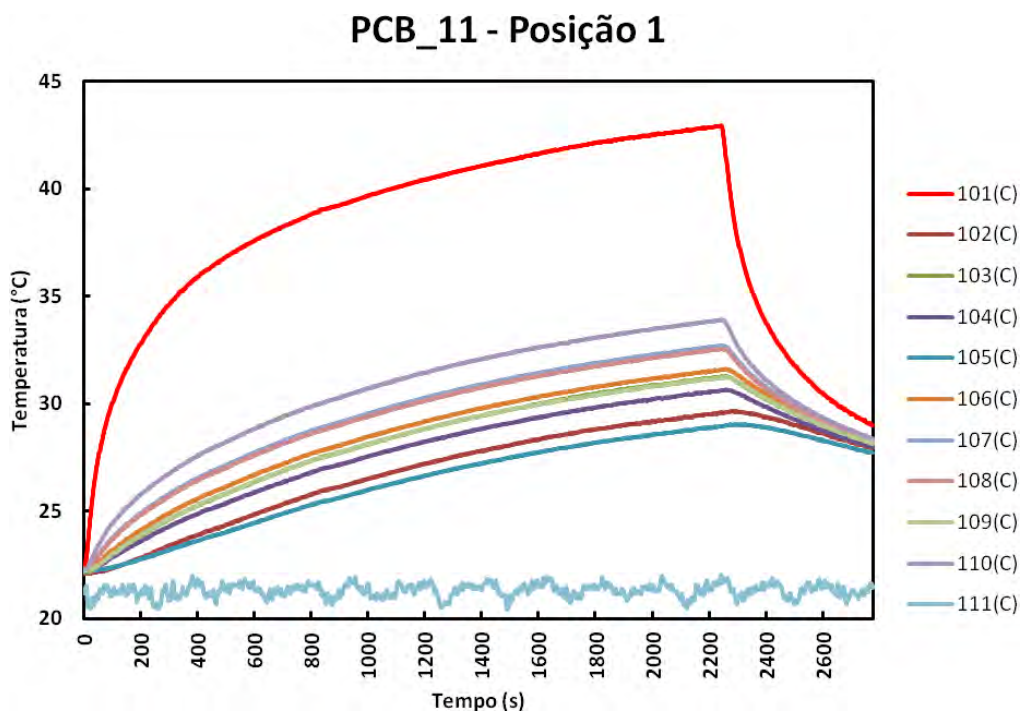


Figura D.31 - Curvas de temperatura da PCB\_11 com aquecedor na posição 1.

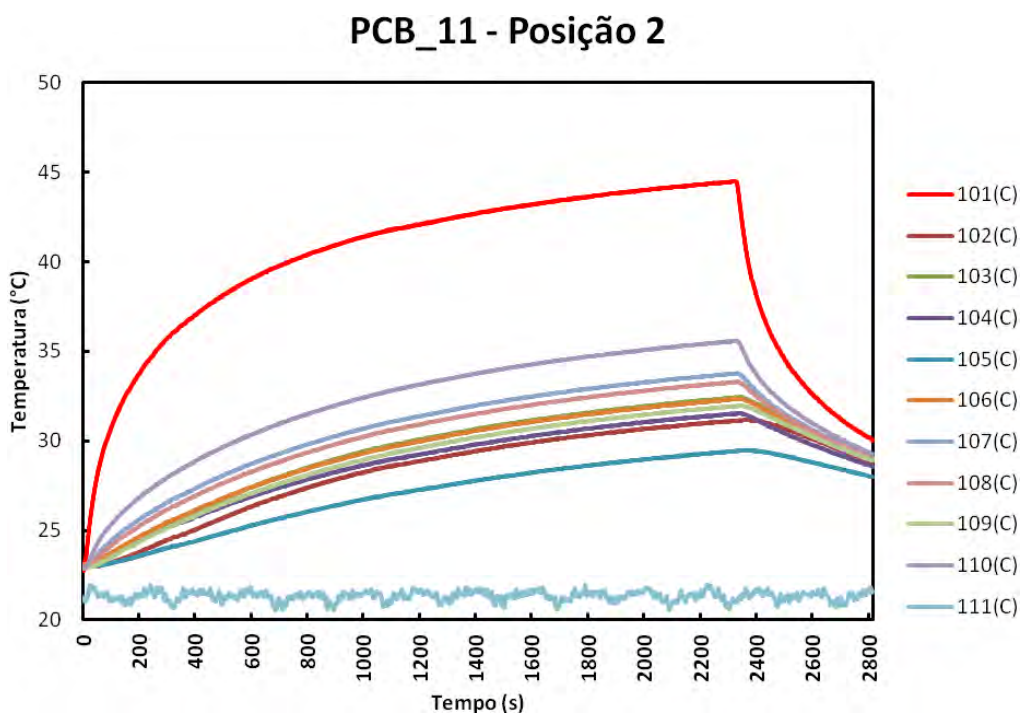


Figura D.32 - Curvas de temperatura da PCB\_11 com aquecedor na posição 2.

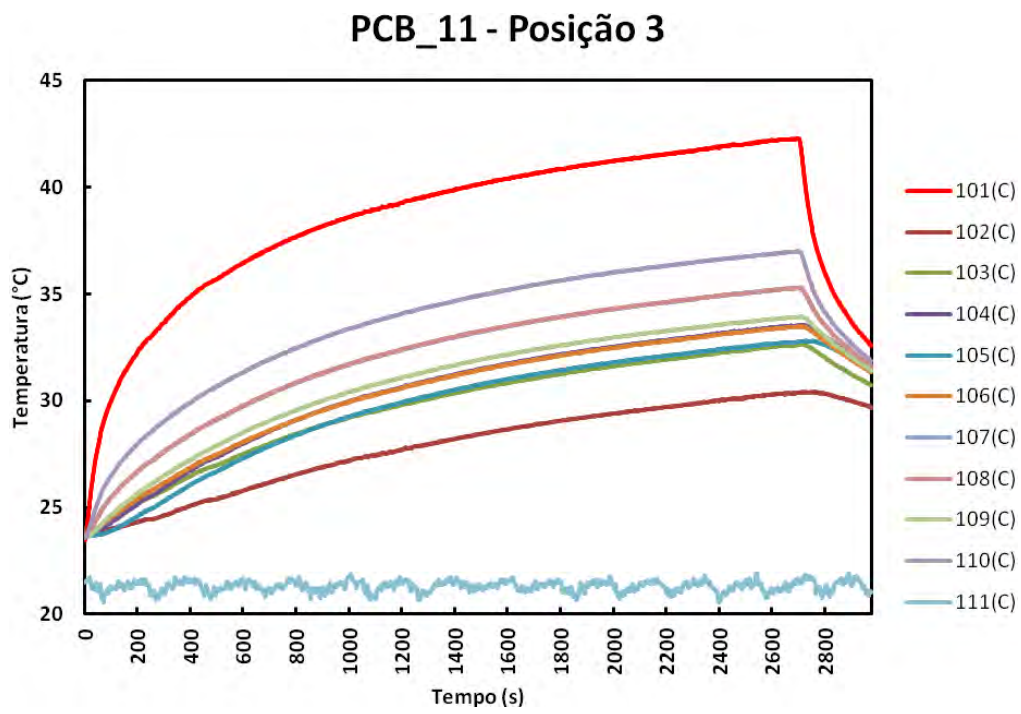


Figura D.33 - Curvas de temperatura da PCB\_11 com aquecedor na posição 3.

## **ANEXO A – PUBLICAÇÕES**

Aqui são mostrados os 3 trabalhos apresentados em eventos durante a execução da parte inicial desta pesquisa.

### **A.1 WETE 2011 – 2º Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais**

COSTA, R. L. ; Vlassov, V. V. . **Simulation Method for Effective Thermal Conductivity Determination of Complex Boards**. In: 2º Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais, 2011, São José dos Campos - SP. Anais do II WETE, 2011.

# SIMULATION METHOD FOR EFFECTIVE THERMAL CONDUCTIVITY DETERMINATION OF COMPLEX BOARDS

Rafael Lopes Costa<sup>1</sup> e Valeri Vlassov<sup>2</sup>

Space Mechanics and Control Division – DMC, National Institute for Space Research – INPE

São José dos Campos – SP, Brazil

<sup>1</sup>rcosta.engmec@gmail.com e <sup>2</sup>vlassov@dem.inpe.br

**Abstract:** Resistors, capacitors, transistors, and LEDs are components used in electronic systems, normally assembled to printed circuit boards – PCBs. Such components generate heat in operation which must be conducted away efficiently to frames where the board is fixed. The components operating temperatures depend on heat dissipation rate, mounting technology, component placement and finally effective thermal conductivity of the PCB. The temperature of some components may reach about 100° C while the PCB frame is kept at near-ambient constant temperature. The reliability of electronic components is directly related to operating temperature. Hence, a correct temperature prediction shall be provided by the thermal project of the board under the hottest operation conditions. The PCB effective thermal conductivity is a significant parameter which influences the component temperature and its determination for complex multi-layer PCBs is not a simple task. In space applications, the only way to spread and reject heat of electronic equipments is by thermal conduction once there is no air available to apply convection-based cooling systems such as heat sinks and fans. In this paper we present a simulation method used to determine the effective thermal conductivity of multi-layered boards. Such method uses a CAD based thermal model builder named SINDA/FLUINT Thermal Desktop and aims to determine the effective conductivity of a PCB by comparison between a detailed multi-layered anisotropic model and an equivalent homogeneous model. The method was applied for PCB-frame configurations typical for space applications. The simulation outcomes were compared to the values of effective conductivity obtained by analytical methods. Besides, a sensitivity analysis is performed on variations in component mounting technology and PCB layers placement. The results are discussed in a way of evaluation of applicability of existing methods and estimation of inherent uncertainty of PCB thermal effective conductivity determination.

**Keywords:** Effective thermal conductivity, PCB

## 1 Introduction

Excessive heat can damage electronic systems, since component parameter values usually vary with temperature and it is important not to exceed the designed temperature ranges. Above such temperatures, parts are no longer guaranteed to be within specification and perfect operation conditions. Thus thermal design can be considered a quite important aspect of a system's over design since components that generate a great amount of heat can reach excessive temperatures increasing the chances of failure. According to Carchia (1999), the most common methods to provide thermal control include: Heat sinks for components that give off a considerable amount of heat; Fans to improve airflow through enclosure; the use of a thermal conduction plane. Thermal conduction planes within printed circuits boards conduct heat away from generating components. In space applications, the only way to spread and reject heat of electronic equipments is by thermal conduction once there is no air available to apply the convection-based cooling systems mentioned above.

In this context, thermal modeling of heat conduction in multi-layered printed circuit boards is occasionally simplified by the use of effective thermal conductivity. Such parameter combines the influences of individual layer conductivities into a single value that can be applied as if the board had only one homogeneous layer where overall thickness and surface area are preserved. Some analytical methods have been proposed to calculate effective conductivity, where arithmetic mean, geometric mean and harmonic mean are among them. All of these methods are based on the cross-plane conductivity (series) and the in-plane conductivity (parallel) which are generally considered to be the lower and upper limits for the effective conductivity respectively. However, the published papers do not provide a clear definition how to calculate this value once the results are quite different between the

lower and upper limits. This paper aims to contribute on how to evaluate the effective thermal conductivity of a typical multilayer PCB for space application by direct numerical simulation.

## 2 Simulation Method

The method used to estimate the effective thermal conductivity of complex multi-layered boards is based on numerical simulations which uses the CAD based thermal model builder SINDA/FLUINT Thermal Desktop. It consists of modeling a complex and a simplified model that represent the same PCB and afterwards comparing them. The complex model is a multi-layered board wherein each of the layers has the same conductivity value as in the real PCB. On the other hand, the simplified model is a single-layered board, which thickness is obtained by summing the various layer thicknesses of the complex model, with a unique conductivity value called effective conductivity, Fig 1. The same boundary conditions and heat loads are applied both to the complex and simplified models.

Initially, we run the simulation for the complex model where the component (heat source) will reach certain temperature at the steady state. After that, we run the simulation for the simplified model and change the board's conductivity until the component reaches the same temperature as in the complex model. Therefore, this conductivity can represent the effective conductivity of the complex model.

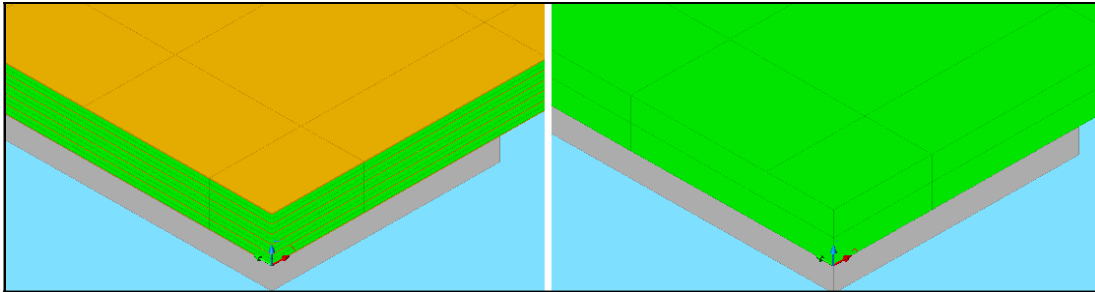


Figure 1. Complex multi-layer and simplified single-layer models.

## 3. PCB for Space Applications

The PCB sample used for the analysis was a 160 mm x 233.5 mm x 2 mm, consisted by 6 signal layers (conductive): top, GND, power, inner 1, inner 2 and bottom. Each layer has a certain covering percentage of copper (conductive traces) and a fiberglass reinforced epoxy (FR4) is used as a dielectric material between layers; photographs of the external surfaces are shown in Fig. 2.

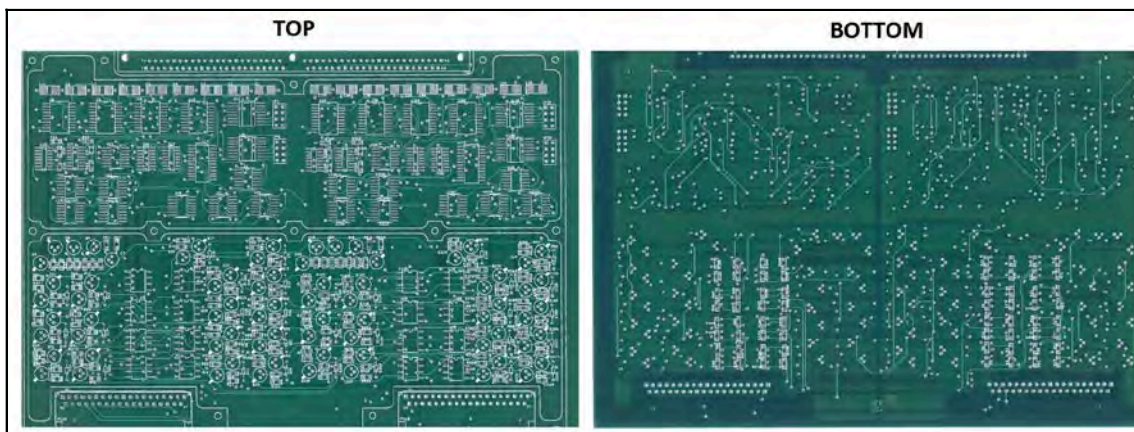


Figure 2. Multi-layered PCB for space applications (top/bottom photos).

From the board's project we can see the 6 signal layers in Fig. 3. We have estimated the copper coverage of each signal layer in order to apply a percentage factor over the copper conductivity in our model.

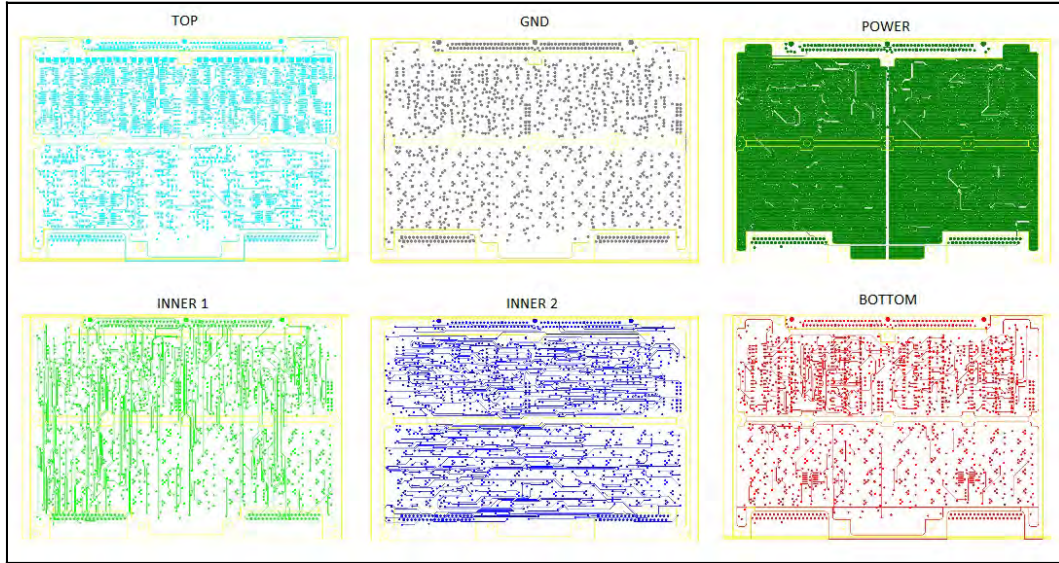


Figure 3. The 6 signal layers of the PCB.

Adopting the simulation method shown above, we created 2 equivalent models, a complex (11 layers) and a simplified one (1 layer). The only boundary condition imposed to the model was a 10 mm wide frame kept at constant temperature of 20° C, which was placed at the bottom surface with heat transfer coefficient of 400 W/m<sup>2</sup>K as contact condition. We tested several mesh configurations with gradual refining in order to get stable results that were achieved by setting 30 x 30 x 2 edge nodes for all board layers with 5000 W/m<sup>2</sup>K for the contact between them. Tab. 1 shows the layer composition of the complex model, the signal layers with conductive lines were treated as a homogeneous layer with an equivalent conductivity equal to copper conductivity (400 W/mK) multiplied by the percentage of copper covering area, which was roughly estimated based on the PCB's project.

Table 1. Complex model composition.

LAYER	MATERIAL	THICKNESS (mm)	CONDUCTIVITY (W/mK)
1 – top	Copper (7%)	0.035	28
2 – dielectric	FR4	0.358	0.25
3 – GND	Copper (95%)	0.035	380
4 – dielectric	FR4	0.358	0.25
5 – power	Copper (2%)	0.035	8
6 – dielectric	FR4	0.358	0.25
7 – inner 1	Copper (6%)	0.035	24
8 – dielectric	FR4	0.358	0.25
9 – inner 2	Copper (8%)	0.035	32
10 – dielectric	FR4	0.358	0.25
11 – bottom	Copper (5%)	0.035	20

For the heat load, a 2 W dissipating component was created in 3 size configurations: 10 x 8 mm, 20 x 8 mm and 20x16 mm with 2500 W/m<sup>2</sup>K for the contact with the top board surface. Such component was placed in 13 different positions as presented in Tab. 2. Two frames represented in the model as solid bars with fixed temperature are placed at left and right edges of the PCB.

Table 2. Component position coordinates with the PCB's lower left corner as the origin (0,0).

Position	x (m)	y (m)
1	0.0430	0.1180
2	0.1075	0.1180
3	0.1720	0.1180
4	0.0430	0.0790
5	0.1075	0.0790
6	0.1720	0.0790
7	0.0430	0.0400
8	0.1075	0.0400
9	0.1720	0.0400
10	0.0753	0.1010
11	0.1401	0.1010
12	0.0753	0.0620
13	0.1401	0.0620

#### 4. Simulations Results

We run the simulation for the 13 positioning cases changing the component size three times, which generated the results for effective conductivity mean for each component position and its standard deviation, presented in Tab. 3.

Table 3. Effective conductivity mean and its standard deviation for each component placement.

Position	Mean (W/mK)	SD
1	7.482	0.211
2	8.087	0.151
3	7.452	0.210
4	7.550	0.378
5	8.066	0.288
6	7.497	0.342
7	7.530	0.350
8	8.107	0.270
9	7.489	0.329
10	7.868	0.219
11	7.998	0.154
12	7.862	0.222
13	7.995	0.155

This results in an overall mean and standard deviation of 7.768 W/mK and 0.340 respectively. In order to get aware of any tendencies of our data, we have placed the origin of the system at the board's center and plotted the effective conductivity mean against the component's horizontal position (x axis), thereby generating the chart presented in Fig. 4.



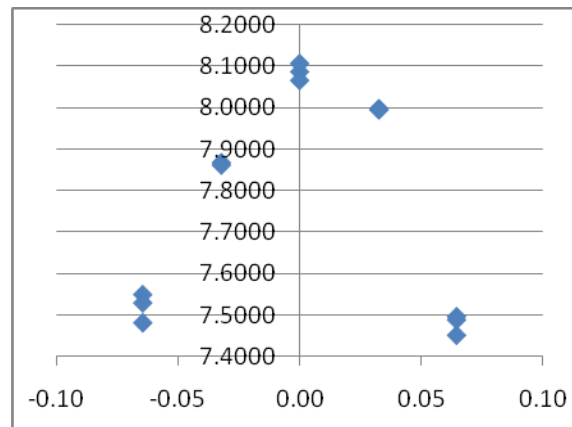


Figure 4. Effective conductivity mean against the horizontal position of the component

By visually analyzing the chart above, we can clearly see that the effective conductivity mean has a certain decreasing tendency as further away the component is placed from the center.

## 5. Conclusion

The PCB effective thermal conductivity was obtained by direct simulation used the CAD based thermal model tool SINDA/FLUINT Thermal Desktop. For the real 6-layer PCB the average value is 7.768 W/mK and 0.340 as standard deviation, that lies between the limits of the in-plane and arithmetic mean simplified analytical models.

A tendency was observed by plotting the results of each positioning case; the effective thermal conductivity tends to decrease as further away the component is placed from the center, which means that the estimated effective conductivity is minor as the component approaches the frame. That is probably happening because when the component is close the frame which is kept at 20° C, the conductivity is a less important parameter for the steady state component's temperature, and as described above, the simulation method is based on the component's temperature at the steady state.

For future work, more simulation cases will be needed to better understanding how the effective conductivity behaves along the board and to have more data, which would allow us to statistically analyze the effective conductivity on multi-layer boards with higher accuracy. The experimental validation of the present method is also under way.

## Acknowledgments

The authors would like to thank the financial support of Brazilian CAPES organization as well as the Space Mechanics and Control Division – DMC of the National Institute for Space Research -INPE .

## References

- Lancaster, P. and Šalkauskas, K. Curve and Surface Fitting: An Introduction. London: Academic Press, 1986.
- Rensburg, Ralph., 2001. Thermal Design of Electronic Equipment. Ed. CRC Press LLC, 2001
- Carchia, M., 1999. "Electronic/Electrical Reliability", Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, USA.

## **A.2 DINCON 2011 – 10ª Conferência Brasileira de Dinâmica, Controle e Aplicações**

**COSTA, R. L. ; Vlassov, V. V. ; KUGA, H. K. . Statistical Analysis of Thermal Conductivity Distribution Over Electronic Boards Based on Simulations.**

In: X Conferência Brasileira de Dinâmica, Controle e Aplicações - DINCON 2011, Águas de Lindóia - SP. Anais DINCON, 2011.

# STATISTICAL ANALYSIS OF THERMAL CONDUCTIVITY DISTRIBUTION OVER ELECTRONIC BOARDS BASED ON SIMULATIONS

*Rafael Lopes Costa*<sup>1</sup>, *Valeri Vlassov*<sup>2</sup>, *Hélio Koiti Kuga*<sup>3</sup>

<sup>1</sup>CMC/INPE, São José dos Campos – SP, Brazil, rcosta.engmec@gmail.com

<sup>2</sup>DMC/INPE, São José dos Campos – SP, Brazil, vlassov@dem.inpe.br

<sup>3</sup>DMC/INPE, São José dos Campos – SP, Brazil, hkk@dem.inpe.br

**Abstract:** The paper presents a simulation method used to estimate the parameter called effective thermal conductivity of multi-layer PCBs. We have applied the method in a board characteristic for space applications afterwards performing a statistical analysis of the results in order to observe tendencies.

**Keywords:** Effective thermal conductivity, PCB, engineering applications.

## 1. INTRODUCTION

Excessive heat can damage electronic systems, since component parameter values usually vary with temperature and it is important not to exceed the manufacture's temperature range. Above such temperatures, parts are no longer guaranteed to behave within specification. Thus thermal design can be an important aspect of a system's overall design, [1]. Components generate heat in operation and can reach excessive temperatures. According to [2], the most common methods to provide thermal control include: Heat sinks for components that give off a considerable amount of heat; Fans to improve airflow through enclosure; or the use of a thermal conduction plane. Thermal conduction planes within printed circuits boards conduct heat away from generating components. In space applications, the only way to spread and reject heat of electronic equipments is by thermal conduction once there is no air available to apply the convection-based cooling systems mentioned above.

In this context, thermal modeling of heat conduction in multi-layer printed circuit boards is occasionally simplified by the use of effective conductivity. Such parameter combines the influences of individual layer conductivities into a single value that can be applied as if the board had only one homogeneous layer where overall thickness and surface area are preserved, [3]. Several methods have been proposed for calculating effective conductivity, including the cross-plane conductivity (series) and the in-plane conductivity (parallel), which are generally considered to be the lower and upper limits for effective conductivity.

## 2. CALCULATION METHOD

In order to estimate the effective conductivity of multi-layer boards we present a method based on numerical simulations which uses the CAD based thermal model builder SINDA/FLUINT Thermal Desktop.

The method consists of creating a conjugate pair of a complex and a simplified model that represent the same PCB layout and afterwards comparing them. The complex model is a multi-layer board wherein each of the layers has the same conductivity value as in the real PCB. Each signal layer with conductive traces is treated as a homogeneous layer with an equivalent conductivity equal to the copper conductivity multiplied by the percentage of covering area with electric conductive lines. The covering percentage was estimated visually based on a CAD design of the PCB.

On the other hand, the simplified model is a single-layer board, which thickness is obtained by summing the various layer thicknesses of the complex model, with a unique conductivity value called effective conductivity. The same boundary conditions and heat loads are applied both to the complex and simplified models, Fig. 1.

Initially, we run the simulation for the complex model where the component (heat source) will reach certain temperature at the steady state. After that, we run several simulations for the simplified model modifying the board's conductivity until the component reaches the same temperature as in the complex model. Therefore, this conductivity can represent the effective conductivity of the complex model.

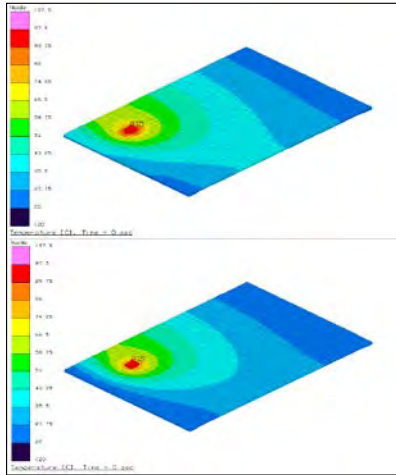


Figure 1. Complex and simplified models showing the simulation results.

### 3. PCB FOR SPACE APPLICATIONS AND ITS MODELING

The PCB sample used was a 160 mm x 233.5 mm x 2 mm, consisting of 6 signal layers (conductive): top, GND, power, inner 1, inner 2 and bottom. Each layer has a certain percentage of copper and a fiberglass reinforced epoxy (FR4) used as a dielectric material between layers; photographs of the PCB are shown in Fig. 2.

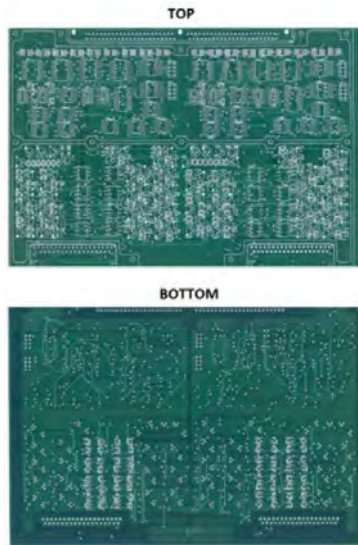


Figure 2. Multi-layered PCB for space applications (top/bottom photos).

From the board's project we can see the 6 signal layers in Fig. 3. We have estimated the copper coverage of each

signal layer by visual observation in order to apply a percentage factor over the copper conductivity in our model.

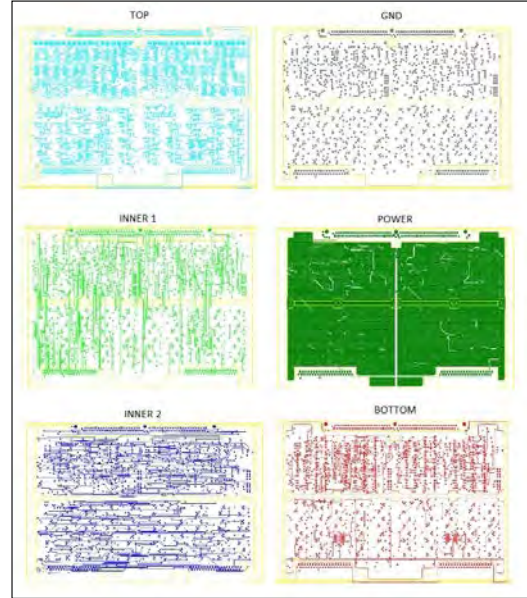


Figure 3. The 6 signal layers of the PCB.

As we had done previously, we created 2 equivalent models, a complex (11 layers) and a simplified (single layer) with no convection along the board simulating the absence of air in space. The only boundary condition imposed to the model was a 10 mm wide frame kept at constant temperature of 20° C, which was placed at the bottom surface with 400 W/m<sup>2</sup>K as contact condition. We tested several mesh configurations in order to get stable results that were achieved by setting 30 x 30 x 2 edge nodes for all board layers with 5000 W/m<sup>2</sup>K for the contact between them. Tab. 3 shows the layer composition of the complex model, the signal layers with conductive lines were treated as a homogeneous layer with an equivalent conductivity equal to copper conductivity (400 W/mK) multiplied by the percentage of copper covering area, which was visually estimated based on the PCB's project.

Table 3. Complex model composition.

LAYER	MATERIAL	THICKNESS (mm)	CONDUCTIVITY (W/mK)
1 – top	Copper (7%)	0.035	28
2 – dielectric	FR4	0.358	0.25
3 – GND	Copper (95%)	0.035	380
4 – dielectric	FR4	0.358	0.25
5 – power	Copper (2%)	0.035	8
6 – dielectric	FR4	0.358	0.25
7 – inner 1	Copper (6%)	0.035	24
8 – dielectric	FR4	0.358	0.25
9 – inner 2	Copper (8%)	0.035	32
10 – dielectric	FR4	0.358	0.25
11 – bottom	Copper (5%)	0.035	20

For the heat load, a 2 W dissipating component was created in 3 size configurations: 10 x 8 mm, 20 x 8 mm and 20x16 mm with 2500 W/m<sup>2</sup>K for the contact with the top board surface. Such component has been placed in 13 different locations; the positioning coordinates are presented at Tab. 2.

**Table 2. Component position coordinates with the PCB's lower left corner as the origin (0,0).**

Position	x (m)	y (m)
1	0.0430	0.1180
2	0.1075	0.1180
3	0.1720	0.1180
4	0.0430	0.0790
5	0.1075	0.0790
6	0.1720	0.0790
7	0.0430	0.0400
8	0.1075	0.0400
9	0.1720	0.0400
10	0.0753	0.1010
11	0.1401	0.1010
12	0.0753	0.0620
13	0.1401	0.0620

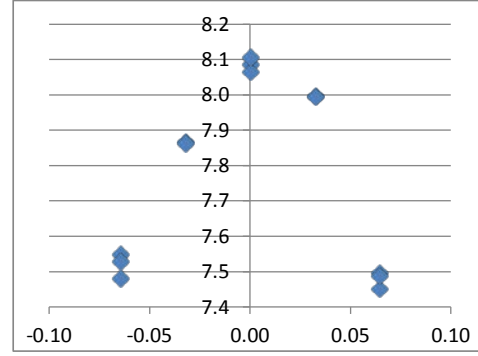
#### 4. STATISTICAL ANALYSIS OF THE RESULTS

We run the simulation for the 13 positioning cases changing the component size three times, which generated the results for effective conductivity mean for each component position and its standard deviation, presented at Tab. 3

**Table 3. Effective conductivity mean and its standard deviation for each component placement.**

Position	Mean (W/mK)	SD
1	7.482	0.211
2	8.087	0.151
3	7.452	0.210
4	7.550	0.378
5	8.066	0.288
6	7.497	0.342
7	7.530	0.350
8	8.107	0.270
9	7.489	0.329
10	7.868	0.219
11	7.998	0.154
12	7.862	0.222
13	7.995	0.155

In order to get aware of any tendencies in our data, and afterwards try to fit it into a certain type function, we have placed the origin of the system at the board's center and plotted the effective conductivity mean against the component's horizontal position (x axis), thereby generating the chart presented in Fig. 4.



**Figure 4. Effective conductivity mean against the horizontal position of the component.**

By visually analyzing the chart above, we can clearly see that the effective conductivity mean has a certain decreasing tendency as far the component is placed from the center.

The weighted least squares method was applied in order to fit the data into a function. Such method is used for finding the best-fitting curve to a given set of points by minimizing the sum of the squares of the offsets ("the residuals") of the points from the curve, [4]. The sum of the squares of the offsets is used instead of the offset absolute values because this allows the residuals to be treated as a continuous differentiable quantity.

Also, the standard deviations of Tab. 5 were used to weight the mean effective thermal conductivity of the 13 positions.

Initially we tried to fit our data into a quadratic function that would generate a parabola, but a substantial error was found preventing such function to be applied.

Then we tried to adjust the data into a cubic function, modeled as the Eq. 1, generating the coefficients and their errors (from the covariance matrix) in Tab. 4.

$$z = ax^3 + bx^2 + cx + d + ey \quad (1)$$

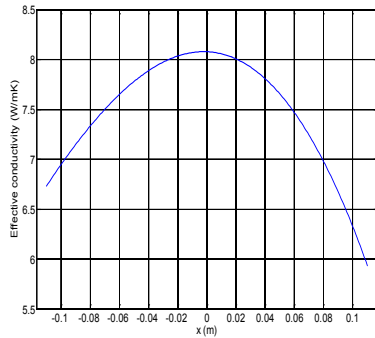
**Table 4. Coefficients and error extracted from the least squares resulting covariance matrix.**

Coefficient	Standard Deviation
-248.3290	1.0758
-144.1046	0.0376
-0.6223	0.0040
8.0781	0.0001
-0.1443	0.0021

By substituting the coefficients above in Eq. 1 we have the Eq. 2 as follows.

$$z = -248.3290x^3 - 144.1046x^2 - 0.6223x + 8.0781 - 0.1443y + 8.0781 - 0.1443y \quad (2)$$

Fig. 5 shows the curve fitted to represent the mean effective thermal conductivity as function of horizontal position.



**Figure 5. Fitted effective thermal conductivity mean against horizontal position.**

## 5. CONCLUSION

We presented a simulation method used to determine the effective thermal conductivity of complex multi-layer boards. A printed circuit board typical for space applications was used as an example of the method applicability.

Based on the results presented above, we could clearly note that the effective thermal conductivity has a decreasing tendency as further the component is placed from the center of the board. The weighted least squares method was applied to our data in order to fit the data into a bi-dimensional cubic function.

Initially, because of the model's symmetry, it was expected to fit the data into a square function, but a great error was generated probably due to the small number of points and maybe some model inaccuracy. The cubic fit gave the desired results with accuracy.

The approach looks promising for simplifying the thermal analysis and design of electronics, in particular for space applications.

For future work, more simulation cases will be needed to better understanding how the effective thermal conductivity behaves along the board and to have more data, which would allow us to statistically analyze the effective conductivity on multi-layer boards with higher accuracy. The experimental validation of the present method is also under way.

### **A.3 COBEM 2011 – 21<sup>st</sup> International Congress of Mechanical Engineering**

COSTA, R. L. ; Vlassov, V. V. . **Effective Thermal Conductivity**

**Determination of Multi-Layered Printed Circuit Boards For Space**

**Applications.** In: 21st International Congress of Mechanical Engineering, 2011, Natal - RN. Anais COBEM, 2011.

# EFFECTIVE THERMAL CONDUCTIVITY DETERMINATION OF MULTI-LAYERED PRINTED CIRCUIT BOARDS FOR SPACE APPLICATIONS

Rafael Lopes Costa, [rcosta.engmec@gmail.com](mailto:rcosta.engmec@gmail.com)

Valeri Vlassov, [vlassov@dem.inpe.br](mailto:vlassov@dem.inpe.br)

National Institute for Space Research – INPE, São José dos Campos – SP, Brazil

**Abstract.** *Electronic components are normally assembled to printed circuit boards – PCBs. Such components generate heat in operation which must be conducted away efficiently from the small areas to frames where PCB is fixed. The temperature of the components depends on heat dissipation rate, technology and parameters of mounting, component placement and finally effective conductivity of the PCB. The temperature of some components may reach significant magnitudes of order of  $\sim 100^\circ\text{C}$  while the PCB frame is kept at near-ambient temperature. The reliability of electronic components is directly related to operating temperature; therefore the thermal project of PCB should provide correct temperature prediction of all PCB components under hottest operation condition. The PCB effective thermal conductivity is an important parameter having sensitive influence on component temperatures; its determination for complex multi-layer PCBs is not a trivial task. In space applications, the only way to spread and reject heat of electronic equipments is by thermal conduction once there is no air available to apply convection-based cooling systems such as heat sinks and fans. In this paper we present a survey on PCBs effective conductivity determination methods available in the literature as well as a simulation of a multi-layered PCB in order to compare the methods. The simulation uses a CAD based thermal model builder named SINDA/FLUINT Thermal Desktop and aims to determine the effective conductivity of a PCB by comparison between a detailed multi-layered anisotropic model and an equivalent homogeneous model. The model is validated using available data for two-layered FR4-copper PCB. Afterwards, simulations are performed for some PCB-frame configurations typical for space applications. The simulation outcomes are compared to the values of effective conductivity obtained by other methods. Besides, a sensitivity analysis is performed on variations in component mounting technology and PCB layers placement. Normal distribution of the effective conductivity is obtained for a 6 signal layers PCB. The results are discussed in a way of evaluation of applicability of existing methods and estimation of inherent uncertainty of PCB thermal effective conductivity determination.*

**Keywords:** *Effective thermal conductivity, PCB, Space application*

## 1. INTRODUCTION

The overall trends in electronic equipment development for space applications are the miniaturization of electronic components, the increase of heat dissipation per component and density of component mounting in Printed Circuit Boards (PCB) and finally, the increase of PCB number in electronic equipment boxes.

Dissipated heat in each component causes its own temperature to rise. Depending on thermal conditions that the component is exposed, it may reach significant temperature of  $\sim 100^\circ\text{C}$  while the PCB frame is kept at near-ambient temperature. Such high temperature exposure can damage electronic systems in different ways. First, the electronic components may simply be burnt-out once the functional temperature limit is exceeded. Second, component parameter values usually vary with temperature and it is important not to exceed the manufacture's temperature range defined as operational limits. Above such temperatures, the components are no longer guaranteed to be within specification, Carchia (1999). Finally, the reliability of electronic components is tremendously related to operating temperature, and according Remsburg (2001) component failure rate is increased exponentially with temperature rise even within the operational limits. Thus thermal project of the electronic equipment is an important aspect of a system's overall design, in order to ensure that the electronic components will not violate established temperature limits and will have their operational temperature as low as possible.

It underlines the importance of an accurate thermal analysis through the design process of electronics. Printed circuit board (PCB) is a basic element of electronic equipments, and a correct prediction of temperature distribution over its area provides the necessary information for temperature evaluation of each component mounted on the PCB. In space applications, the only way to spread and reject heat of electronic equipments is by thermal conduction over the board once there is no air available to apply the convection-based cooling systems.

In equipment and instruments for space application, PCBs are often assembled in a package where they are fitted through the perimeter to a structural frame. The frames are mounted in the equipment case in such a way that provides a good thermal contact with the equipment base, or thermal-mechanical interface. Finally, the equipment is bolted to satellite structural panel, which temperature should be maintained by the satellite thermal control subsystem. The frame structure provides a thermal conductive path from dissipating components to the equipment base surface acting as a local heat sink for each PCB, therefore, the temperature distribution over the PCB area can be analyzed



separately, considering fixed frame temperature as a boundary condition. Once we have the temperature map over PCB, particular temperatures of each component can be easily obtained by local thermal balance.

Temperature over the component mounting area is strongly dependent on its thermophysical properties. The PCB is usually manufactured in FR4 with thermal conductivity about 0.4 W/mK, what is considered to be low. However the conductive traces made of deposited copper contribute on in-plane thermal conductivity, assisting in heat spreading from hot areas below dissipating components. In the past PCBs used to have one or two signal layers, but nowadays modern technologies have allowed the production of complex PCBs that have several intermediate conductive layers. Such arrangement makes thermal properties of those PCBs strongly anisotropic.

The temperature map over the PCB can be obtained using numerical methods available through many commercial softwares such as ANSYS Iceboard (former TASPCB), HyperLynx Thermal (Former BETAsoft), FLOTHERM.PCB, SINDA/FLUINT Thermal Desktop, ESATAN and others, or even by analytical methods, Culham et al. (2000), Vlassov (2003)

However all of the methods are based on the supposition that the multi-layer PCB can be thermally represented by an equivalent homogeneous plate with certain effective thermal conductivity. It is suggested that such homogeneous plate with effective thermal conductivity calculated in a correct way, provides the same thermal effect as a real multi-layer PCB with anisotropic properties.

In this context, thermal modeling of heat conduction in multi-layer printed circuit boards is occasionally simplified by using the effective conductivity concept. Such parameter combines the influences of individual layer conductivities into a single value that can be applied as if the board had only one homogeneous layer where overall thickness and surface area are preserved. Some analytical methods have been proposed to calculate effective conductivity, where arithmetic mean, geometric mean and harmonic mean are among them. All of these methods are based on the cross-plane conductivity (series) and the in-plane conductivity (parallel) are generally considered to be the lower and upper limits for the effective conductivity respectively, and the difference between their values can reach 10 times. However, the published papers do not provide a clear definition how to calculate this value once the results are quite different between the lower and upper limits. This paper aims to contribute on how to evaluate the effective conductivity of a typical multilayer PCB for space application by direct numerical simulation.

## 2. EFFECTIVE CONDUCTIVITY DETERMINATION METHOD AND ITS VALIDATION

In order to estimate the effective conductivity of multi-layer boards we present a method based on numerical simulations which uses the CAD based thermal model builder SINDA/FLUINT Thermal Desktop.

The method consists of creating a conjugate pair of a complex and a simplified model that represent the same PCB layout and afterwards comparing them. The complex model is a multi-layer board wherein each of the layers has the same conductivity value as in the real PCB. Each signal layer with conductive traces is treated as a homogeneous layer with an equivalent conductivity equal to copper conductivity factored by percentage of covering area with electric conductive lines. The covering percentage was estimated visually based on a CAD design of the PCB.

On the other hand, the simplified model is a single-layer board, which thickness is obtained by summing the various layer thicknesses of the complex model, with a unique conductivity value called effective conductivity. The same boundary conditions and heat loads are applied both to the complex and simplified models.

Initially, we run the simulation for the complex model where the component (heat source) will reach certain temperature at the steady state. After that, we run several simulations for the simplified model modifying the board's conductivity until the component reaches the same temperature as in the complex model. Therefore, this conductivity can represent the effective conductivity of the complex model.

The basic approach of the method and model validation process was to reproduce the cases of study developed by Culham et al. (2000). Such study consisted of determining the effective conductivity of a 50 mm x 50 mm x 1.6501 mm board with 2 signal layers (copper – 400 W/mK) and 3 dielectric layers (FR4 – 0.4 W/mK). A 25 mm x 25 mm heat source was placed on the top surface, with 2.5 W of heat dissipation. A convective boundary condition of 5W/m<sup>2</sup>K was imposed on the top and bottom surfaces (not on the heat source), which is a simplified representation of the natural convection cooling conditions in ambient air.

In that study, aiming to calculate the effective conductivity of the cases they have used a web tool which calculates based both on bulk material resistance and spreading resistance, using analytical solution.

The number and thickness of copper and FR4 layers were preserved but the layer placement was varied for 5 different test cases, as described in Tab. 1.

Table 1. Material and thickness for layer position study (dimensions in mm).

Layer	Case				
	1	2	3	4	5
1	Copper 0.0356	Copper 0.0356	FR4 0.5263	FR4 0.5263	FR4 0.5263
2	Copper 0.0356	FR4 0.5263	Copper 0.0356	Copper 0.0356	FR4 0.5263
3	FR4 0.5263	FR4 0.5263	FR4 0.5263	Copper 0.0356	FR4 0.5263
4	FR4 0.5263	FR4 0.5263	Copper 0.0356	FR4 0.5263	Copper 0.0356
5	FR4 0.5263	Copper 0.0356	FR4 0.5263	FR4 0.5263	Copper 0.0356

For the validation, the 5 test cases were reproduced using SINDA/FLUINT Thermal Desktop by applying the simulation method described above.

We created 2 models, a complex one (5 layers) and a simplified one (1 layer), applying the same conditions as described on the study. We have created a mesh of 10 x 10 x 2 edge nodes for the board in both models and kept the component as a single node. In Table 2 we can see the difference between the results of effective conductivity determined by the methods. Simplified and complex models are shown in Fig. 1 with the simulation results obtained by using SINDA/FLUINT Thermal Desktop for the first case.

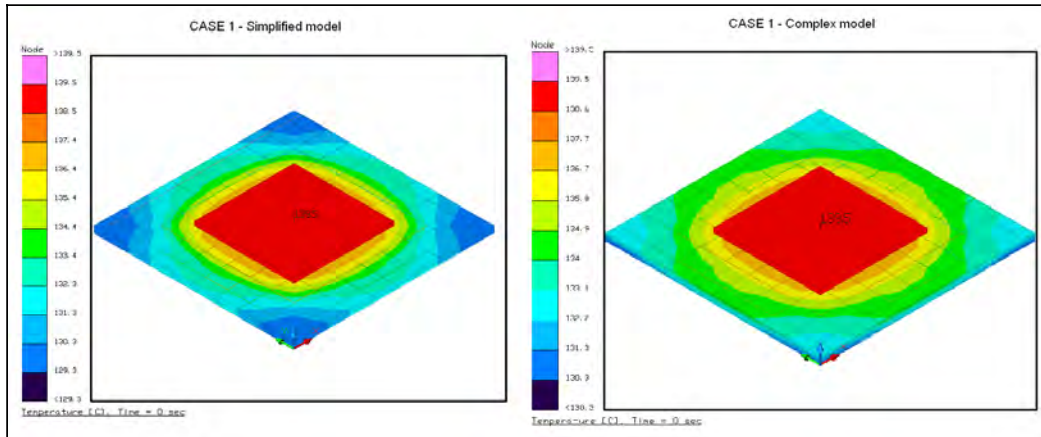


Figure 1. Simplified and complex models showing the temperature map obtained after the simulation.

As we can see in Tab. 2, there is a tendency of the values calculated by the simulation method to be lower than the values that had been calculated using the analytical method, but preserving almost the same variation and following the same decreasing order. We suppose the simulation method is more precise due to we used direct numerical simulation making no assumptions like in the analytical approach.

Table 2. Effective conductivities found by analytical and simulation methods.

Case	Analytical method results for effective conductivities (W/mK) (Culham et al., 2000 )	Simulation method results for effective conductivities (W/mK)	Variation (%)
1	15	10.1	32.67
2	11.5	8.3	27.83
3	8.5	5.85	31.18
4	7.5	6.25	16.67
5	5	3.55	29.00

### 3. PCB FOR SPACE APPLICATIONS

The PCB sample used for the analysis was a 160 mm x 233.5 mm x 2 mm, consisted by 6 signal layers (conductive): top, GND, power, inner 1, inner 2 and bottom. Each layer has a certain percentage of copper and a fiberglass reinforced epoxy (FR4) is used as a dielectric material between layers; photographs of the PCB are shown in Fig. 2.

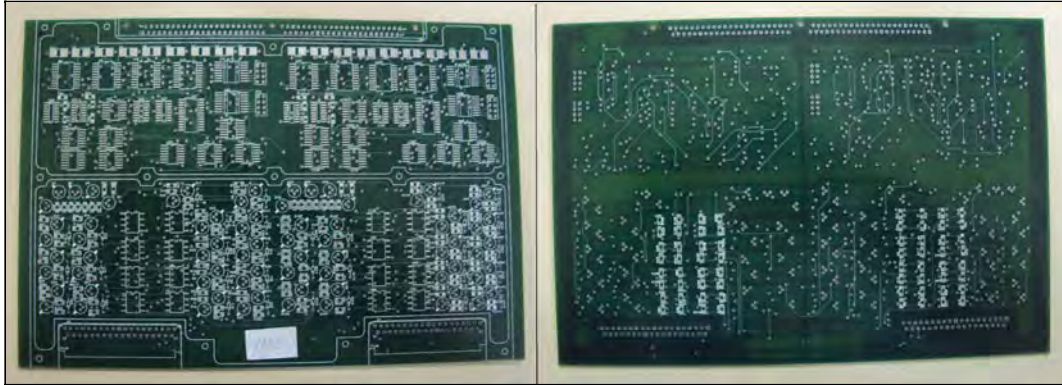


Figure 2. Multi-layered PCB for space applications (top/bottom photos).

From the board's project we can see the 6 signal layers in Fig. 3. We have estimated the copper coverage of each signal layer in order to apply a percentage factor over the copper conductivity in our model.

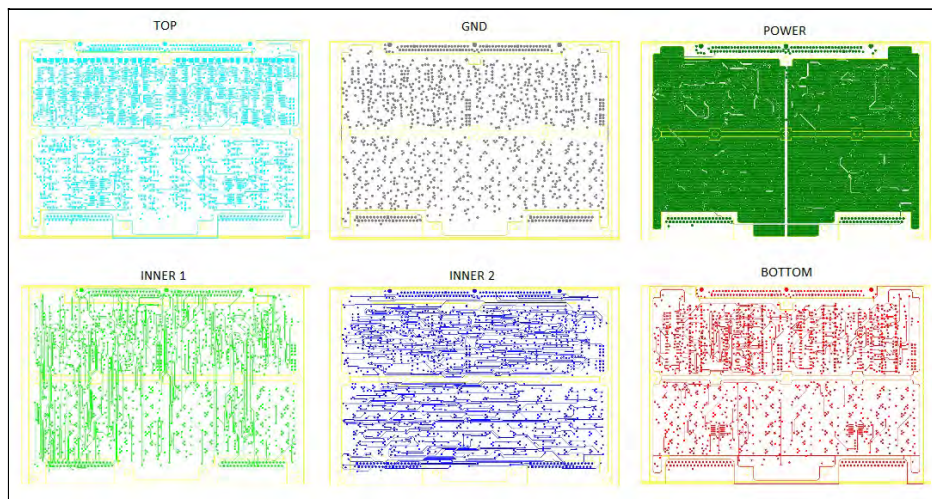


Figure 3. The 6 signal layers of the PCB.

As we had done previously, we created 2 equivalent models, a complex (11 layers) and a simplified (1 layer). The only boundary condition imposed to the model was a 10 mm wide frame kept at constant temperature of 20° C, which was placed at the bottom surface with heat transfer coefficient of 400 W/m<sup>2</sup>K as contact condition. We tested several mesh configurations with gradual refining in order to get stable results that were achieved by setting 30 x 30 x 2 edge nodes for all board layers with 5000 W/m<sup>2</sup>K for the contact between them. Tab. 3 shows the layer composition of the complex model, the signal layers with conductive lines were treated as a homogeneous layer with an equivalent conductivity equal to copper conductivity (400 W/mK) multiplied by the percentage of copper covering area, which was roughly estimated based on the PCB's project.

Table 3. Complex model composition.

LAYER	MATERIAL	THICKNESS (mm)	CONDUCTIVITY (W/mK)
1 – top	Copper (7%)	0.035	28
2 – dielectric	FR4	0.358	0.25
3 – GND	Copper (95%)	0.035	380
4 – dielectric	FR4	0.358	0.25
5 – power	Copper (2%)	0.035	8
6 – dielectric	FR4	0.358	0.25
7 – inner 1	Copper (6%)	0.035	24
8 – dielectric	FR4	0.358	0.25
9 – inner 2	Copper (8%)	0.035	32
10 – dielectric	FR4	0.358	0.25
11 – bottom	Copper (5%)	0.035	20

For the heat load, a 2 W dissipating component was created in 3 size configurations: 10 x 8 mm, 20 x 8 mm and 20x16 mm with 2500 W/m<sup>2</sup>K for the contact with the top board surface. Such component was placed in 4 different positions as presented in Fig. 4. Two frames represented in the model as solid bars with fixed temperature are placed at left and right edges of the PCB.

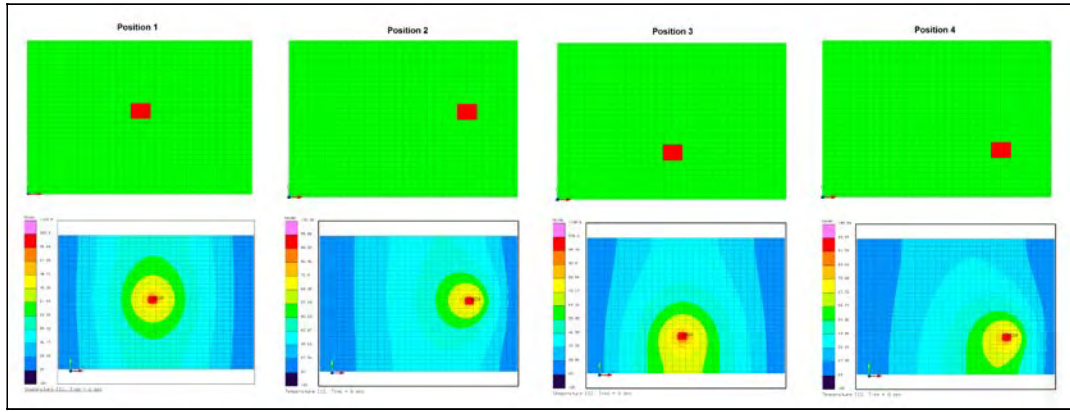


Figure 4. The 4 different locations for the dissipating component and the simulation results.

#### 4. PCB MODEL AND UNCERTANTIES OF NUMERICAL SIMULATION

The SINDA/FLUINT Thermal Desktop tool performs numerical solution with afterward graphic representation of a system of energy conservation equation defined for the given PCB model. The core equation is 2D conductive heat transfer one applied along each PCB layer area, complicated with conjugate heat exchange with near-closest layers. In the domain of 11 layers depicted in Tab. 3, the system of equation can be presented as follows:

$$\delta_1 k_1 \frac{\partial^2 T_1(x, y)}{\partial x^2} + \delta_1 k_1 \frac{\partial^2 T_1(x, y)}{\partial y^2} + \sum_{j=1}^N g_{ej} (T_j - T_1(x, y)) + g_{1,2} (T_2(x, y) - T_1(x, y)) = 0 \quad (1)$$

...

$$\delta_i k_i \frac{\partial^2 T_i(x, y)}{\partial x^2} + \delta_i k_i \frac{\partial^2 T_i(x, y)}{\partial y^2} + g_{i,i+1} (T_{i+1}(x, y) - T_i(x, y)) + g_{i,i-1} (T_{i-1}(x, y) - T_i(x, y)) = 0 \quad (2)$$

....

$$\delta_{11} k_{11} \frac{\partial^2 T_{11}(x, y)}{\partial x^2} + \delta_{11} k_{11} \frac{\partial^2 T_{11}(x, y)}{\partial y^2} + g_{10,11} (T_{10}(x, y) - T_{11}(x, y)) + g_{f,11} (T_f - T_{11}(x, y)) = 0 \quad (3)$$

Where: i runs 2 to 10;

$j$  (1 to  $N$ ) is the number of electronic component mounted on the top layer (for the Fig. 4 layout  $N=1$ );  
 $g_{cj}$  – is the heat transfer coefficient between mounted component and PCB;  
 $g_{i,i+1}$  – is the heat transfer coefficient between internal PCM layers;  
 $g_{f,11}$  – is the heat transfer coefficient between frame and bottom PCM layer;  
 $\delta_i$  – is the thickness of  $i$ -th PCB layer  
 $T_f$  – is fixed temperature of the frame where the PCB is mounted.

Along the PCB perimeter, the boundary conditions correspond to heat insulation conditions:

$$\frac{\partial T_i(x, y)}{\partial x} = \frac{\partial T_i(x, y)}{\partial y} = 0 \quad \text{- on PCB edges} \quad (4)$$

The system (1-3) is completed with local balances of component dissipations:

$$Q_j = A_j g_{cj} (T_j - T_1(x, y)) \quad (5)$$

Where  $A_j$  is the area of the  $j$ -th component.

In general case the system (1-4) can be presented as 3D system considering that each layer can be divided in sub-layer in orthogonal, i.e.  $z$ -direction.

Several numerical examinations were carried out in order to define optimal numerical mesh size and correct numerical representation of the PCM layout. We followed general approach based on gradual refining of numerical mesh until the solution becomes invariant to further reductions in grid spacing. By this way we achieved the numerical mesh of  $30 \times 30 \times 2$  for each layer. During the examinations we observed several numerical effects which could cause distortional results if treated incorrectly. Besides, numerical tests were also performed in order to ensure that the numerical parameters do not affect the accuracy of the model. The main observations are listed below.

- SINDA Thermal Desktop tool may use two types of mesh – center or edge nodes, which correspond to finite differences or finite elements respectively. In the case of plane rectangular elements it corresponds either to center node with uniform temperature over the numerical cell (FD) or 4 temperatures for each corner of the cell (FE). In the numerical test no outcome differences were observed by switching FD and FE mesh types.
- For the validation model mesh: 2 nodes in  $z$  direction were needed to satisfying results; no problems regarding the component placement;
- Still for the validation model: once the component had a great area and was treated as a single node, the nodes just below the component may be artificially linked, in order to avoid it we tried to refine the component's mesh in addition to setting a low conductivity property for the component's material - no differences were observed.
- For our sample PCBs we had to set a mesh of  $30 \times 30 \times 2$  edge nodes for all layers and component in order to obtain stable results;
- No different outcomes were found by simply changing the component's dissipating power;
- We also had problems regarding results instability because the component had a small size in comparison to the board (the component was too small to the mesh, which could not be more refined because of numerical limitations). We had to place the component in order that it covers a whole node.
- Contact resistance was not well known, so we tried different values, starting from high value as  $20000 \text{ W/m}^2\text{K}$  and approaching lower values when the effect of artificial conductance is eliminated, the value of  $5000 \text{ W/m}^2\text{K}$  was assumed;
- Each layer should be presented by the numerical mesh with the same size and number of elements. Otherwise, the effect of artificial conductivity may disturb the results.

## 5. RESULTS AND DISCUSSIONS

Several analytical simplified methods have been proposed for calculating effective conductivity of multi-layer boards, including the cross-plane conductivity and the in-plane conductivity see Fig. 5 (Culham et al., 2000). The application these methods to the PCB under investigation yields results presented in Tab. 4.

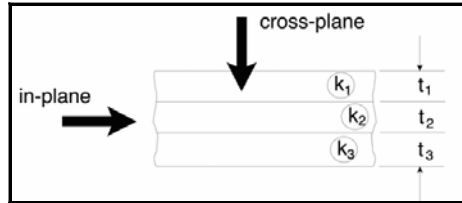


Figure 5. Basic conductivity definition in laminated substrate.

Table 4. Calculated values of the PCB effective conductivity by simplified methods

METHOD	CONDUCTIVITY (W/mK)
In-plane	8.8337
Cross-plane	0.2789
Arithmetic mean	4.5563
Geometric mean	0.6370
Harmonic mean	0.5408

In order to demonstrate the importance of the effective conductivity on PCBs and better understand how it affects the component's temperature, we made a test applied each of the results in Tab. 4 in our simplified model; the component reached a different temperature for each value, see Tab. 5. The temperature using the complex model was 103.9° C.

Table 5. Simplified model temperature applying the values of effective conductivities found with the analytical methods.

METHOD	TEMPERATURE (° C)
In-plane	100.3
Cross-plane	1945.0
Arithmetic mean	160.9
Geometric mean	887.0
Harmonic mean	1035.0

In spite of some magnitudes given in Tab. 5 are far from reality, such dramatic difference just emphasizes the importance of precise calculation of the effective thermal conductivity.

After performing the simulation for the 4 different positions (Fig. 4), changing 3 times the component size and applying our method described above, we came up with the results for the effective conductivity in the PCB, see Fig. 6.

Table 6. Simulation outcomes.

POSITION	COMPONENT SIZE (mm)	COMPONENT'S TEMPERATURE (° C)	EFFECTIVE CONDUCTIVITY (W/mK)
1	0.01x0.008	103.90	8.380
	0.02x0.008	92.96	8.003
	0.02x0.016	87.10	7.814
2	0.01x0.008	95.58	7.864
	0.02x0.008	82.03	7.440
	0.02x0.016	75.92	7.187
3	0.01x0.008	108.60	8.400
	0.02x0.008	97.61	8.053
	0.02x0.016	90.54	7.868
4	0.01x0.008	99.54	7.845
	0.02x0.008	85.72	7.428
	0.02x0.016	78.59	7.195

By using the effective conductivities presented in Tab.6, we calculated a mean of 7.7897 W/mK with 0.4069 of standard deviation. Afterwards, a normal distribution curve was drawn as shown in Fig. 6.

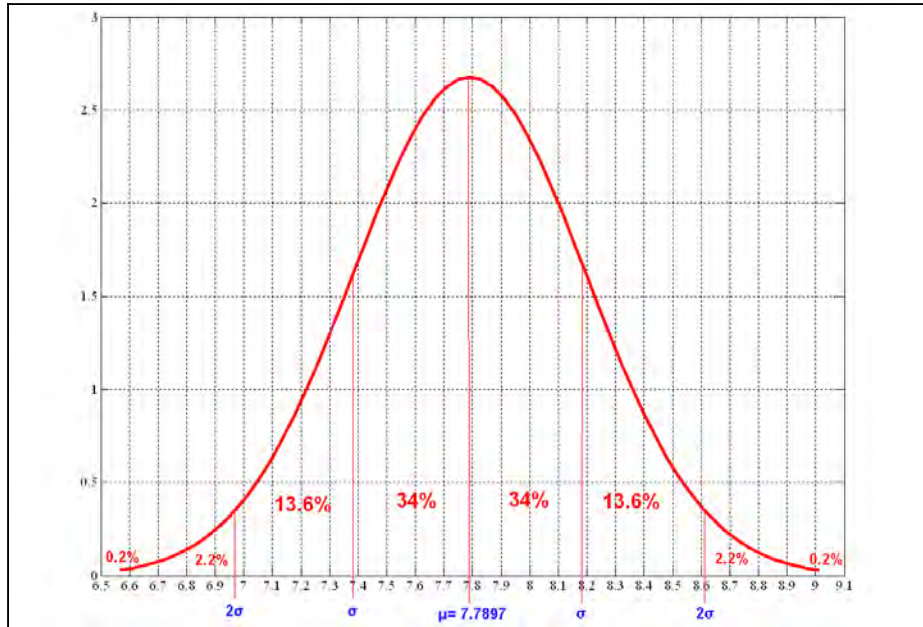


Figure 6. Normal distribution for the effective conductivity.

The value of 7.7897 W/mK was expected once it is between the in-plane and the cross-plane values, which are considered the upper and the lower limits for the effective conductivity respectively. The chart presented in Fig. 6 shows the probability of each value around the mean based on our data.

## 6. CONCLUSIONS

The PCB effective thermal conductivity was obtained by direct simulation used the CAD based thermal model tool SINDA/FLUINT Thermal Desktop. The method was validated by comparison with the published results obtained by more-simplified analytical model; deviation was within ~30% and tendencies have been confirmed for all combinations of layer placements. For the real 6-layer PCB the average value is 7.7897 W/mK, that lies between the limits of the in-plane and arithmetic mean simplified analytical models. The important result is that the uncertainty in the effective thermal conductivity definition for the given example lies between 6.98 to 8.61 W/mK within 95% confidence interval, because of the variety in the component size and positioning. This yields an important practical conclusion: even theoretically, the uncertainty of the PCB effective thermal conductivity will not be greater than  $\pm 11\%$ ; and this variation should be accounted in the thermal project of electronic equipment. Particularly, for the dissipating component, used in the present numerical simulation, this uncertainty corresponds to an uncertainty up to  $\pm 10^\circ$  in terms of the component temperature value within the same 95% confidence interval.

For future work, more simulation cases will be needed to better understanding how the effective conductivity behaves along the board and to have more data, which would allow us to statistically analyze the effective conductivity on multi-layer boards with higher accuracy. The experimental validation of the present method is also under way.

## 7. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank the financial support of Brazilian CAPES organization as well as the Space Mechanics and Control Division – DMC of the National Institute for Space Research -INPE .

## 8. REFERENCES

- Carchia, M., 1999. "Electronic/Electrical Reliability", Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, USA.
- Culham, J.R., Yovanovich, M.M., Lemczyk, T.F., 2000, "Thermal Characterization of Electronic Packaging Using a Three-Dimensional Fourier Series Solution", Journal of Electronic Packaging, Vol.122, pp. 233-239.
- Ellison G.N., 1990, "TAMS-A Thermal analyzer for multilayered structures", Electrosoft, Vol.1, pp. 85-97

Remsburg, Ralph., 2001. Thermal Design of Electronic Equipment. Ed. CRC Press LLC, 2001  
Vlassov, V.V. Analytical Model of the Two-Dimensional Temperature Distribution over a Single Electronic Circuit Board. RETERM - Thermal Engineering (Engenharia Térmica), ISSN 1676-1790. No 3, 2003, pp. 32-37

#### **9. RESPONSIBILITY NOTICE**

The following text, properly adapted to the number of authors, must be included in the last section of the paper:  
The author(s) is (are) the only responsible for the printed material included in this paper.