

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**“Metodologia de Simulação Numérica do Comportamento
Térmico em Equipamentos Eletroeletrônicos”**

REGINALDO RIBEIRO DE SOUSA

Orientador: Prof. Dr. Ailton Akira Shinoda

Tese apresentada à Faculdade de
Engenharia - UNESP – Campus de Ilha
Solteira, para obtenção do título de
Doutor em Engenharia Elétrica.
Área de Conhecimento: Automação.

Ilha Solteira – SP
Agosto/2015

REGINALDO RIBEIRO DE SOUSA

**METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO
COMPORTAMENTO TÉRMICO EM EQUIPAMENTOS
ELETROELETRÔNICOS**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Prof. Dr. Ailton Akira Shinoda
Orientador

Ilha Solteira
2015

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S725m Sousa, Reginaldo Ribeiro de.
Metodologia de simulação numérica do comportamento térmico em
equipamentos eletroeletrônicos / Reginaldo Ribeiro de Sousa. -- Ilha Solteira:
[s.n.], 2015
139 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia
de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2015

Orientador: Ailton Akira Shinoda
Inclui bibliografia

1. Simulação térmica. 2. Componentes eletrônicos. 3. Placa de circuito
impresso. 4. Simulação numérica. 5. Temperatura de junção. 6. Fonte de calor.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Metodologia de Simulação Numérica do Comportamento Térmico em Equipamentos Eletroeletrônicos

AUTOR: REGINALDO RIBEIRO DE SOUSA

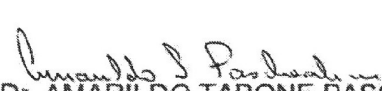
ORIENTADOR: Prof. Dr. AILTON AKIRA SHINODA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA, Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. AILTON AKIRA SHINODA

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. AMARILDO TABONE PASCHOALINI

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



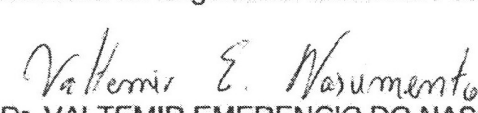
Prof. Dr. MARCIO ANTONIO BAZANI

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. THIAGO ANTONINI ALVES

Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Tecnológica Federal do Paraná



Prof. Dr. VALTEMIR EMERENCIO DO NASCIMENTO

Departamento de Informática / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso

Data da realização: 27 de agosto de 2015.

DEDICATÓRIA

Dedico a todos os jovens e crianças, em especial aos meus queridos filhos Hecthor e Lucas.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a minha esposa Marcela, e aos meus queridos filhos, Hecthor e Lucas, por me trazer estímulo e paz que foram fundamentais nesta etapa de minha vida e claro, para a realização deste trabalho.

Agradeço aos meus pais Raimundo Eustáquio e Maria da Conceição que sempre me ajudaram e apoiaram com todo suporte necessário. Agradeço ao meu sogro e minha sogra. Agradeço também aos meus irmãos, cunhados e sobrinhos. Tenho muito orgulho de fazer parte desta família.

Um agradecimento especial aos professores, Ailton Shinoda (meu orientador), Amarildo Tabone e Márcio Bazani. Agradeço a oportunidade de trabalhar e conviver com estas pessoas que contribuíram para minha formação profissional e pessoal.

Aos colegas da UNESP pela ajuda e incentivo nos longos dias e noites de estudos durante o período das disciplinas.

À UNESP, campus de Ilha Solteira, especialmente aos departamentos de engenharia elétrica e engenharia mecânica que forneceram a infraestrutura necessária para o desenvolvimento deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, pelo apoio financeiro.

Aos membros da banca examinadora pela colaboração e sugestões para a versão final.

A todos que de certa forma contribuíram para a realização deste trabalho, o meu muito obrigado e a minha eterna gratidão.

“Às vezes me pergunto como pôde ter acontecido de eu ter sido o único a desenvolver a Teoria da Relatividade. A razão, creio eu, é que um adulto normal nunca para para pensar sobre problemas de espaço e tempo. Isso são coisas que ele pensou quando criança. Mas o meu desenvolvimento intelectual foi retardado, motivo pelo qual comecei a questionar sobre o espaço e tempo somente quando já era adulto. Naturalmente, pude ir muito mais fundo no problema do que uma criança com suas habilidades normais.” Albert Einstein.

RESUMO

Quando equipamentos e dispositivos eletrônicos são desenvolvidos, o conhecimento de todas as características do projeto é imprescindível. Certos circuitos eletrônicos apresentam componentes com elevada dissipação térmica devido à potência, podendo acarretar problemas no produto desenvolvido. Os componentes eletrônicos, em sua maioria, apresentam um limite em relação à temperatura, tal propriedade é denominada temperatura de junção, temperatura na qual o die do componente eletrônico se encontra. Se a temperatura de junção for excedida, o componente eletrônico poderá apresentar um comportamento inadequado ou até mesmo a parada total de suas atividades.

O ideal é que o projeto elétrico e térmico avancem concomitantemente no desenvolvimento do equipamento, de modo a se obter um produto otimizado. Uma maneira eficiente de avaliar o comportamento térmico dos equipamentos eletrônicos é através de simulações computacionais em softwares de *Computational Fluid Dynamics* (CFD). O emprego dessa ferramenta não é trivial pela dificuldade da elaboração do modelo numérico. Além disso, alguns valores dos parâmetros necessários do modelo numérico, muitas vezes, não são conhecidos. Um exemplo típico é a potência térmica dissipada dos componentes eletrônicos, não dos elementos passivos como resistores ou capacitores, mas dos circuitos integrados (CIs). Os CIs possuem uma estrutura interna complexa contendo milhares ou até milhões de transistores. Outro exemplo é a placa de circuito impresso (PCI) com vários componentes eletrônicos no seu interior. Neste contexto, esta tese propõe uma metodologia para a obtenção de um modelo numérico correlacionado que pode ser extrapolado para um cenário desejado e a partir deste conhecer o campo de temperatura e de velocidade do equipamento. A metodologia é baseada em uma correlação entre o modelo numérico simplificado e teste experimental.

A metodologia de simulação térmica apresentada nesta tese apresenta contribuições para o gerenciamento térmico no projeto de equipamentos eletroeletrônicos. A abordagem permite realizar simulações numéricas do equipamento para um cenário desejado e os resultados obtidos auxiliam na análise do projeto, em particular na confiabilidade ou vida útil do equipamento eletrônico associada à parte térmica. Além desta metodologia de simulação térmica, esta tese

descreve-se o desenvolvimento analítico de uma equação original, não encontrada na literatura, para o cálculo da temperatura de junção dos componentes eletrônicos.

Palavras-chaves: Simulação térmica. Placa de circuito impresso. Fonte de calor. Simulação numérica. Componentes eletrônicos. Temperatura de junção.

ABSTRACT

When electronic equipment and devices are developed, the knowledge of all the features of this project is essential. Some electronic circuits have components with high thermal power dissipation, which can cause problems to the product developed. The electronic components have a limit on the temperature, such property is called junction temperature. If the junction temperature is exceeded, the electronic components will display inappropriate behavior or even a complete stop their activities.

Ideally, the electrical design and thermal design concurrently advance in the development of the equipment in order to obtain an optimum product. A efficient way to meet the thermal performance of electronic equipment is through computer simulations in Computational Fluid Dynamics (CFD) software. However make use of this tool can be difficult. The difficulty is creating the numerical model. For this procedure is necessary to know some variables that are unknown. The thermal power dissipation of electronic components, not resistors or capacitors, but integrated circuits that has in its interior a very complex structure containing thousands or millions of transistors is an example. The complex structures of the geometries to be modeled that are inside electronic components and PCBs are other examples. In this context, this thesis proposes a methodology based on numerical correlations and experimental tests in order to know the device's temperature range designed running in a desired situation. The methodology is based on a correlation between the simplified numerical model and experimental test.

The thermal simulation methodology presented in this thesis brings contributions to the thermal management in the design of electronic equipment. The approach allows doing numerical simulations of equipment for a desired scene and the results assist in project analysis, particularly in reliability and lifetime of electronic equipment associated with the thermal part. In addition to this thermal simulation methodology, this thesis describes the analytical development of an original equation, not found in the literature, to calculate the junction temperature of the electronic components.

Keywords: Thermal simulation. Printed circuit board. Heat source. Numerical simulation. Electronic componentes. Junction temperature.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de um “flip-chip” em um empacotamento de alta performance.	22
Figura 2 – Malha em uma PCI.....	23
Figura 3 – Componentes eletrônicos com encapsulamento tipo SOIC com 4 terminais, face inferior em (a) e face superior em (b).	31
Figura 4 – Seção transversal de um SOIC.....	31
Figura 5 – Componente com encapsulamento tipo QFP com 44 terminais, em (a) face inferior e e, (b) face superior.	32
Figura 6 – Componente com encapsulamento tipo LQFP com 64 terminais, em (a) face superior e e, (b) face inferior.	32
Figura 7 – Seção transversal e um LQFP com o die faceando em baixo em (a) e o die faceando em cima em (b).	33
Figura 8 – Seção transversal e um TQFP com o die faceando em baixo em (a) e faceando em cima em (b).	33
Figura 9 – Componente tipo PLCC com 28 terminais, em (a) é mostrado a face inferior e em (b) a face superior.	34
Figura 10 – Seção transversal de um PLCC.	34
Figura 11 – Componente tipo PGA de 370 terminais, em (a) têm-se a imagem da face inferior e em (b) têm-se a imagem da face superior.	35
Figura 12 – Seção transversal de um componente tipo PPGA em (a) e um tipo FCPGA em (b).	36
Figura 13 – Componente tipo BGA, em (a) têm-se a imagem da face superior e da face inferior de um com 112 terminais e (b) têm-se a face inferior de um com 552 terminais.	36
Figura 14 – Seção transversal de um componente tipo PBGA.	37
Figura 15 – Seção transversal de um componente tipo FCBGA.	38
Figura 16 – Três diferentes tipos de componentes com encapsulamento tipo TO, em (a) o TO-92, em (b) o TO-220 com 3 terminais e em (c) o TO 220 com 5 terminais.....	38
Figura 17 – Meios de transferência de calor em um QFP.	39
Figura 18 – Em (a) têm-se o modelo detalhado para a simulação numérica e em (b) têm-se o modelo simplificado para a simulação numérica.	40

Figura 19 – Modelo matemático de transferência de calor em um componente típico.....	41
Figura 20 – Em (a) o modelo numérico do RTWF fechado e em (b) o modelo numérico do RTWF aberto.....	45
Figura 21 – Módulo de redundância e proteção de energia.	47
Figura 22 – Fotos do teste experimental, em (a) tem-se a visão geral do ensaio experimental, em (b) a instrumentação do RTWF e em (c) a fonte de alimentação e o multímetro.	51
Figura 23 – Identificação dos componentes da PCI do roteador cuja temperatura elevou-se durante o teste.	51
Figura 24 – Identificação de todos os componentes cuja temperatura elevou-se durante o teste.	52
Figura 25 – Gráfico do Calor específico do alumínio em função da temperatura.....	55
Figura 26 – Gráfico do Calor específico do cobre em função da temperatura.	56
Figura 27 – Gráfico do Calor específico da cerâmica em função da temperatura.....	56
Figura 28 - Modelo numérico do teste experimental do RTWF.	57
Figura 29 – Gráfico com a comparação entre o modelo numérico e teste experimental para RTWF fechado.	61
Figura 30 – Roteador totalmente preenchido com a resina “Epóxi SQ2119” e “Endurecedor SQ3140”.	62
Figura 31 – Sistema de referência para a simulação do equipamento RTWF resinado.	64
Figura 32 – Gráfico de temperatura da simulação numérica do caso sem resina e do caso com resina.	67
Figura 33 – Campo de temperatura da simulação numérica do RTWF sem resina.	68
Figura 34 – Campo de temperatura da simulação numérica do RTWF resinado.	68
Figura 35 – Temperaturas, Case, Junção, Board do componente eletrônico 43 da Figura 31.....	72

Figura 36 – Modelo matemático completo para componente eletrônico 43 da	
Figura 31.....	73
Figura 37 – Modelo numérico do teste experimental com o MR.	75
Figura 38 – Posição do termopar.	76
Figura 39 – MR remodelado.....	78
Figura 40 – Detalhes mecânicos do MR remodelado.....	78
Figura 41 – Modelo numérico do teste experimental com o MR remodelado.	79
Figura 42 – Campo de temperatura e campo de vetorial de velocidades da	
simulação numérica do MRPE-14 com apenas os MRs da fileira	
superior remodelados.	80
Figura 43 – Localização e identificação dos termopares.....	82
Figura 44 – Resultados da simulação numérica com o MR sem aberturas.	
Em (a) têm-se a vista isométrica, em (b) têm-se a vista isométrica	
invertida, em (c) têm-se o campo de temperatura e em (d) o campo	
vetorial de velocidades.....	84
Figura 45 – Resultados da simulação numérica com o MR com abertura na	
face superior. Em (a) têm-se a vista isométrica, em (b) têm-se a	
vista isométrica invertida, em (c) têm-se o campo de temperatura e	
em (d) o campo vetorial de velocidades.	85
Figura 46 – Resultados da simulação numérica com o MR com abertura na	
face superior e face inferior. Em (a) têm-se a vista isométrica, em	
(b) têm-se a vista isométrica invertida, em (c) têm-se o campo de	
temperatura e em (d) o campo vetorial de velocidades.	85
Figura 47 – Resultados da simulação numérica com o MR com abertura na	
face superior e face frontal. Em (a) têm-se a vista isométrica, em (b)	
têm-se a vista isométrica invertida, em (c) têm-se o campo de	
temperatura e em (d) o campo vetorial de velocidades.	86
Figura 48 – Circuito divisor de tensão	95
Figura 49 – Curva de calibração do NTC	96
Figura 50 – Fonte de alimentação simétrica DC digital Minipa MPL-3303R	97
Figura 51 – Termômetro digital portátil Full Gauge Controls	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados do teste experimental do RTWF com <i>box</i> aberto.	52
Tabela 2 – Resultados da correlação numérica.	57
Tabela 3 – Resultados da simulação numérica com o RTWF com o <i>box</i> fechado.	59
Tabela 4 – Temperatura dos componentes do modelo numérico e do teste experimental com o <i>box</i> fechado e erro relativo entre os dois modelos.	60
Tabela 5 – Temperatura dos componentes na simulação numérica sem e com resina.	65
Tabela 6 – Resultados do teste experimental com o RTWF resinado.	69
Tabela 7 – Comparativo entre a temperatura obtida para a simulação numéricas no caso do RTWF com resina e a temperatura obtida para o teste experimental no caso do RTWF com resina.	70
Tabela 8 – Resultado do teste experimental com o MR.	74
Tabela 9 – Resultado da correlação numérica com o MR.	76
Tabela 10 – Resultado da simulação numérica do MRPE-14 com apenas os MRs da fileira superior remodelados.	79
Tabela 11 – Resultado do ensaio experimental do MRPE-14 com os MRs remodelados da fileira superior.	82
Tabela 12 – Comparativo entre o resultado numérico e o resultado experimental do MRPE-14 com os MRs remodelados da fileira superior.	83
Tabela 13 – Resumo dos resultados dos quatro cenários analisados com o MR e vantagens e desvantagens do ponto de vista mecânico do MR.	86
Tabela 14 – Propriedades da Resina Epóxi para Encapsulamento modelo SQ 2119.	100
Tabela 15 – Propriedades da Resina Epóxi para Encapsulamento modelo SQ 2119 após cura total.	101
Tabela 16 – Resistência térmica junção-case e resistência térmica junção- board dos componentes eletrônicos da família “Spartan-3A FPGA Family”.	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CI	Circuito Integrado
CIs	Circuitos Integrados
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> (Mecânica de Fluidos Computacional)
ESSS	<i>Engineering Simulation and Scientific Software</i>
PCI	Placa de Circuito Impresso
DVD	<i>Digital Versatile Disc</i> (Disco Digital Versátil)
SOIC	<i>Small Outline Integrated Circuit</i>
SOP	<i>Small Outline Package</i>
QFP	<i>Quad Flat Pack</i>
PQFP	<i>Plastic Quad Flat Pack</i>
LQFP	<i>Low Profile Quad Flat Pack</i>
TQFP	<i>Thin Quad Flat Pack</i>
PLCC	<i>Plastic Leaded Chip Carrier</i>
PGA	<i>Pin Grid Array</i>
PPGA	<i>Plastic Pin Grid Array</i>
FCPGA	<i>Flip-Chip Pin Grid Array</i>
BGA	<i>Ball Grid Array</i>
PBGA	<i>Plastic Ball Grid Array</i>
FCBGA	<i>Flip-Chip Ball Grid Array</i>
TO	<i>Transistor Outline</i>
MR	Módulo de Redundância
MRPE-14	Módulo de Redundância e Proteção de Energia
RTWF	Equipamento Roteador wi-fi que foi alvo de estudo neste trabalho
CC	Corrente Contínua
DC	<i>Direct Current</i> (Corrente Contínua)

ADSL	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i> (Linha Digital Assimétrica para Assinante)
ADC	Conversor Analógico Digital
Mbps	<i>Megabit por Segundo</i>
FR4	<i>Flame Retardant Type 4</i>
NTC	<i>Negative Temperature Coefficient</i>
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i> (Tempo Médio de Falhas)
TIM	<i>Thermal Interface Material</i>
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
RMS	<i>Root Mean Square</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

P_d	Potência Dissipada
T_c	Temperatura na Face Superior do Case
T_b	Temperatura na Face Inferior do Case
T_p	Temperatura na Placa
T_j	Temperatura de Junção
$\dot{Q}$	Fluxo de Calor Gerado pelo <i>Die</i>
$\dot{Q}_{jc}$	Fluxo de Calor que Escoa do <i>Die</i> para a Face Superior do Case
$\dot{Q}_{jb}$	Fluxo de Calor que Escoa do <i>Die</i> para a Placa
R_{jc}	Resistência Térmica entre o <i>Die</i> e Face Superior do Case
R_{jb}	Resistência Térmica entre o <i>Die</i> e Face Inferior do Case
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celcius
W	Watts
K	Kelvin
A	Ampere
V	Volts
T_{SN}	Temperatura do Componente Eletrônico na Simulação Numérica
T_{TE}	Temperatura do Componente Eletrônico no Teste Experimental
T_{SNSR}	Temperatura do Componente na Simulação Numérica sem a Resina
T_{SNCR}	Temperatura do Componente na Simulação Numérica com a Resina
T_{TESR}	Temperatura do componente no Teste Experimental com o <i>Box</i> Fechado e sem a Resina;
T_{TECR}	Temperatura do Componente no Teste Experimental com a Resina
DT_{SN}	Decremento de temperatura entre as simulações numéricas
DT_{TE}	Decremento de temperatura entre os testes experimentais
ε	Emissividade térmica

C_p	Calor específico com pressão constante
k	Condutividade térmica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	OBJETIVOS	23
1.1.1	<i>Objetivo Geral.....</i>	<i>24</i>
1.1.2	<i>Objetivos Específicos</i>	<i>24</i>
1.2	CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO.....	24
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	27
2	ESPECIFICAÇÃO TÉRMICA DO ENCAPSULA-MENTO DOS COMPONENTES ELETRÔNICOS.....	29
2.1	IMPORTÂNCIA DO ENCAPSULAMENTO	29
2.2	TIPOS DE ENCAPSULAMENTOS	30
2.3	PARÂMETROS QUE AFETAM AS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DOS COMPONENTES.....	39
2.4	CÁLCULO DA TEMPERATURA DE JUNÇÃO	40
3	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	44
3.1	ROTEADOR RTWF	44
3.1.1	<i>Método abordado para o RTWF</i>	<i>45</i>
3.2	MÓDULO DE REDUNDÂNCIA E PROTEÇÃO DE ENERGIA.....	47
3.2.1	<i>Método abordado para o MRPE-14</i>	<i>48</i>
3.3	METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO TÉRMICA	49
4	ELABORAÇÃO DO TRABALHO E RESULTADOS.....	50
4.1	ROTEADOR RTWF	50
4.1.1	<i>Teste experimental do RTWF com o box aberto</i>	<i>50</i>
4.1.2	<i>Criação e correlação do modelo numérico</i>	<i>53</i>
4.1.3	<i>Simulação numérica do RTWF com o box fechado.....</i>	<i>58</i>
4.1.4	<i>Teste experimental do RTWF com o box fechado.....</i>	<i>59</i>
4.1.5	<i>Extrapolação do modelo para a análise desejada</i>	<i>61</i>
4.1.6	<i>Simulação numérica com o RTWF resinado</i>	<i>62</i>
4.1.7	<i>Teste experimental com o RTWF resinado</i>	<i>68</i>
4.1.8	<i>Cálculo da Temperatura de Junção, fluxo de calor Junção-Case e fluxo de calor Junção-Board.....</i>	<i>70</i>

4.2	MÓDULO DE REDUNDÂNCIA E PROTEÇÃO DE ENERGIA.....	73
4.2.1	Teste experimental do MR.....	73
4.2.2	Criação do modelo numérico do teste experimental com o MR e correlação	74
4.2.3	Validação do modelo numérico	77
4.2.4	Simulação numérica do MRPE-14 com o MR remodelado.....	77
4.2.5	Teste experimental com MRPE-14 com o MR remodelado.....	80
4.2.6	Outras simulações numéricas analisadas com MRPE-14	83
5	DISCUSSÃO E CONCLUSÃO	88
	REFERÊNCIAS.....	92
	ANEXO A – MÓDULO DE AQUISIÇÃO DE DADOS	95
	ANEXO B – FONTE DE ALIMENTAÇÃO.....	97
	Características Técnicas:	97
	Operação Tensão Constante	98
	Operação Corrente Constante	98
	Mostrador	98
	Saída Fixa de 5V.....	99
	Tracking.....	99
	ANEXO C – RESINA EPÓXI.....	100
	Apresentação	100
	Características	100
	Propriedades do sistema curado.....	101
	Manuseio.....	101
	Armazenagem	102
	Precauções no manuseio do sistema.....	102
	ANEXO D – TERMÔMETRO DIGITAL PORTÁTIL COM 5 SENSORES	104
	Descrição	104
	Recursos:	104
	Especificações Técnicas	105
	ANEXO E – DATASHEET DE COMPONENTES ELETRÔNICOS TIPO FPGA	106

ANEXO F – DATASHEET DE COMPONENTES ELETRÔNICOS TIPO BRICK ...111

APÊNDICE A – TRABALHOS PUBLICADOS E SUBMETIDOS PELO AUTOR...115

Participação e Publicação no Congresso INTERCON 2014 115

Submissão de Artigo ao Jornal DYNA Medellin 121

Participação e Publicação no COBEM 2013 128

1 INTRODUÇÃO

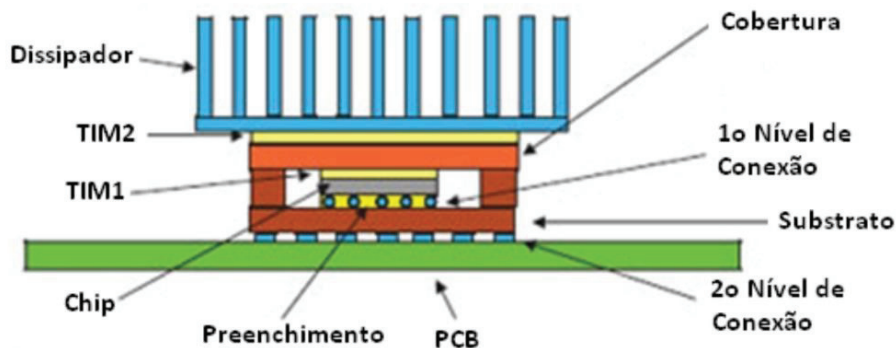
Um projeto térmico de um equipamento eletrônico é uma das partes mais importantes do produto ou equipamento eletrônico, na qual ele é essencial para a confiabilidade e vida útil do mesmo. Durante a concepção do projeto térmico, é importante verificar ou validar o modelo utilizado. Esta verificação pode ser realizada através de ensaios experimentais e simulações computacionais que irão garantir se os resultados atendem ou não os requisitos especificados do produto. Para a maioria dos componentes eletrônicos, e para todos os circuitos integrados (CIs) é essencial conhecer a temperatura de junção durante a operação dos mesmos. O valor limite de temperatura de junção é um parâmetro conhecido pelo projetista. Os testes com protótipos e simulações numéricas são usados para determinar a temperatura do componente eletrônico e consequentemente a temperatura de junção no ambiente na qual ele estará operando durante sua vida útil.

Com o avanço da tecnologia nas últimas décadas, principalmente dos computadores, surgiram novas ferramentas computacionais e as existentes foram melhoradas para a solução de problemas de engenharia. Na análise térmica em equipamentos eletroeletrônicos principalmente naquelas que envolvem *Computational Fluid Dynamics* (CFD), o método dos volumes finitos tem sido largamente utilizado. O uso desse método requer a discretização da geometria, dependendo da complexidade envolvida há a necessidade de matrizes da ordem de dezenas ou centenas de milhões. No passado a solução numérica era limitada pelo poder computacional e por consequência a ordem da matriz. Atualmente existem supercomputadores compostos de milhares de núcleos de processamento trabalhando em conjunto para solucionar as matrizes geradas na análise por volumes finitos.

Entretanto, ainda persistem alguns problemas tratados nessa tese. Atualmente nas indústrias, a equipe de desenvolvimento responsável pela parte do gerenciamento térmico em equipamentos eletrônicos, faz o uso de softwares de CFD durante a fase de desenvolvimento do produto. Esta tem dificuldade em conhecer todos os parâmetros e variáveis que são necessários para a criação e solução do modelo numérico. Como exemplo cita-se a dissipação térmica dos

componentes eletrônicos, as dimensões e as propriedades térmicas das partes ou peças da estrutura interior dos componentes, conforme mostrada na Figura 1.

Figura 1 – Diagrama de um “flip-chip” em um empacotamento de alta performance.



Fonte: ESSS (2008)

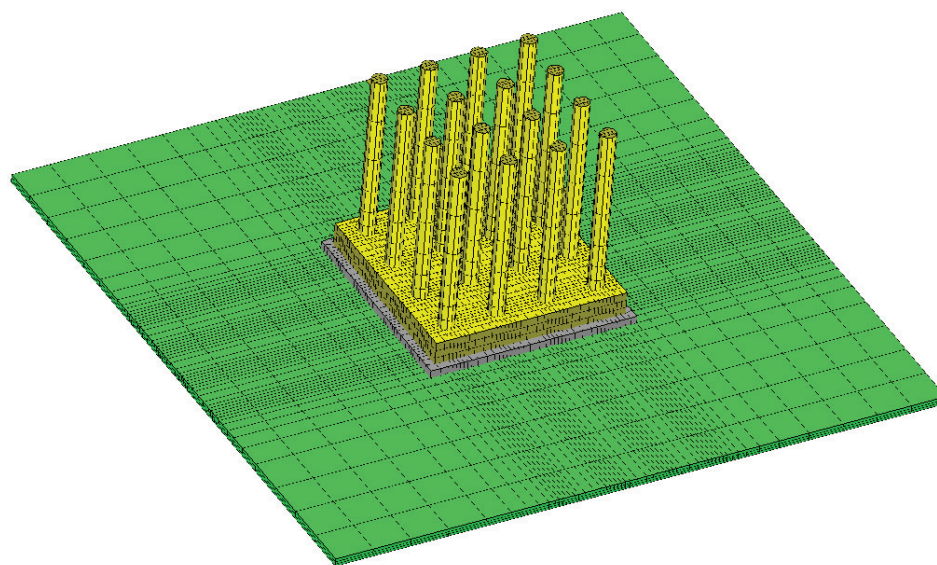
A dissipação térmica é uma variável desconhecida para muitos componentes eletrônicos. Um exemplo é o processador de um computador. Este é um hardware que tem seu funcionamento controlado por um software que opera em seu interior. Provavelmente os dois produtos, hardware e software, são desenvolvidos e fabricados por empresas diferentes. Não há como o fabricante do hardware definir a dissipação térmica do mesmo, pois esta dissipação está diretamente relacionada com estímulo do software que o controla.

Em relação à criação da malha do modelo numérico, tem-se um exemplo na Figura 2, apesar dos softwares de simulação numérica e de geração de malha oferecerem sofisticadas ferramentas de modelagem da complexa estrutura encontrada no interior dos componentes eletrônicos, a equipe de desenvolvimento têm que lidar com a falta de dados nos manuais (*datasheets*) dos componentes eletrônicos. Como exemplo têm-se os dados geométricos do *die* e o material que o constitui. Na Figura 1 é possível observar outros elementos, além dos mencionados anteriormente, como as conexões e os substratos.

Uma atividade comum nas indústrias de desenvolvimento de hardware, na engenharia térmica, é usar os softwares de simulação numérica para determinar os campos de temperatura do dispositivo, de pressão e de velocidade do fluido que o envolve, em várias situações diferentes, tais como temperatura ambiente, alteração

de dissipadores, modelos diferentes de *cases* (encapsulamentos), exposição à radiação solar e etc. Neste caso, desconhecendo algumas propriedades necessárias para configurar corretamente o software, o resultado obtido com estas alterações será apenas qualitativo, o que nem sempre atende a necessidade da equipe de desenvolvimento.

Figura 2 – Malha em uma PCI.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Assim existe uma necessidade de se obter resultados quantitativos, mesmo que não se conheça todas as variáveis envolvidas no problema. Pode-se construir outro sistema, baseado no primeiro, onde é possível determinar a mesma resposta ou solução do problema original. Essa é a contribuição da tese, onde os detalhes desta proposta e os resultados obtidos serão tratados no decorrer do texto.

1.1 OBJETIVOS

Pode-se dividir os objetivos desta tese em duas partes, objetivo geral e objetivos específicos.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal é introduzir uma técnica de simulação térmica para determinar os campos de temperatura, pressão e velocidade em equipamentos eletroeletrônicos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Extrapolar o modelo numérico correlacionado para um novo cenário, determinar as temperaturas dos componentes eletrônicos e os demais resultados com valores absolutos confiáveis;
- Validar os resultados obtidos através da extrapolação do modelo numérico por meio de testes experimentais;
- Criar um modelo matemático do modelo simplificado do conjunto CI/PCI, e através do modelo matemático desenvolver uma equação para calcular a temperatura de junção dos componentes eletrônicos.

Para atingir os objetivos deste trabalho, dois equipamentos foram utilizados. O primeiro foi um roteador *wi-fi* constituído por um invólucro com três placas de circuito impresso: A PCI do roteador propriamente dita, a PCI da fonte e a PCI do fone. O segundo foi um equipamento de redundância de tensão e corrente elétrica. Este é constituído por uma única PCI no interior de um invólucro. Maiores detalhes sobre os equipamentos são apresentados nas seções 3.1 e 3.2.

1.2 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

Essa seção descreve um breve resumo dos trabalhos na literatura dedicados a simulação térmica em equipamentos eletroeletrônicos ou somente de PCIs.

O trabalho de Rubira (2007) descreve a análise térmica em uma PCI utilizando o software Auto Therm, levando em conta a transferência de calor por condução, convecção e radiação. Um ponto em comum nos softwares de simulação térmica é a necessidade do conhecimento de vários parâmetros relacionados aos componentes

participantes da simulação, e no caso específico dos componentes eletrônicos, essas informações estão na maioria nos *datasheets* dos fabricantes, conforme mencionado no trabalho de Rubia (2007). Infelizmente, nem sempre os parâmetros ou dados necessários para a análise térmica estão disponíveis nos *datasheets* dos fabricantes, fazendo-se necessário o desenvolvimento de novos métodos para a obtenção da dissipação térmica dos componentes eletrônicos, proposta dessa tese.

Um estudo sobre a dissipação térmica dos componentes eletrônicos foi realizado anteriormente pelo autor deste trabalho (SOUSA, 2008). Neste uma placa de circuito impresso que é parte constituinte de uma central telefônica de desenvolvimento e fabricação da empresa “Trópico Telecomunicações Avançadas”, foi inserida em funcionamento dentro de um túnel de vento customizado, na ocasião a temperatura dos componentes, da placa, do escoamento de ar na entrada da seção de teste do túnel de vento e do escoamento de ar na saída da seção de teste do túnel de vento foram medidas. Mediu-se também a velocidade do escoamento de ar na entrada e na saída da seção de teste do túnel de vento. Com estes dados foi possível calcular de forma analítica a dissipação térmica de cada componente eletrônico e conseqüentemente a dissipação total da PCI. Entretanto a temperatura de junção dos componentes não foi abordada e a construção do túnel de vento não é trivial. O método apresentado por esta tese não faz o uso deste tipo de equipamento e apresenta uma maneira para calcular a temperatura de junção.

A Texas Instruments (2010), uma das maiores fabricantes de microprocessadores do mundo que possui mais de 40.000 patentes, publicou em 2010 um relatório de aplicação. Este documento fornece orientações gerais sobre o uso de ferramentas e cálculos para as estimativas térmicas de temperaturas de funcionamento de componentes eletrônicos. Neste documento é proposto através de uma equação matemática o cálculo analítico da temperatura de junção. Esta equação é função da temperatura da placa, da resistência térmica junção-placa e da dissipação térmica do componente eletrônico. Neste relatório, é citado que se a temperatura da placa e a dissipação térmica podem ser estimadas, a temperatura de junção pode ser calculada. Entretanto para os cálculos da temperatura de junção que são apresentados na elaboração do documento, o autor estima a dissipação térmica em 1 Watt. Não existe nenhum estudo neste documento para se entender sobre os valores exatos de dissipação térmica dos componentes eletrônicos. Em

outras palavras, o trabalho da Texas Instruments apresenta uma forma de calcular a temperatura de junção, mas não trata o problemas do correto valor de dissipação térmica dos componentes eletrônicos.

Costa (2012) publicou em sua dissertação de mestrado em engenharia e tecnologia espaciais/mecânica espacial e controle, um estudo teórico e experimental da condutividade térmica efetiva de placas de circuito impresso. Um total de 88 modelos numéricos de 11 PCIs foram criados usando o pacote comercial SINDA/FLUINT. Em todos os casos o pesquisador inseriu um valor definido de dissipação térmica, de tal maneira que o foco de análise ficou concentrado somente no espalhamento do calor na PCI, não se preocupando com o valor real da fonte de calor proveniente do componente eletrônico.

A Texas Instruments (2013) publicou outro relatório de aplicação onde foi realizado simulações térmicas com o uso do software de CFD Flotherm. Neste caso foi avaliado a performance térmica do conjunto dissipador, PCI e componente eletrônico. Este estudo apresenta a influência do tamanho da PCI na resistência térmica junção-ar. Em todas as simulações realizadas no software Flotherm, foi considerado uma dissipação térmica de 1,82 Watts.

Em Portugal, Falcão (2014), publicou sua dissertação de mestrado em engenharia mecânica, na qual seu trabalho foi focado no estudo do comportamento térmico de placas de circuito impresso, tendo como ferramenta computacional de apoio o software de simulação CFD ANSYS. Neste trabalho, foram realizadas pelo pesquisador, simulações numéricas de modo a perceber o comportamento e a dispersão térmica de uma placa de circuito impresso na presença de componentes eletrônicos em funcionamento. No entanto sua análise foi focada no comportamento térmico da PCI variando a potência dissipada, composição da placa e número de elementos dissipativos. A potência dissipada de cada componente foi fornecida pelo autor, pois em seu estudo, os componentes eletrônicos eram resistores, deste modo Falcão considerou que toda energia consumida pelos componentes era convertida em calor. Porém esta consideração não vale para o CIs.

Como pode ser verificado nas publicações citadas, existe uma grande perspectiva em analisar e compreender a maneira de distribuição do calor nas PCIs. Entretanto na visão do autor deste trabalho estes estudos resultam apenas em

resultados qualitativos. Esta tese tem uma contribuição quantitativa neste cenário atual. Pois através da metodologia apresentada é possível fazer uma avaliação quantitativa das PCIs e do equipamento eletrônico como um todo e ainda quando for pertinente, calcular a temperatura de junção dos componentes.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta tese de doutorado tem como principal objetivo apresentar uma metodologia de simulação térmica em equipamentos eletroeletrônicos. O texto está organizado de modo a apresentar a importância da proposta, a descrição do método e dois estudos de caso fazendo o uso do novo método.

O capítulo 2 descreve a importância do encapsulamento dos componentes eletrônicos, apresenta os modelos dos componentes mais utilizados na indústria e a estrutura interna do invólucro dos mesmos. Além disso, é apresentado um modelo matemático simplificado de um componente eletrônico permitindo o desenvolvimento de uma equação para calcular a temperatura de junção.

O capítulo 3 descreve os passos da metodologia de simulação térmica aplicada em dois equipamentos. A seção 3.1 trata do equipamento RTWF e a seção 3.2 trata do equipamento MRPE-14.

O capítulo 4 descreve minuciosamente todas as etapas da metodologia de simulação térmica. O capítulo apresenta os resultados obtidos de todos os testes experimentais e de todas as simulações numéricas, isto é, têm-se a solução do passo a passo da metodologia de simulação térmica. Também é realizado o cálculo da temperatura de junção de um componente eletrônico como exemplo, utilizando a nova equação proposta nesta tese.

No capítulo 5 têm-se a discussão, conclusão sobre os resultados obtidos com o uso da metodologia de simulação térmica e as sugestões de trabalhos futuros no prosseguimento do assunto abordado nessa tese.

Para um melhor entendimento do trabalho são apresentados na sequência as Referências, os Anexos com dados que foram utilizados na elaboração dessa tese e

o Apêndice A sobre as participações em congressos, submissões e trabalhos publicados pelo autor.

2 ESPECIFICAÇÃO TÉRMICA DO ENCAPSULAMENTO DOS COMPONENTES ELETRÔNICOS

Existem vários modelos de encapsulamento dos componentes eletrônicos. Essa variação existe para atender às necessidades destes dispositivos. Neste capítulo são apresentados alguns dos modelos mais utilizados na indústria e suas particularidades. O objetivo é apresentar a complexidade da estrutura dos componentes eletrônicos e a dificuldade no modelamento numérico dos mesmos.

2.1 IMPORTÂNCIA DO ENCAPSULAMENTO

Considere um computador e um DVD player como exemplos de sistemas eletrônicos. Ambos requerem energia para funcionar que usualmente é fornecida conectando o cabo de energia na tomada. Além disso necessitam de alguma forma de entrada para fornecer a saída desejada. O computador possui como entrada o *mouse*, teclado ou caixas de som e apresenta a saída no monitor. Um DVD player tem como entrada um DVD e a saída conectada à televisão ou monitor. Em ambos há conectores de entradas e saídas, USB, serial, paralelo, microfone, fone de ouvido, HDMI entre outros. Esses conectores de entradas e saídas para energia e sinal estão usualmente alocados no invólucro dos equipamentos e sistemas eletrônicos. O invólucro protege os dispositivos eletrônicos contra contatos indesejáveis com outros objetos, exposição à poeira, condensação, etc. Outra função do invólucro é o mecanismo de resfriamento. Alguns possuem ventiladores que forçam o ar para o interior do invólucro e/ou exaustão do ar externo ao invólucro. Outros equipamentos, como o DVD player não são equipados com ventiladores, mas existe no seu invólucro furos permitindo a entrada de ar fresco e a saída de ar quente.

Um circuito integrado (CI) pode ser visto como uma miniatura de um sistema eletrônico. O CI requer energia para operar e precisa de meios para receber e transferir sinais de e para outros dispositivos. Ele é muito frágil e em alguns casos caro e precisa ser protegido de ambientes agressivos. Além disso, o CI gera certa quantidade de calor que deve ser dissipada para evitar um superaquecimento e

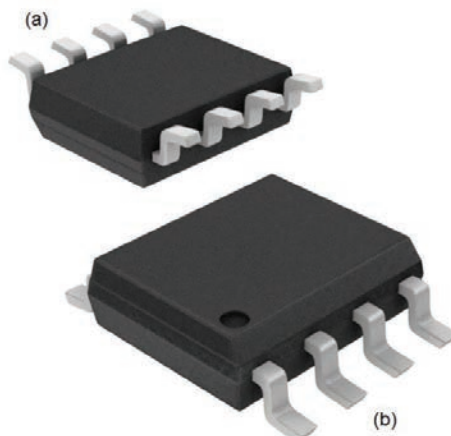
consequentemente falhas e danos. Tudo isto é alcançado com o encapsulamento apropriado do CI. Diferentes técnicas foram desenvolvidas com o objetivo de fornecer conexões de entradas e saídas, proteção e dissipação de calor.

2.2 TIPOS DE ENCAPSULAMENTOS

Conforme mencionado, existem vários tipos de encapsulamentos para suprir as diferentes necessidades dos componentes eletrônicos. Alguns destes encapsulamentos serão resumidamente descritos a seguir.

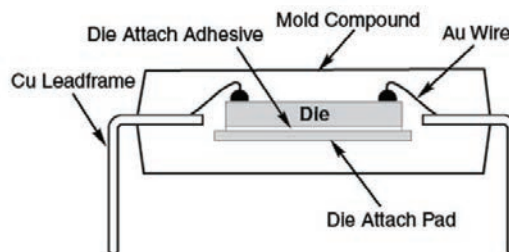
A Figura 3 mostra um exemplo de um tipo de encapsulamento relativamente simples chamado de *Small Outline Integrated Circuit* (SOIC) ou *Small Outline Package* (SOP). Neste tipo de componente eletrônico, os terminais externos são paralelos, no formato de asas e estão situados em lados opostos. O material do encapsulamento é geralmente de polímero (plástico) ou cerâmico. As conexões entre o *die* e os terminais são feitas de fios de ouro (*gold wire*). Outros encapsulamentos são provenientes desta família que são: *Plastic Small Outline Package* (PSOP), *Ceramic Small Outline Package* (CSOP), *Shrink Small Outline Package* (SSOP), *Thin Small Outline Package* (TSOP). O número de terminais destes tipos de encapsulamentos pode variar de 8 a 80 e a espessura de 0,4 a 1,27 milímetros. A seção transversal de um SOIC é mostrada na Figura 4.

Figura 3 – Componentes eletrônicos com encapsulamento tipo SOIC com 4 terminais, face inferior em (a) e face superior em (b).



Fonte: Digikey (2014)

Figura 4 – Seção transversal de um SOIC.

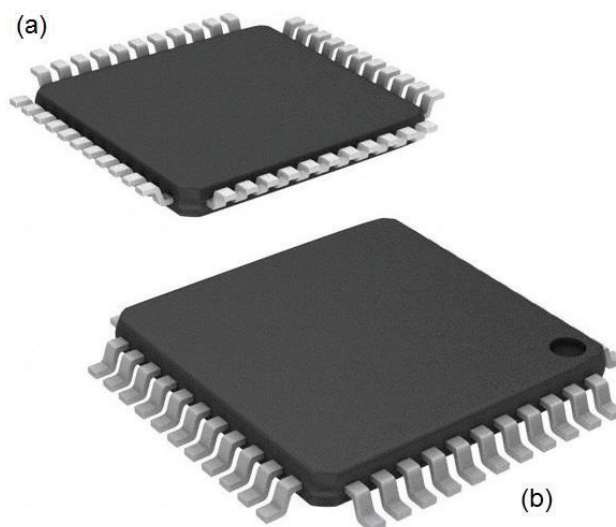


Fonte: Practical Components (2015).

Com o aumento do número de entradas e saídas, os terminais foram alocados nos quatro lados do encapsulamento. Novas famílias surgiram: *Quad Flat Pack* (QFP), *Plastic Quad Flat Pack* (PQFP), *Low Profile Quad Flat Pack* (LQFP) e *Thin Quad Flat Pack* (TQFP). Algumas destas variações podem vir com o *die* faceando na parte superior ou inferior, com o *die attach pad* exposto ou coberto pelo encapsulamento e com ou sem um espalhador de calor interno (*heat slug*). A Figura 5 mostra um componente do tipo QFP com 44 terminais, em (a) é mostrado a face inferior e em (b) a face superior. A Figura 6 mostra um componente tipo LQFP com 64 terminais e com o espalhador de calor interno exposto, em (a) é mostrado a face superior e em (b) a face inferior. A Figura 7 em (a), mostra a seção transversal de um componente tipo LQFP com o die faceando em baixo e em (b) com o die faceando em cima. A Figura 8 em (a), mostra a seção transversal de um

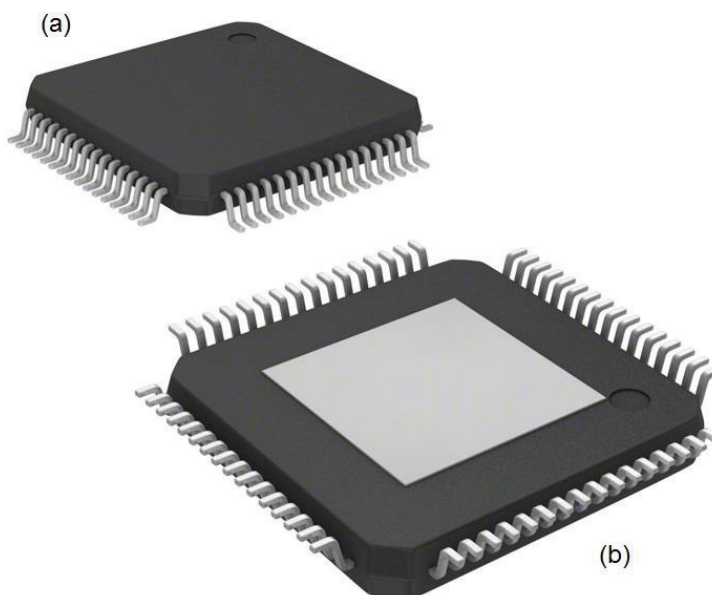
componente tipo TQFP com o die faceando em baixo e em (b) com o die faceando em cima.

Figura 5 – Componente com encapsulamento tipo QFP com 44 terminais, em (a) face inferior e e, (b) face superior.



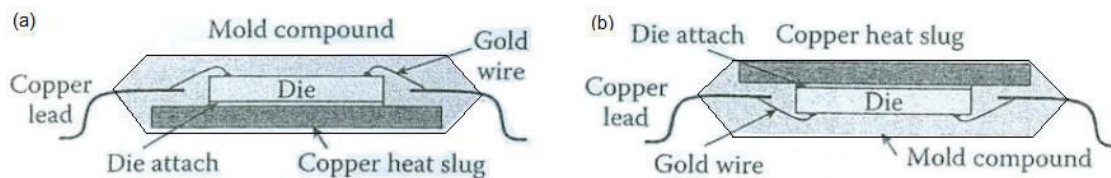
Fonte: 365ele (2014)

Figura 6 – Componente com encapsulamento tipo LQFP com 64 terminais, em (a) face superior e e, (b) face inferior.



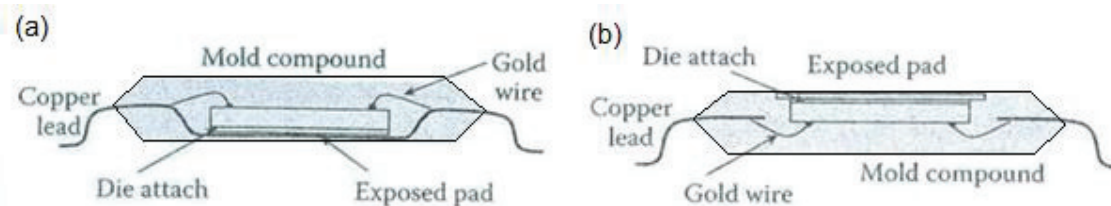
Fonte: Digikey (2014).

Figura 7 – Seção transversal de um LQFP com o die faceando em baixo em (a) e o die faceando em cima em (b).



Fonte: Shabany (2010).

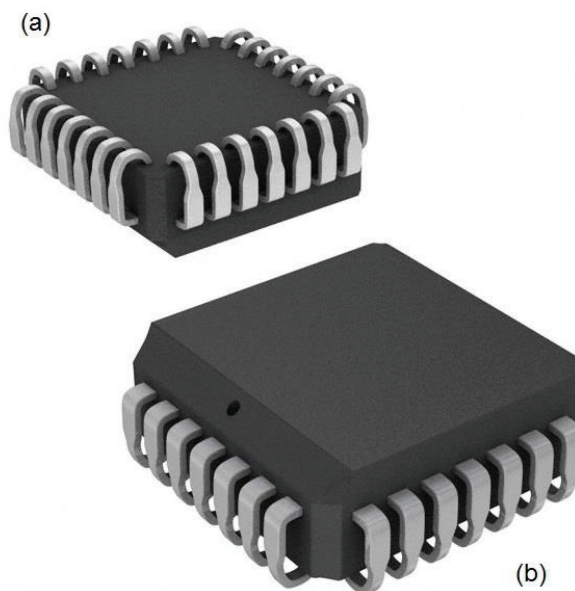
Figura 8 – Seção transversal de um TQFP com o die faceando em baixo em (a) e faceando em cima em (b).



Fonte: Shabany (2010).

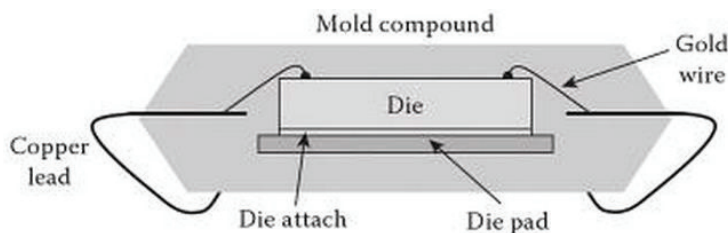
Outro tipo de encapsulamento com terminais nos 4 lados é o *Plastic Leaded Chip Carrier* (PLCC). Ele tem os terminais no formato de um “J”. O número de terminais (leads) varia de 20 a 84. Este tipo de encapsulamento pode ser quadrado ou retangular, e requer menos espaço na placa se comparado com um QFP equivalente. A Figura 9 mostra um componente tipo PLCC com 28 terminais, em (a) é mostrado a face inferior e em (b) a face superior. A seção transversal de um PLCC pode ser vista na Figura 10. Como pode ser visto, exceto pelo formato dos terminais, a construção mecânica e elétrica de um componente tipo PLCC, é similar aos componentes tipo SOP e QFP.

Figura 9 – Componente tipo PLCC com 28 terminais, em (a) é mostrado a face inferior e em (b) a face superior.



Fonte: Digikey (2014).

Figura 10 – Seção transversal de um PLCC.



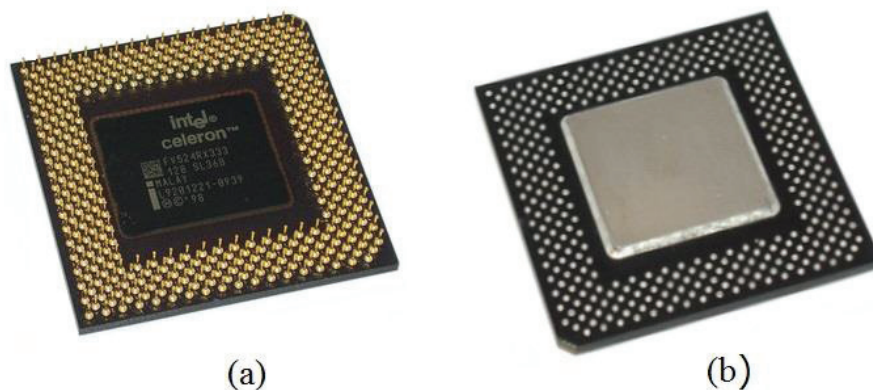
Fonte: Shabany (2010).

As conexões de entradas e saídas estão localizadas em dois lados em um componente com o encapsulamento SOP e em quatro lados para os componentes com encapsulamento QFP e PLCC. Assim, o número máximo de conexões pode ser avaliado pelo perímetro do componente eletrônico e a mínima distância entre cada terminal. Um significativo aumento no número de conexões de entrada e saída poderia ser conseguido se o encapsulamento do componente fornecesse conexões em toda sua área.

Assim, com esses tipos de encapsulamento a quantidade de terminais dispostas em um determinado componente era limitada pelo perímetro do mesmo.

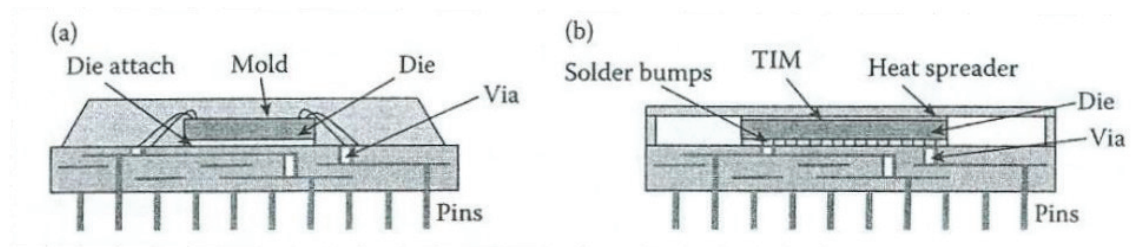
Com a necessidade de um significativo aumento das conexões de entrada e saída surgiram componentes com encapsulamento permitindo conexões na sua área. O *Pin Grid Array* (PGA) é um exemplo. A Figura 11 em (a) mostra a superfície inferior de um componente tipo PGA com 370 terminais e em (b) a superfície superior. A Figura 12 em (a) mostra a seção transversal de um *Plastic Pin Grid Array* (PPGA), neste caso o *die* está alocado no centro do encapsulamento e o substrato é uma estrutura laminar similar a uma PCI. Os pinos estão no interior desta estrutura laminar e estão ligados a uma espécie de *layer*. A conexão entre os pinos e as diferentes posições do *die* é feita por fios de ouro que estão localizados entre o *die* e a face superior do substrato e vias no substrato. Estas vias são de escala microscópica e geralmente são furos com paredes de cobre. Outra versão de um PGA é o *Flip-Chip Pin Grid Array* (FCPGA ou FC-PGA). A Figura 12 em (b) mostra a seção transversal de um FCPGA. Neste caso o *die* está voltado para baixo e acoplado a um espalhador de calor de cobre. A conexão entre os pinos e o *die* ocorre através de solda (*solder bumps*) e vias no substrato. Este tipo de encapsulamento apresenta uma melhor performance térmica se comparado com um encapsulamento similar de plástico.

Figura 11 – Componente tipo PGA de 370 terminais, em (a) têm-se a imagem da face inferior e em (b) têm-se a imagem da face superior.



Fonte: CPU World (2015).

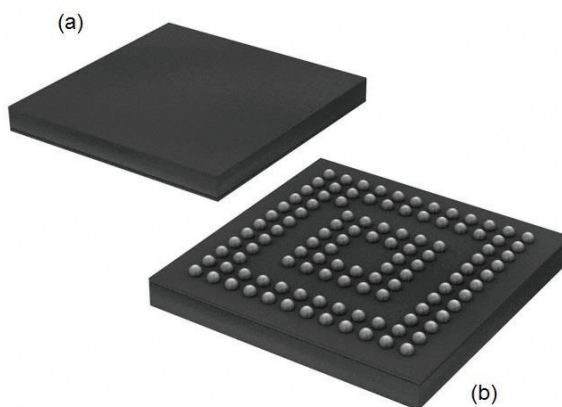
Figura 12 – Seção transversal de um componente tipo PGA em (a) e um tipo FCPGA em (b).



Fonte: Shabany (2010).

Os encapsulamentos PGA e SOP foram produzidos com um grande número de pinos e *leads* e, portanto diminuindo os espaços entre os pinos e *leads*. Isto aumentou os desafios no processo de soldagem, pois o risco de um curto-circuito entre os pinos ou *leads* é alto. A solução para este problema foi o encapsulamento *Ball Grid Array* (BGA). O encapsulamento BGA é semelhante aos PGA, mas os pinos foram substituídos por esferas (*ball*) de solda. A Figura 13 mostra um componente tipo BGA com 112 terminais, em (a) mostra face superior e em (b) a face inferior.

Figura 13 – Componente tipo BGA, em (a) têm-se a imagem da face superior e da face inferior de um com 112 terminais e (b) têm-se a face inferior de um com 552 terminais.



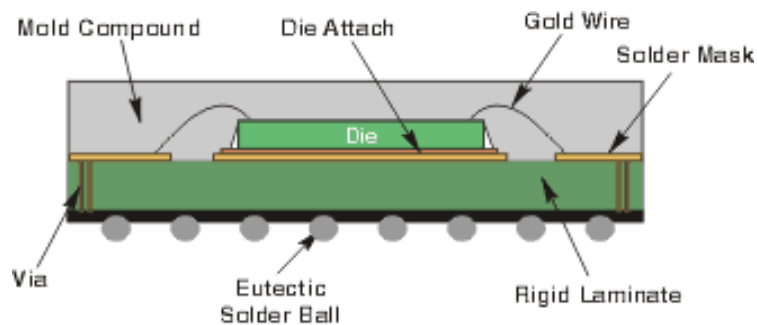
Fonte: Digikey (2014).

Estes componentes são colocados sobre a PCI de tal forma que as esferas de solda estão em contato com “almofadas” (*pads*) de solda adequadas e dispostas na

PCI. A PCI e os componentes são aquecidos até que as esferas de solda derretam de modo que os componentes se fundam com os *pads* da PCI. A quantidade, as propriedades e a temperatura da solda são selecionadas para que cada esfera não derreta completamente, isto permite que cada esfera fique separada das esferas vizinhas.

A Figura 14 mostra a seção transversal de um encapsulamento *Plastic Ball Grid Array* (PBGA). O *die* é montado no substrato laminado similar a uma PCI. As conexões entre o *die* e as esferas de solda ocorrem por fios de ouro e furos metalizados (vias). O *die* e os fios de ouro estão cobertos por um plástico por este motivo o nome PBGA.

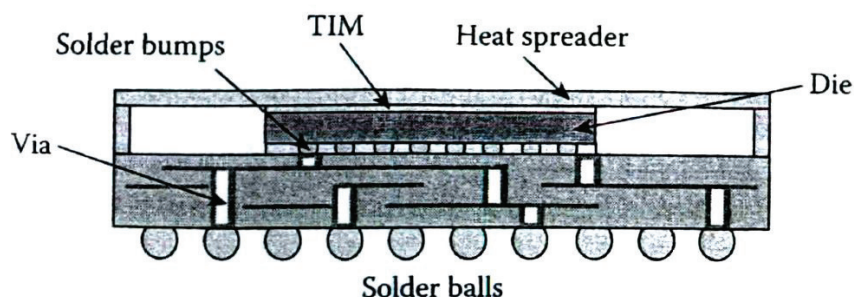
Figura 14 – Seção transversal de um componente tipo PBGA.



Fonte: Elnec (2015)

Uma versão comum de um componente com o encapsulamento tipo BGA é o FCBGA (*Flip-Chip Ball Grid Array*). A Figura 15 mostra a seção transversal deste tipo de componente. Pode-se observar que não há fios de ouro entre o *die* e o substrato, entretanto estas conexões são feitas através de solda (*solder bumps*) que estão localizados no lado ativo do *die*. O *die* está de ponta cabeça e estes *solder bumps* estão em contato com os *solder pads* no substrato. As lacunas entre os *solder bumps* são preenchidas por um material que aumenta a força de conexão física entre o *die* e o substrato de modo a proteger os *solder bumps* de excessivas pressões. Este empacotamento é coberto por uma placa metálica (geralmente cobre) que faz contato com a parte de trás do *die*, transferindo calor e melhorando as condições térmicas do componente.

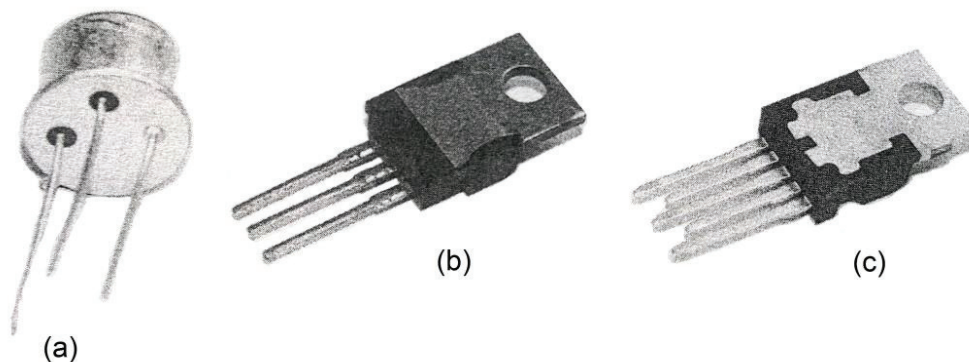
Figura 15 – Seção transversal de um componente tipo FCBGA.



Fonte: Shabany (2010).

Outro tipo de encapsulamento comumente usado para pequenos transistores que possuem um alto nível de dissipação térmica e por CIs é o encapsulamento TO (Transistor Outline). A Figura 16 mostra três diferentes formas deste tipo de encapsulamento. Outras formas também são admitidas. O TO-92 é pequeno, barato e é usualmente utilizado para aplicações com baixa potência. O TO-220 e o TO-263 são com encapsulamentos plásticos que também possui uma parte de metal que pode fazer contato elétrico com um circuito integrado. O TO-220 possui um furo passante pelo encapsulamento para ser montado verticalmente na placa de circuito impresso e também pode ser acoplado a um dissipador de calor para melhorar a performance térmica.

Figura 16 – Três diferentes tipos de componentes com encapsulamento tipo TO, em (a) o TO-92, em (b) o TO-220 com 3 terminais e em (c) o TO 220 com 5 terminais.



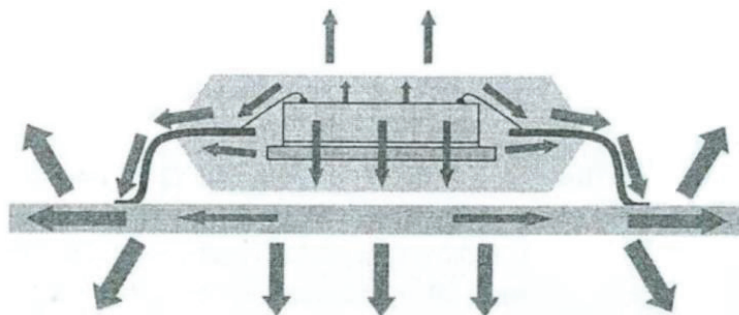
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Existem outros tipos de encapsulamentos, está fora do escopo apresentar todos os modelos neste trabalho, entretanto com os que foram mostrados já é possível verificar como são complexas as estruturas internas dos componentes eletrônicos e da variada quantidade de informações que são necessárias para modelar estes componentes em softwares de CFD.

2.3 PARÂMETROS QUE AFETAM AS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DOS COMPONENTES

Tomando um componente QFP como exemplo, o calor gerado pelo *die* é transferido para o encapsulamento a seu redor, para o “*die attach*” e para as conexões. O calor transferido para o encapsulamento, alcança a superfície sendo transportado para o meio ambiente por convecção e radiação. O calor repassado para o “*die attach*” é transferido para o “*die pad*” que por sua vez é transportado para o encapsulamento ao seu redor. O calor transferido para as conexões é conduzido para a PCI. Estes meios de transferência de calor são representados através de setas na Figura 17.

Figura 17 – Meios de transferência de calor em um QFP.



Fonte: Shabany (2010).

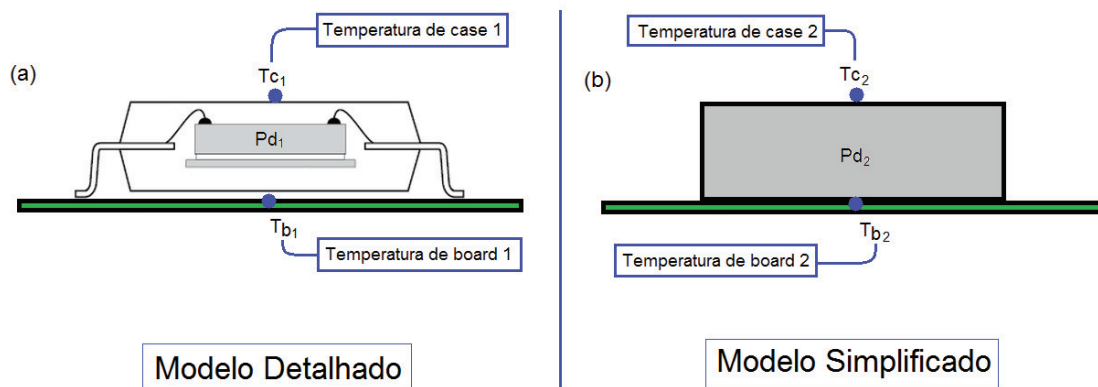
Esse processo de transferência de calor pode ser afetado pelos seguintes parâmetros:

- Tamanho do componente;
- Material do encapsulamento;

- Tamanho do *die*;
- Potência dissipada pelo componente;
- Velocidade do ar;
- Temperatura do ar;
- Tamanho e condutividade da placa.

Esses parâmetros são afetados pelas características geométricas e pela potência dissipada dos componentes eletrônicos. Assim um modelo preciso do encapsulamento do componente eletrônico é importante na confiabilidade dos resultados, caso contrário as simulações numéricas irão fornecer somente valores qualitativos. O modelo simplificado mostrado na Figura 18 (b), faz parte de um processo de correlação com o modelo detalhado de maneira que não necessariamente $Pd_1 = Pd_2$, mas é necessário que $Tc_1 = Tc_2$ e $Tb_1 = Tb_2$. Assim o modelo simplificado reproduz os mesmos resultados de temperatura daqueles do modelo detalhado, correlacionando potência dissipada e geometria do componente além dos materiais que o constituem. Para conhecer estas temperaturas do modelo detalhado, realizam-se testes experimentais em protótipos/equipamentos.

Figura 18 – Em (a) têm-se o modelo detalhado para a simulação numérica e em (b) têm-se o modelo simplificado para a simulação numérica.

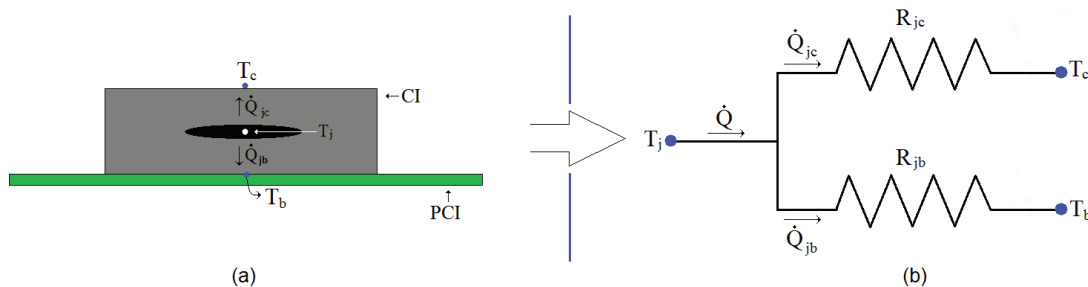


Fonte: Elaboração do próprio autor.

2.4 CÁLCULO DA TEMPERATURA DE JUNÇÃO

No que diz respeito ao gerenciamento térmico em equipamentos eletroeletrônicos, a temperatura de junção dos componentes eletrônicos é a variável que deve ser conhecida no projeto. O componente eletrônico quando operando deve ter uma temperatura de junção menor que aquela indicada no *datasheet*. Nesta seção será apresentada uma maneira de calcular a temperatura de junção dos componentes. Os meios de transferência de calor mostrado na Figura 17 podem ser representados no desenho esquemático apresentado na Figura 19 (a). Este processo de transferência de calor pode ser representado por um modelo matemático constituído por um circuito de resistências térmicas, obtido através da aplicação da lei de ohm, conforme mostrado na Figura 19 (b).

Figura 19 – Modelo matemático de transferência de calor em um componente típico.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Onde:

- T_j é a temperatura de junção;
- T_c é a temperatura da face superior do encapsulamento ou temperatura do *case*;
- T_b é a temperatura da face inferior do encapsulamento, ou a face que está voltada para a PCI;
- $\dot{Q}$ é o calor gerado pelo *die*;
- $\dot{Q}_{jc}$ é o calor que escoa do *die* para a face superior do encapsulamento;
- $\dot{Q}_{jb}$ é o calor que escoa do *die* para a placa;
- R_{jc} é a resistência térmica entre o *die* e face superior do encapsulamento;
- R_{jb} é a resistência térmica entre o *die* e a placa.

Os valores T_c e T_b são obtidos dos resultados da simulação numérica. A R_{jc} e R_{jb} são dados fornecidos pelos *datasheets* dos componentes. O $\dot{Q}$ é uma variável conhecida através da correlação numérica apresentada neste trabalho na seção 4.1.2.

Assim há três variáveis desconhecidas, T_j , $\dot{Q}_{jc}$ e $\dot{Q}_{jb}$. Reforçando que a temperatura de junção, T_j , é o parâmetro a ser calculado. Este problema pode ser resolvido com as equações (1), (2) e (3):

$$R_{jc} = \frac{T_j - T_c}{\dot{Q}_{jc}} \quad (1)$$

$$R_{jb} = \frac{T_j - T_b}{\dot{Q}_{jb}} \quad (2)$$

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{jc} + \dot{Q}_{jb} \quad (3)$$

Isolando a T_j na equação (1), têm-se:

$$T_j = (R_{jc} \cdot \dot{Q}_{jc}) + T_c \quad (4)$$

Isolando o $\dot{Q}_{jb}$ na equação (2), têm-se:

$$\dot{Q}_{jb} = \frac{T_j - T_b}{R_{jb}} \quad (5)$$

Isolando o $\dot{Q}_{jb}$ na equação (3), têm-se:

$$\dot{Q}_{jb} = \dot{Q} - \dot{Q}_{jc} \quad (6)$$

Igualando as equações (5) e (6), têm-se:

$$\frac{T_j - T_b}{R_{jb}} = \dot{Q} - \dot{Q}_{jc} \quad (7)$$

$$\dot{Q}_{jc} = \dot{Q} - \frac{T_j - T_b}{R_{jb}} \quad (8)$$

Substituindo o $\dot{Q}_{jc}$ da equação (8) na equação (4), têm-se:

$$T_j = \left[R_{jc} \cdot \left(\dot{Q} - \frac{T_j - T_b}{R_{jb}} \right) \right] + T_c \quad (9)$$

$$T_j = \left[R_{jc} \cdot \left(\dot{Q} + \frac{-T_j}{R_{jb}} + \frac{T_b}{R_{jb}} \right) \right] + T_c \quad (10)$$

$$T_j = (R_{jc} \cdot \dot{Q}) - \left(\frac{R_{jc} \cdot T_j}{R_{jb}} \right) + \left(\frac{R_{jc} \cdot T_b}{R_{jb}} \right) + (T_c) \quad (11)$$

$$T_j + \left(\frac{R_{jc} \cdot T_j}{R_{jb}} \right) = (R_{jc} \cdot \dot{Q}) + \left(\frac{R_{jc} \cdot T_b}{R_{jb}} \right) + (T_c) \quad (12)$$

$$\frac{T_j \cdot R_{jb} + R_{jc} \cdot T_j}{R_{jb}} = (R_{jc} \cdot \dot{Q}) + \left(\frac{R_{jc} \cdot T_b}{R_{jb}} \right) + (T_c) \quad (13)$$

$$T_j \cdot \left(\frac{R_{jb} + R_{jc}}{R_{jb}} \right) = (R_{jc} \cdot \dot{Q}) + \left(\frac{R_{jc} \cdot T_b}{R_{jb}} \right) + (T_c) \quad (14)$$

$$T_j = \left(\frac{R_{jc} \cdot \dot{Q} \cdot R_{jb}}{R_{jb} + R_{jc}} \right) + \left(\frac{T_b \cdot R_{jc}}{R_{jb} + R_{jc}} \right) + \left(\frac{T_c \cdot R_{jb}}{R_{jb} + R_{jc}} \right) \quad (15)$$

Deste modo é possível determinar T_j , pois todas as variáveis da equação (15) são conhecidas. É importante mencionar que a equação (15) apresentada neste trabalho, é até este momento desconhecida na pesquisa exaustiva realizada na literatura.

3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

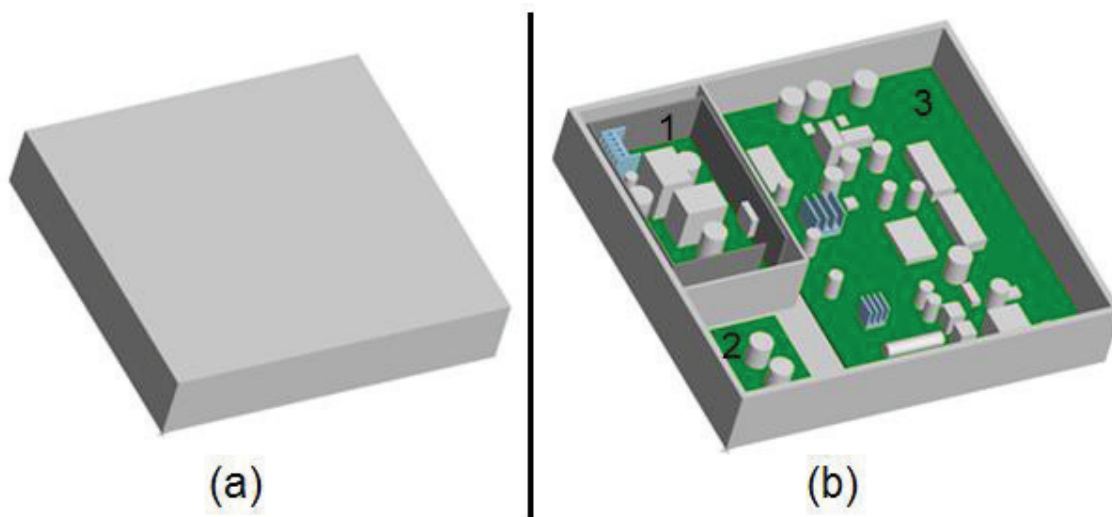
Com o objetivo de validar o método de análise térmica de sistemas eletrônicos, foco de pesquisa da tese, analisou-se dois equipamentos desenvolvidos pela Trópico Telecomunicações Avançadas. O primeiro é um roteador wi-fi e o segundo o “Módulo de redundância e proteção de energia” utilizado como equipamento de redundância de tensão.

3.1 ROTEADOR RTWF

A análise nessa etapa consistiu em determinar o campo de temperatura da placa de circuito impresso e seus respectivos componentes de um roteador *wi-fi* com especificações térmicas desconhecidas, com um *box* diferente do original com seus componentes e placas totalmente cobertos por uma resina epóxi. Para fins de simplificação o roteador *wi-fi* passará a ser chamado de RTWF.

O RTWF é constituído por três placas de circuito impresso. Na Figura 20 (b), a região identificada como “1” é a placa da fonte, a região identificada como “2” é a placa do fone e a região identificada como “3” é a placa principal do RTWF, onde se localizam os circuitos que operam as funções do roteador. A placa 1 transforma a tensão de 48 V DC em 110 V AC para alimentar a placa do roteador.

Figura 20 – Em (a) o modelo numérico do RTWF fechado e em (b) o modelo numérico do RTWF aberto.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.1.1 Método abordado para o RTWF

O método abordado consistiu na realização de testes experimentais e simulações numéricas. Para a obtenção do resultado final, as seguintes etapas foram realizadas:

- 1) Teste experimental com o dispositivo: Por se tratar de um produto de dissipação térmica desconhecida, elaborou-se um *setup* experimental para identificar os componentes mais aquecidos e a aquisição das temperaturas dos mesmos. Durante os testes, o RTWF permaneceu com o *box* aberto e na posição horizontal sob uma bancada, facilitando o manuseio do mesmo nos ensaios.
- 2) Criar e correlacionar o modelo numérico: O modelo numérico criado é similar ao teste experimental e o objetivo é correlacionar o modelo numérico com o experimental. Esta correlação consiste basicamente em escolher inicialmente uma potência dissipada arbitrária para cada componente eletrônico, realizar a simulação numérica através do software ANSYS, analisar os resultados e verificar se as temperaturas dos componentes são similares às do teste experimental. Caso isso não ocorra, inserir novos valores de potência para os componentes e repetir o processo até que o modelo numérico obtido possua o

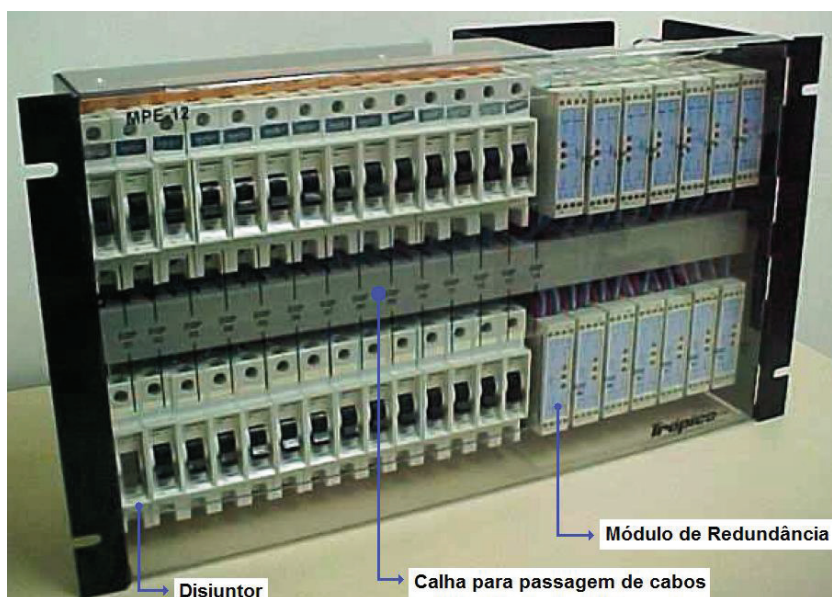
mesmo resultado do teste experimental isto é, a temperatura nos pontos monitorados do teste. Para essa simulação numérica, os componentes foram modelados como “blocos maciços” com as devidas propriedades térmicas do material do encapsulamento. Neste caso, por se tratar de um problema de convecção natural, a radiação tem um impacto significativo no processo de dissipação térmica, assim as propriedades de radiação também foram consideradas.

- 3) Validação do modelo numérico: Nesta etapa outro teste experimental foi realizado, mas desta vez com *box* fechado conforme mostrado na Figura 20 (a). Essa configuração também foi simulada no ANSYS, utilizando os dados de dissipação térmica do modelo correlacionado. O resultado obtido nessa simulação deve ser próximo do experimental. Isso valida o modelo numérico e permite a extrapolação para outros cenários, sem a necessidade de testes experimentais. Se a validação falhar, possivelmente as propriedades térmicas definidas para o *box* não estão adequadas. Nesta fase do processo as potências térmicas dissipadas por cada componente eletrônico são conhecidas. Estas potências não necessariamente correspondem às verdadeiras potências térmicas dissipadas pelos componentes, mas estas potências obtidas, juntamente correlacionadas com propriedades dos materiais dos componentes constituem parte de um modelo correspondente ou similar ao modelo real.
- 4) Extrapolação do modelo numérico para a situação desejada: Após a correlação e a validação do modelo numérico, o mesmo pode ser extrapolado para a situação desejada. Neste caso simulação do RTWF com o *box* fechado e totalmente preenchido por uma resina de epóxi.
- 5) Verificação experimental dos resultados da extrapolação pelo modelo numérico: Realização do ensaio com o RTWF com o *box* fechado e totalmente preenchido por uma resina de epóxi e comparação dos resultados da simulação numérica com o teste experimental. Assim esta etapa verifica validação dos resultados obtidos pela extrapolação do modelo numérico.

3.2 MÓDULO DE REDUNDÂNCIA E PROTEÇÃO DE ENERGIA

O módulo de redundância e proteção de energia é um kit mecânico basicamente composto por 28 disjuntores de 20A, 14 módulos de redundância, uma tampa de policarbonato na parte frontal, na parte traseira um equipamento para supervisão e sinalização de falhas dos módulos de redundância da alimentação e uma fonte para alimentação deste equipamento com a finalidade de proteção primária, distribuição da alimentação CC e redundância na alimentação dos equipamentos alimentados por este módulo. A Figura 21 mostra uma foto do módulo de redundância e proteção de energia.

Figura 21 – Módulo de redundância e proteção de energia.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A análise consistiu em determinar o campo de temperatura do módulo de redundância propriamente dito. O módulo é constituído por uma única placa e há somente um componente dissipando uma quantidade significativa de calor. Para fins de simplificação, o módulo de redundância e proteção de energia passará a ser citado como MRPE-14 e o módulo de redundância por MR.

3.2.1 Método abordado para o MRPE-14

O método abordado consistiu na realização de testes experimentais e simulações numéricas. Para a obtenção do resultado final, as seguintes etapas foram realizadas:

- 1) Teste experimental com o dispositivo: Por se tratar de um produto de dissipação térmica desconhecida, elaborou-se um *setup* experimental para identificar os componentes mais aquecidos e a aquisição das temperaturas dos mesmos. Neste caso foi identificado que apenas 1 componente aquecia significativamente. Durante o teste experimental, o kit MRPE-14 foi energizado e um MR foi instrumentado. Durante o teste o MRPE-14 permaneceu na posição horizontal sob uma bancada, facilitando o manuseio do mesmo no ensaio.
- 2) Criar e correlacionar o modelo numérico: O modelo numérico criado é similar ao teste experimental. O objetivo é correlacionar o modelo numérico com o experimental. Esta correlação consiste basicamente em escolher inicialmente uma potência dissipada arbitrária para cada componente eletrônico, realizar a simulação numérica através do software ANSYS, analisar os resultados e verificar se as temperaturas dos componentes são similares às do teste experimental. Caso isso não ocorra, inserir novos valores de potência para os componentes e repetir o processo até que o modelo numérico obtido possua o mesmo resultado do teste experimental isto é a temperatura nos pontos monitorados do teste. Para essa simulação numérica, os componentes foram modelados como “blocos maciços” com as devidas propriedades térmicas do material do encapsulamento. Neste caso, por se tratar de um problema de convecção natural, a radiação tem um impacto significativo no processo de dissipação térmica, assim as propriedades de radiação também foram consideradas.
- 3) Validação do modelo numérico: Diferentemente do caso RTWF, onde a etapa foi realizada para fins de validação, o método abordado para o MRPE-14 dispensou essa etapa. A validação/verificação do método é realizada nas próximas etapas, extrapolação do modelo numérico para a situação desejada.
- 4) Extrapolação do modelo numérico para a situação desejada: Após a inclusão da correlação no modelo, extrapola-se para a situação desejada que é o MPPE-14

com o MR remodelado. O MR remodelado é a alteração do *box*, da condição de totalmente lacrado para duas aberturas, uma inferior e outra superior. Maiores detalhes dessa etapa será mostrada na seção 4.2.

- 5) Verificação experimental dos resultados da extrapolação pelo modelo numérico: Essa etapa consistiu no *set-up* experimental com o MRPE-14 com o MR remodelado, comparando os resultados da simulação numérica com o ensaio experimental. Assim essa etapa pode ser vista como uma validação dos resultados obtidos da extrapolação do modelo numérico.

3.3 METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO TÉRMICA

Essa seção resume a proposta de uma metodologia de simulação térmica, pesquisa dessa tese, em equipamentos eletroeletrônicos. A metodologia foi apresentada em etapas, mas nem todas são necessárias no caso da utilização do método no desenvolvimento de um equipamento eletrônico, ao contrário de um trabalho científico.

As etapas são:

1. Teste experimental com o dispositivo;
2. Criar o modelo numérico;
3. Correlacionar o modelo numérico com o teste experimental;
4. Extrapolação do modelo numérico para a situação desejada.
5. Aplicação da equação (15), quando for de interesse calcular a temperatura de junção.

4 ELABORAÇÃO DO TRABALHO E RESULTADOS

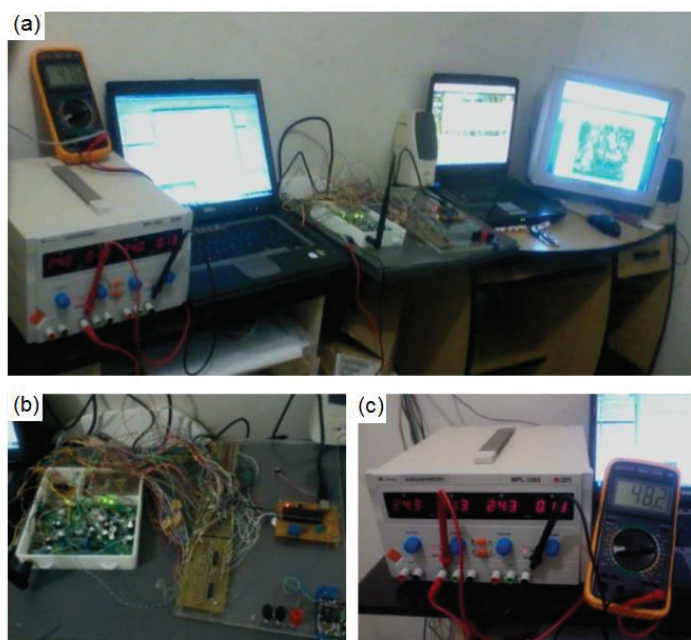
As etapas para a elaboração do trabalho foram brevemente apresentadas nas seções 3.1.1 e 3.2.1. Esse capítulo descreve as etapas detalhadamente além dos resultados obtidos. Primeiro para o equipamento RTWF e posteriormente para o equipamento MRPE-14.

4.1 ROTEADOR RTWF

4.1.1 Teste experimental do RTWF com o *box* aberto

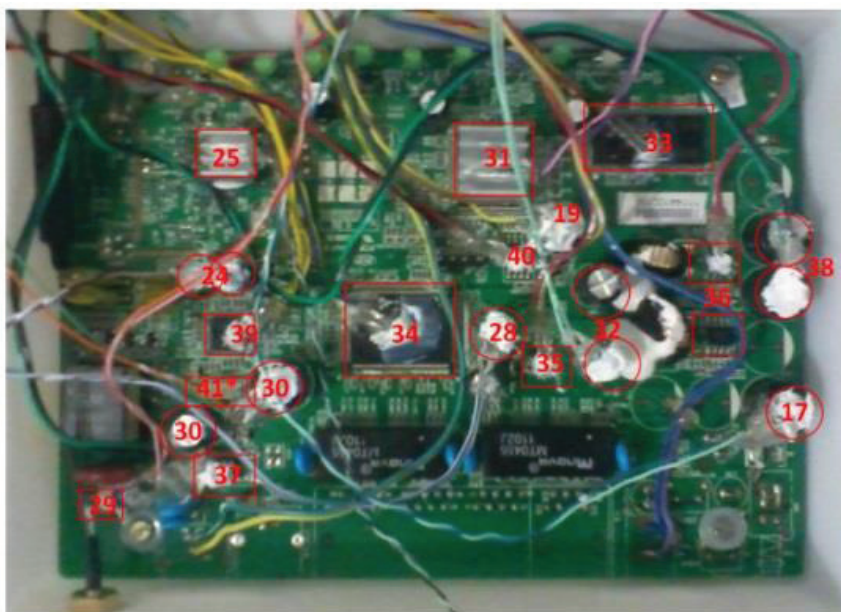
O teste consistiu no funcionamento do RTWF com o *box* aberto identificando os componentes aquecidos e coleta da temperatura dos mesmos utilizando um módulo de aquisição de dados descrito no Anexo A. O equipamento RTWF foi alimentado através da fonte de bancada descrita no Anexo B, por 48 Vdc e conectado a linha telefônica para conexão ADSL de banda nominal de 8 Mbps. Para a operação do RTWF, cinco notebooks e um celular foram conectados em rede, todos gerando mensagens instantâneas e navegador web funcionando em uso normal e três realizando downloads constantes. Além disso, o equipamento foi posicionado sobre uma mesa de madeira na posição horizontal em uma sala com temperatura ambiente controlada. A Figura 22 mostra o *set-up* experimental com o equipamento RTWF. Os componentes identificados como geradores de calor, ou os que aqueciam, tiveram suas respectivas temperaturas medidas e foram identificados por um número conforme pode ser vistos na Figura 23 e na Figura 24. Os resultados deste teste foram organizados no formato de uma tabela onde é possível identificar a temperatura obtida pelos componentes que tiveram sua temperatura elevada em função da sua própria dissipação térmica ou da dissipação térmica da vizinhança. Os resultados são apresentados na Tabela 1.

Figura 22 – Fotos do teste experimental, em (a) tem-se a visão geral do ensaio experimental, em (b) a instrumentação do RTWF e em (c) a fonte de alimentação e o multímetro.



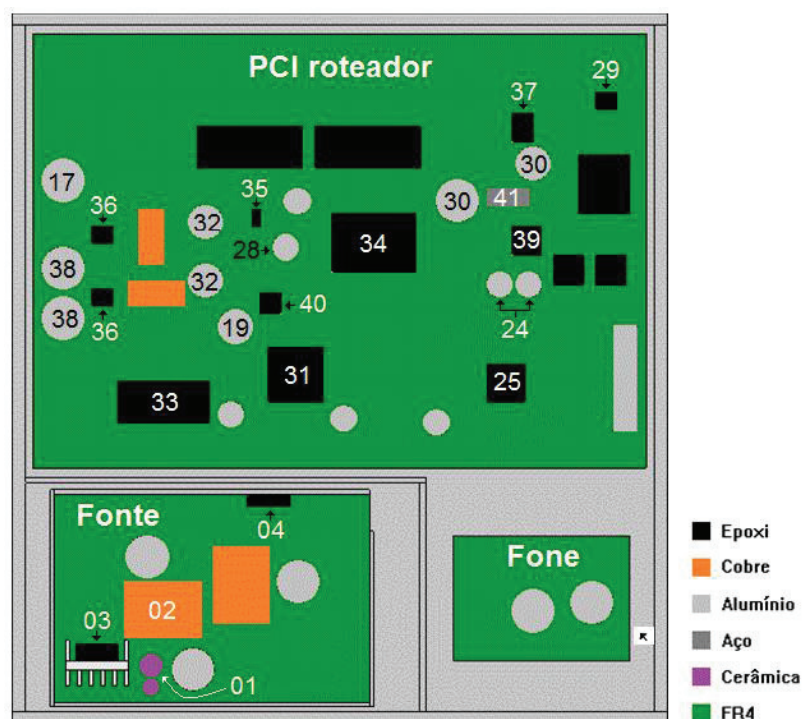
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 23 – Identificação dos componentes da PCI do roteador cuja temperatura elevou-se durante o teste.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 24 – Identificação de todos os componentes cuja temperatura elevou-se durante o teste.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 1 – Resultados do teste experimental do RTWF com *box* aberto.

Referência*	Temperatura [°C]	Observação
--	29,4	Temperatura ambiente
17	33,0	
19	41,6	
24	37	
25	54,9	Sensor na parte superior da base do dissipador
28	39,2	
29	41,7	
30	44,5	
31	57,8	Sensor na parte superior da base do dissipador
32	37,0	
33	45,1	
34	45,5	
35	41,5	

36	44,7	
37	50,2	
38	37,4	
39	56,4	
40	45,4	
41	45,5	
01	40,0	
02	37,0	
03	40,3	Sensor na parte superior da base do dissipador
04	40,9	
* Referência conforme Figura 24		

Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.1.2 Criação e correlação do modelo numérico

Essa seção descreve o modelo numérico criado. Para a realização dessa etapa, as simulações numéricas foram desenvolvidas no laboratório de simulação numérica do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) localizado na UNESP, campus de Ilha Solteira. Para a simulação empregou-se o software ANSYS. O modelo desenvolvido consistiu em reproduzir em detalhes o teste experimental com o equipamento RTWF descrito na seção 4.1.1. A Figura 28 mostra a configuração deste modelo. Nele é possível verificar que as faces laterais do volume de controle foram consideradas como superfícies ou paredes adiabáticas. Esta condição de contorno foi adotada por entender que na distância que estão situadas essas faces não são influenciadas por nenhum tipo de perturbação térmica proveniente do RTWF. A face inferior também foi considerada como sendo uma superfície adiabática. Esta condição de contorno foi adotada porque no teste experimental o RTWF foi posicionado sobre uma mesa de madeira que estava coberta por uma manta antiestática de borracha funcionando como isolamento térmico. A face superior foi modelada como sendo uma abertura.

A correlação consistiu em adotar valor arbitrário de dissipação térmica para cada componente de maneira que a temperatura destes fornecida pela simulação

numérica fosse a mesma daquela registrada no teste experimental. Para isso, a placa de circuito impresso e os componentes foram modelados como blocos maciços. O tipo de material foi atribuído em função do material base de cada um deles, como por exemplo, FR4 e epoxi. O próximo passo foi a execução da simulação numérica e as temperaturas dos componentes comparadas com as temperaturas obtidas do ensaio experimental. Com o objetivo de igualar as temperaturas dos componentes da simulação numérica e do teste experimental, realizou-se uma nova simulação numérica após a correção da dissipação térmica com outros valores. A sistemática empregada foi aumentar a dissipação térmica dos componentes que estavam com temperatura abaixo daquelas registradas no teste experimental, e diminuir a dissipação térmica daqueles que estavam com temperatura maior que aquelas registradas no teste experimental. Esse procedimento foi repetido até que as temperaturas dos componentes na simulação e no experimento fossem idênticas, conforme os resultados da Tabela 2.

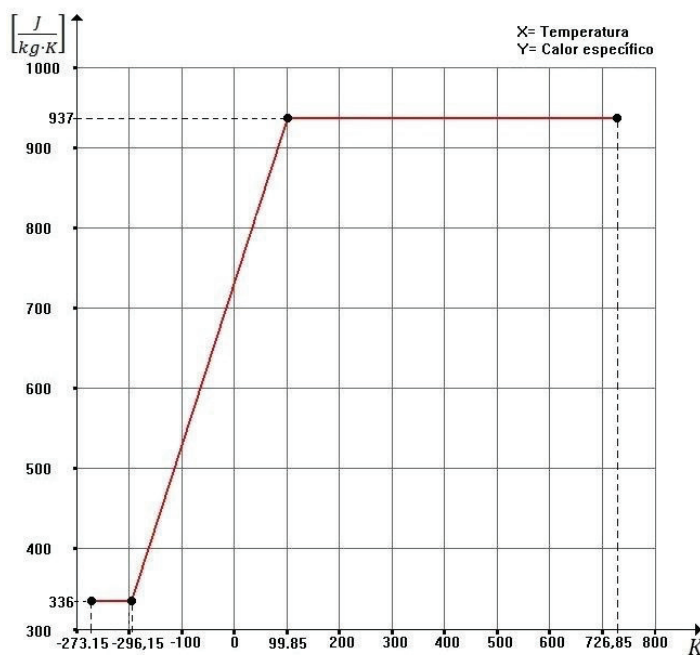
A coluna “Potência” diz respeito aos valores de potência dissipada imposta nos componentes na simulação numérica computacional com o software ANSYS, resultando nas mesmas temperaturas medidas no ensaio experimental. No caso do componente com referência “30” e “01”, existem dois componentes idênticos a este na PCI e para que a temperatura de cada um fosse idêntica às do teste experimental, eles precisaram dissipar potências diferentes, por isso dois valores na coluna “Potência” (uma potência para cada um dos componentes). Além disso, esta potência dissipada é o $\dot{Q}$ que está presente na equação (15). Este dado é essencial para o cálculo da temperatura de junção.

Com relação às propriedades dos materiais, foram adotados os seguintes valores:

- PCI → Material → FR4 → Propriedades: $C_p = 1300 \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$, $k = 0,08 \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$ e $\varepsilon = 0,9$;
- Componentes eletrônicos → Atribuição do material conforme mostrada na Figura 24;
 - Epóxi → Propriedades: $C_p = 1400 \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$, $k = 0,2 \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$ e $\varepsilon = 0,9$;

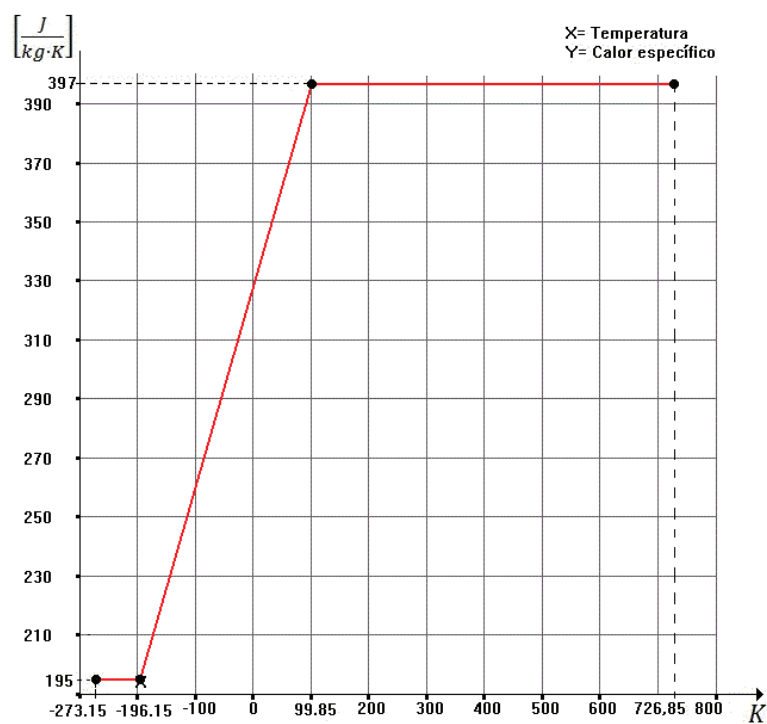
- Alumínio → Propriedades: C_p não é constante, valores conforme mostrado no gráfico da Figura 25, $k = 240 \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$ e $\varepsilon = 0,04$;
- Cobre → Propriedades: C_p não é constante, valores conforme mostrado no gráfico da Figura 26, $k = 0,2 \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$ e $\varepsilon = 0,05$;
- Aço → Propriedades: $C_p = 475 \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$, $k = 71 \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$ e $\varepsilon = 0,8$;
- Cerâmica → Propriedades: C_p não é constante, valores conforme mostrado no gráfico da Figura 27, $k = 15 \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$ e $\varepsilon = 0,9$;
- **Box** → Material → Polietileno → Propriedades: $C_p = 1300 \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$, $k = 0,08 \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$ e $\varepsilon = 0,9$.

Figura 25 – Gráfico do Calor específico do alumínio em função da temperatura.



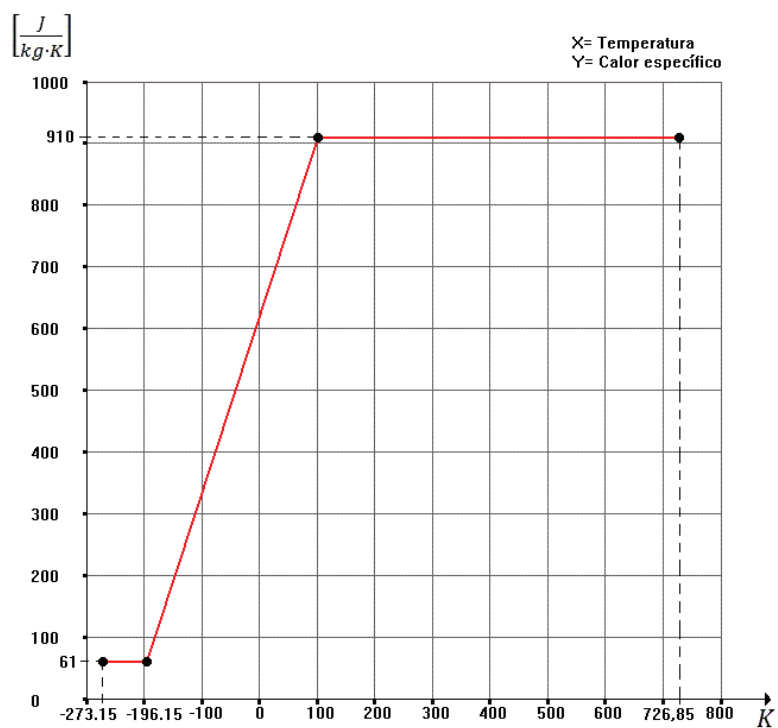
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 26 – Gráfico do Calor específico do cobre em função da temperatura.



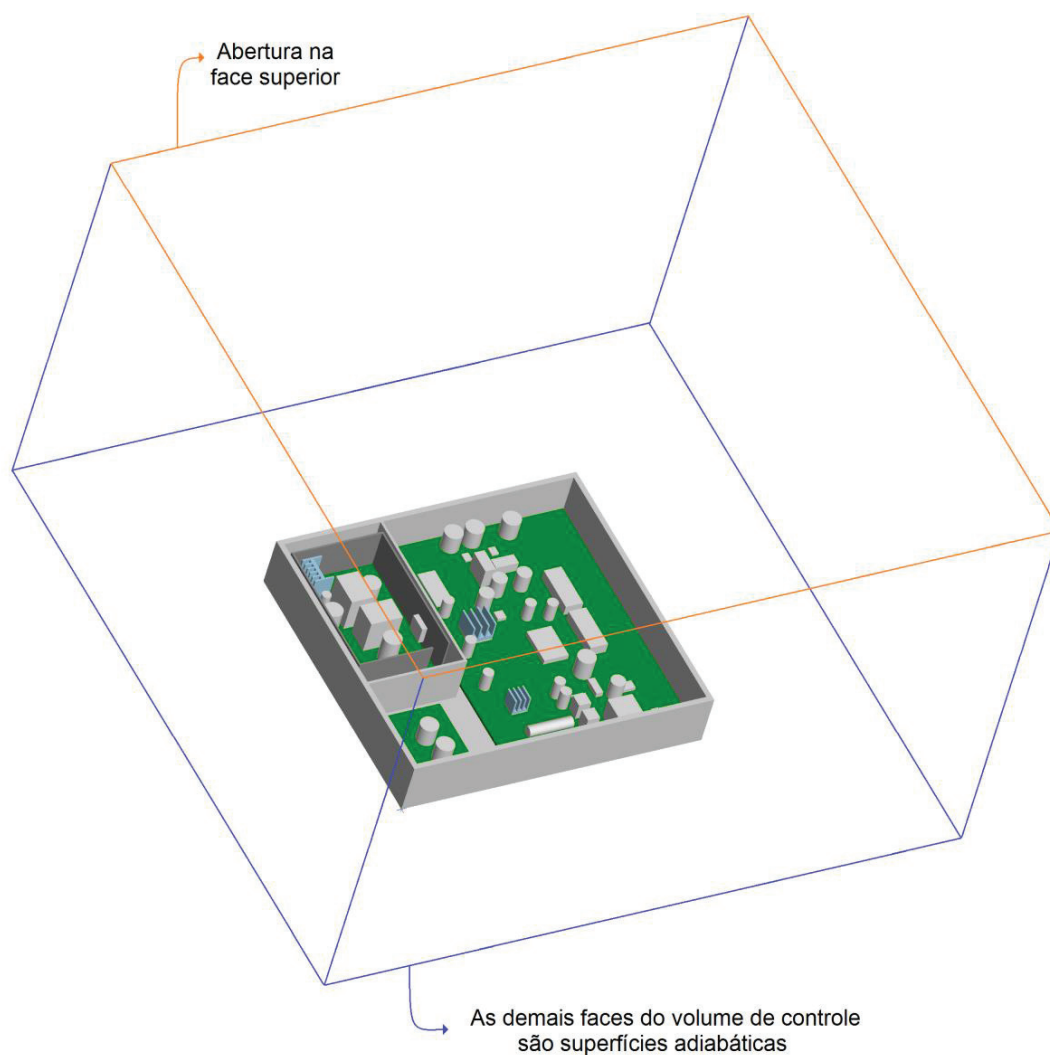
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 27 – Gráfico do Calor específico da cerâmica em função da temperatura.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 28 - Modelo numérico do teste experimental do RTWF.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 2 – Resultados da correlação numérica.

Referência*	Qtd.	Temperatura [°C] Simulação Numérica	Temperatura [°C] Teste Experimental	Potência [mW]
--	--	29,4	29,4	--
17	1	33,0	33,0	32
19	1	41,6	41,6	20
24	2	37	37	12
25	1	54,9	54,9	190

28	2	39,2	39,2	25
29	1	41,7	41,7	18
30	2	44,5	44,5	43/70
31	1	57,8	57,8	300
32	2	37,0	37,0	30
33	1	45,1	45,1	65
34	1	45,5	45,5	85
35	1	41,5	41,5	9
36	2	44,7	44,7	25
37	1	50,2	50,2	40
38	2	37,4	37,4	40
39	1	56,4	56,4	67
40	1	45,4	45,4	10
41	1	45,5	45,5	20
01	2	40,0	40,0	5/12
02	2	37,0	37,0	85
03	1	40,3	40,3	80
04	1	40,9	40,9	345
Dissipação térmica total				1845

*Referência conforme mostrada na Figura 24

Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.1.3 Simulação numérica do RTWF com o *box* fechado

Após a correlação entre o modelo numérico e ensaio experimental descrito na seção 4.1.2, o modelo numérico sofreu uma pequena modificação. O *box* foi tampado e o modelo foi simulado utilizando as potências apresentadas na coluna “potência” da Tabela 2. O objetivo desta etapa foi verificar e validar a correlação numérica comparando os resultados da simulação numérica e do ensaio experimental de uma nova configuração do RTWF, descrito na seção 4.1.4. Os resultados desta simulação são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados da simulação numérica com o RTWF com o *box* fechado.

Referência*	Temperatura [°C]
Temperatura ambiente	28,5
25	65
31	73
33	53
34	59
37	56
39	65
40	57
Tampa do <i>box</i>	45

* Referência conforme mostrada na Figura 24

Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.1.4 Teste experimental do RTWF com o *box* fechado

Essa seção apresenta os resultados do ensaio experimental com a nova configuração do RTWF, *box* fechado. Em função da dificuldade do acesso dos componentes na nova configuração, foram monitorados somente alguns componentes conforme os resultados da Tabela 4.

Calculou-se o valor da coluna “erro relativo, na Tabela 4, através da equação (16):

$$Erro\ Relativo = \frac{|T_{SN} - T_{TE}|}{T_{TE}} \times 100 \quad (16)$$

Onde:

- T_{SN} é a temperatura do componente na simulação numérica;
- T_{TE} é a temperatura do componente no teste experimental;

O erro médio relativo também mostrado na Tabela 4 foi calculado através da equação (17).

$$Erro \text{ M\'edio Relativo} = \sum_{i=1}^{N^{\circ} \text{ de Componentes}} \frac{Erro \text{ Relativo } (i)}{N^{\circ} \text{ de Componentes}} \quad (17)$$

O gr\'afico na Figura 29 mostra os resultados do teste experimental e da simula\c{c}~o num\'erica com o *box* fechado, observa-se que os valores das temperaturas dos componentes eletr\~o nicos da simula\c{c}~o num\'erica e do teste experimental s\~o muito pr\'oximas. Conforme indicado tamb\'em na Tabela 4, o erro m\'edio relativo foi da ordem de 3%. Isto indica que a correla\c{c}~o num\'erica, nesse caso, fornece resultados adequados compar\'aveis \`a an\'alise experimental.

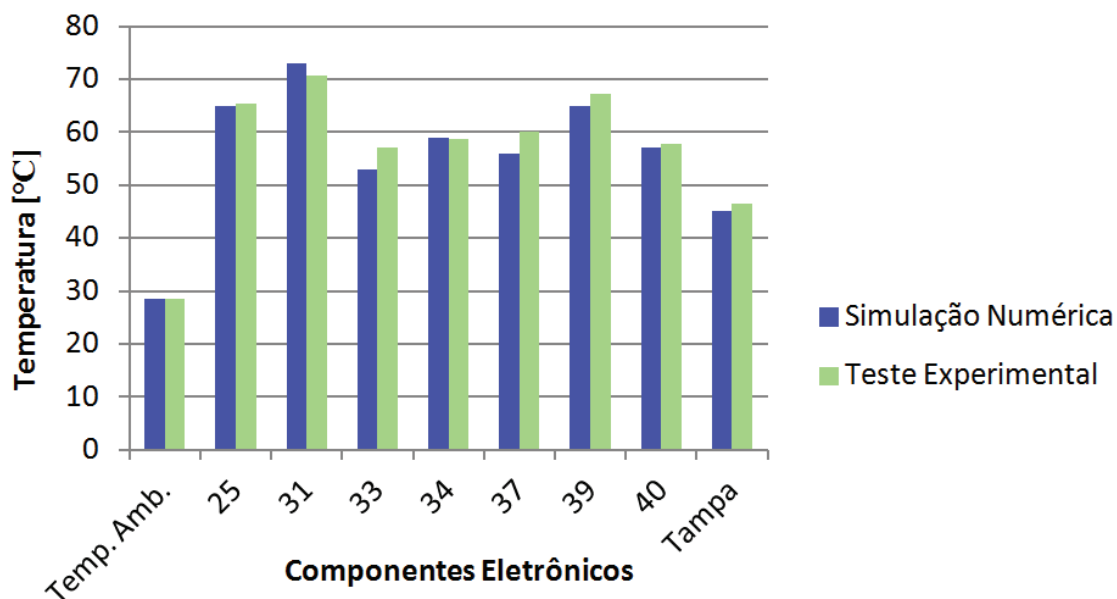
Tabela 4 – Temperatura dos componentes do modelo num\'erico e do teste experimental com o *box* fechado e erro relativo entre os dois modelos.

Refer\~encia	Temperatura [°C] Simula\c{c}~o Num\'erica	Temperatura [°C] Teste Experimental	Erro Relativo [%]
Temperatura Ambiente	28,5	28,5	--
25	65	65,5	0,7
31	73	70,6	3,3
33	53	57,1	7,1
34	59	58,7	0,5
37	56	60,2	6,9
39	65	67,3	3,4
40	57	57,7	1,2
Tampa	45	46,4	3,0
Erro relativo m\'edio			3,26

* Refer\~encia conforme mostrada na Figura 24

Fonte: Elabora\c{c}~o do pr\'oprio autor.

Figura 29 – Gráfico com a comparação entre o modelo numérico e teste experimental para RTWF fechado.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.1.5 Extrapolação do modelo para a análise desejada

Conforme mencionado na seção 1.1 a proposta tem como objetivo extrapolar a correlação obtida com o teste experimental e a simulação numérica para a situação desejada. Neste caso o objetivo é conhecer o comportamento térmico do equipamento RTWF totalmente preenchido pela resina epóxi para encapsulamento modelo “SQ 2119” e endurecedor modelo “SQ 3140”. A Figura 30 mostra uma imagem do roteador resinado. Os detalhes desta resina estão descritos no Anexo C.

Figura 30 – Roteador totalmente preenchido com a resina “Epóxi SQ2119” e “Endurecedor SQ3140”.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Esta resina é comumente utilizada em equipamentos eletrônicos com a intenção de blindar o equipamento contra fabricantes concorrentes evitando detalhes do hardware.

4.1.6 Simulação numérica com o RTWF resinado

O novo modelo numérico criado substitui o ar pela resina com viscosidade infinita e propriedades térmicas características da resina utilizada.

Com o objetivo de analisar o comportamento térmico gerado pela resina no RTWF, duas simulações numéricas foram realizadas. A única diferença entre essas simulações foi o fluido que em um dos casos foi o ar e no outro foi a resina. Nas duas análises, todos os componentes modelados tiveram suas temperaturas determinadas. Para isso um novo sistema de referência foi criado conforme mostrado na Figura 31.

Os resultados destas análises são apresentados na Tabela 5, observa-se que as temperaturas dos componentes sofreram uma diminuição, alguns com valores significativos. Na coluna decremento de temperatura é visível a redução da temperatura nos componentes mais aquecidos em torno de 30%. Isto é um resultado interessante apontado pela simulação numérica, pois a resina funcionou como um dissipador para reduzir a temperatura dos componentes mais críticos. Para verificar a confiabilidade da extrapolação do modelo numérico nos resultados qualitativos e principalmente dos quantitativos, realizou-se um teste experimental com o equipamento resinado, descrito na próxima seção.

Os valores percentuais apresentados na coluna “Decremento da Temperatura” da Tabela 5, foi calculado utilizando a equação (18).

$$\text{Decremento de Temperatura} = \frac{T_{SN_{SR}} - T_{SN_{CR}}}{T_{SN_{SR}}} \times 100 \quad (18)$$

Onde:

- $T_{SN_{SR}}$ é a temperatura do componente na simulação numérica sem a resina;
- $T_{SN_{CR}}$ é a temperatura do componente na simulação numérica com a resina;

Alguns valores nesta coluna foram negativos, caso dos componentes com as referências 37, 42 e 44.

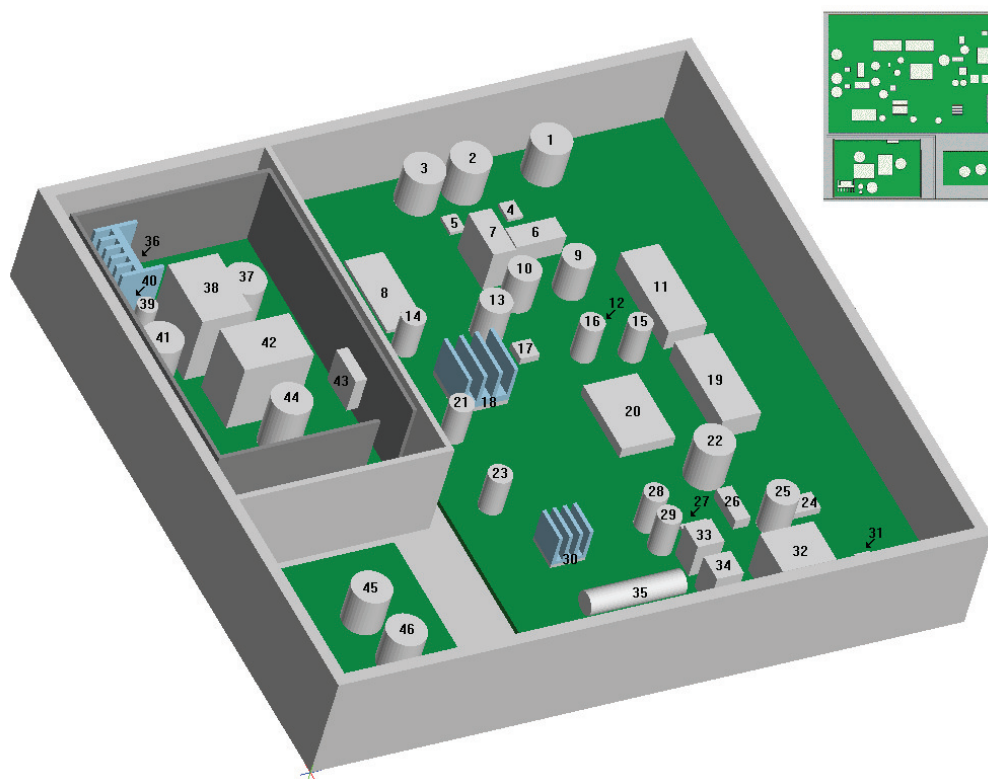
A média da variação de temperatura de todos componentes foi calculada usando a equação (19). O valor calculado foi de 11%, ou seja, este foi o decremento médio de temperatura que a resina proporcionou, na maioria dos componentes no equipamento RTWF.

$$\text{Decremento de Temp. Médio} = \frac{\sum_{i=1}^{N^{\circ} \text{ de Comp.}} \text{Decremento de Temperatura } (i)}{N^{\circ} \text{ Total de Componentes}} \quad (19)$$

O gráfico na Figura 32 mostra a comparação entre a temperatura da simulação numérica sem resina e com resina.

O campo de temperatura das simulações numéricas com o equipamento RTWF sem a resina e resinado são apresentados na Figura 33 e Figura 34 respectivamente.

Figura 31 – Sistema de referência para a simulação do equipamento RTWF resinado.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 5 – Temperatura dos componentes na simulação numérica sem e com resina.

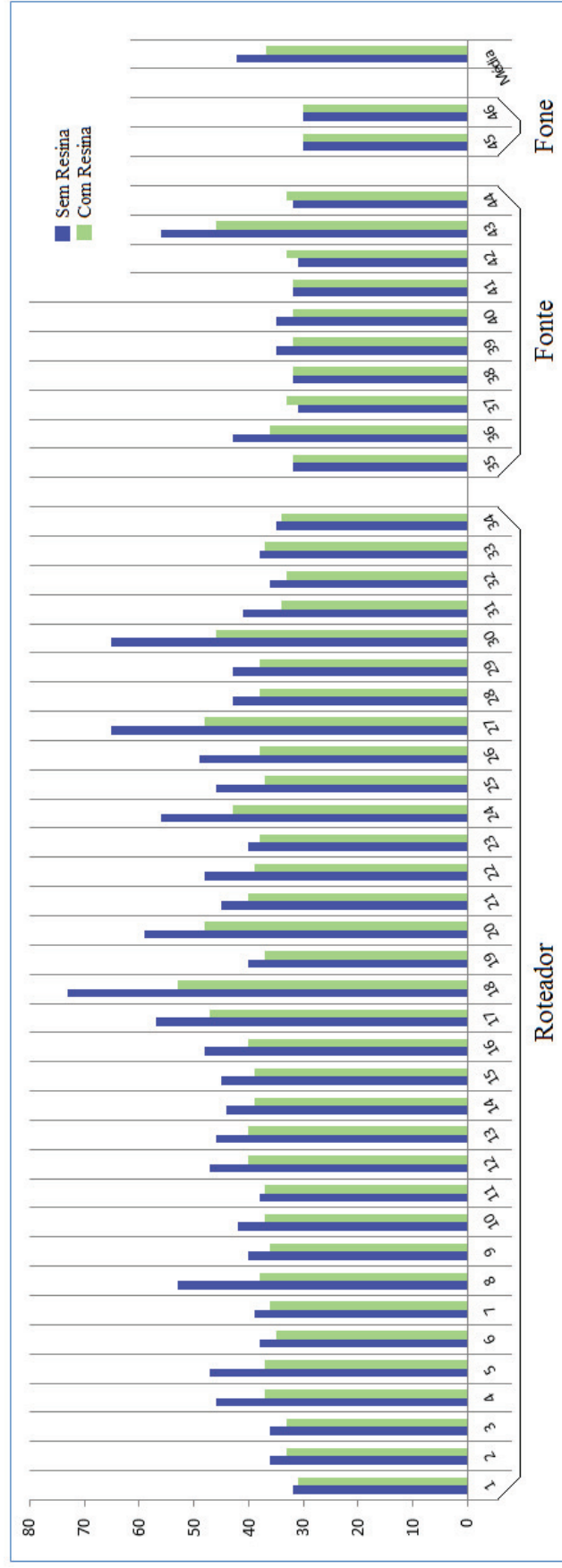
	Referência*	Temperatura [°C] Simulação		Decremento da Temperatura [%]
		Sem Resina	Com Resina	
Roteador	1	32	31	3,1
	2	36	33	8,3
	3	36	33	8,3
	4	46	37	19,6
	5	47	37	21,3
	6	38	35	7,9
	7	39	36	7,7
	8	53	38	28,3
	9	40	36	10,0
	10	42	37	11,9
	11	38	37	2,6
	12	47	40	14,9
	13	46	40	13,0
	14	44	39	11,4
	15	45	39	13,3
	16	48	40	16,7
	17	57	47	17,5
	18	73	53	27,4
	19	40	37	7,5
	20	59	48	18,6
	21	45	40	11,1
	22	48	39	18,8
	23	40	38	5,0
	24	56	43	23,2
	25	46	37	19,6
	26	49	38	22,4
	27	65	48	26,1
	28	43	38	11,6
	29	43	38	11,6

	30	65	46	29,2
	31	41	34	17,1
	32	36	33	8,3
	33	38	37	2,6
	34	35	34	2,9
	35	32	32	0,0
Fonte	36	43	36	16,3
	37	31	33	-6,5
	38	32	32	0,0
	39	35	32	8,6
	40	35	32	8,6
	41	32	32	0,0
	42	31	33	-6,5
	43	56	46	17,9
	44	32	33	-3,1
Fone	45	30	30	0,0
	46	30	30	0,0
Média		42,9	37,3	11,2

*Referência conforme mostrada na Figura 31

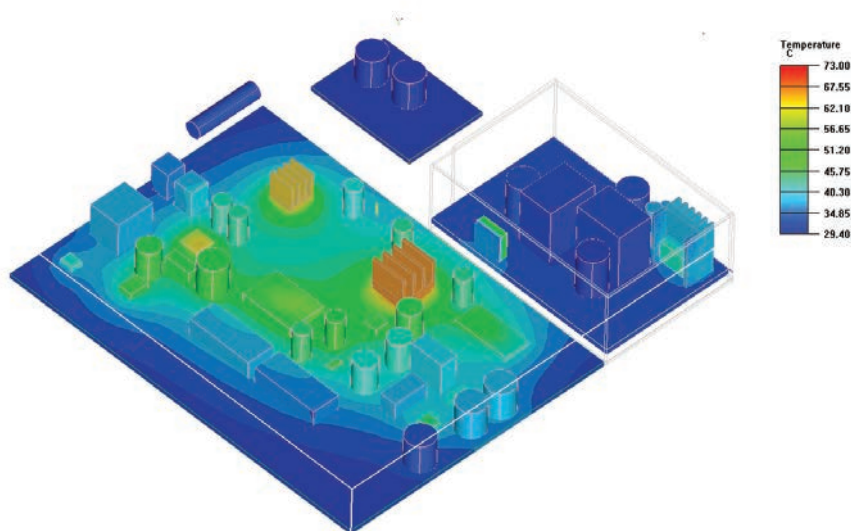
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 32 – Gráfico de temperatura da simulação numérica do caso sem resina e do caso com resina.



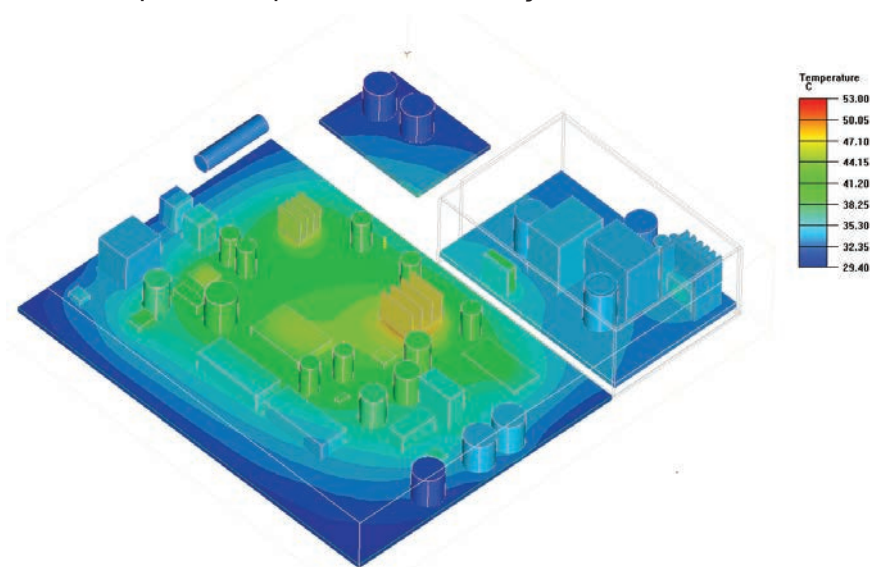
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 33 – Campo de temperatura da simulação numérica do RTWF sem resina.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 34 – Campo de temperatura da simulação numérica do RTWF resinado.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.1.7 Teste experimental com o RTWF resinado

Conforme mencionado na seção 4.1.6, com o propósito de verificar se os resultados da simulação numérica com o equipamento RTWF resinado são factíveis,

um novo teste experimental foi realizado. Para este teste o RTWF foi resinado conforme a Figura 30. As condições de operação do RTWF do teste experimental foram as mesmas daquelas descritas na seção 4.1.1, exceto que neste caso o equipamento está totalmente preenchido com a resina epóxi para encapsulamento modelo “SQ 2119” e a temperatura ambiente é 29°C. Somente quatro componentes eletrônicos foram monitorados neste teste. Os resultados do teste experimental e da simulação numérica são apresentados na Tabela 6. Os valores da coluna “Decremento da Temperatura” mostrado na Tabela 6 foram calculados utilizando a equação (20).

$$\text{Decremento de Temperatura} = \frac{T_{TESR} - T_{TECR}}{T_{TESR}} \times 100 \quad (20)$$

Onde:

- T_{TESR} é a temperatura do componente no teste experimental com o *box* fechado e sem a resina;
- T_{TECR} é a temperatura do componente no teste experimental com a resina;

Tabela 6 – Resultados do teste experimental com o RTWF resinado.

Referência*	Temperatura [°C] Teste Experimental		Decremento da Temperatura [%]
	Sem Resina	Com Resina	
30	65,5	49,0	25,2
18	70,6	52,8	25,2
27	67,3	55,5	17,5
24	60,2	49,9	17,1

*Referência conforme mostrada na Figura 31

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 7 auxilia na compreensão dos resultados obtidos entre a simulação numérica e o teste experimental para o caso analisado do RTWF com resina. Apesar dos valores da simulação numérica e do experimento não estarem tão próximos, o

resultado é razoável na análise do comportamento do sistema pelo método numérico.

Os valores da coluna “erro relativo” mostrado na Tabela 7, foram calculados através da equação (16). O erro médio relativo também mostrado na Tabela 7 foi calculado através da equação (17).

Tabela 7 – Comparativo entre a temperatura obtida para a simulação numéricas no caso do RTWF com resina e a temperatura obtida para o teste experimental no caso do RTWF com resina.

Referência	Temperatura [°C] Teste Experimental	Temperatura [°C] Simulação Numérica	Erro relativo [%]
30	49,0	46	6,1
18	52,8	53	0,4
27	55,5	48	13,5
24	49,9	43	13,8
Erro médio relativo			8,4
*Referência conforme mostrada na Figura 31			

Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.1.8 Cálculo da Temperatura de Junção, fluxo de calor Junção-Case e fluxo de calor Junção-Board

Conforme mencionado anteriormente, existem vários modelos de encapsulamentos para os componentes eletrônicos e estes são dotados de características próprias. Para algumas “famílias” de componentes eletrônicos, caso da maioria dos circuitos integrados, a temperatura de junção é um dado fundamental no desenvolvimento de equipamentos eletrônicos pelo fato de estar relacionado com o tempo de vida útil do mesmo. Para outras “famílias” de componentes eletrônicos, o importante não é determinar a temperatura de junção, mas conhecer a “temperatura do case” ou a temperatura da superfície superior do componente eletrônico, mostrado na Figura 38, caso típico das fontes DC/DC ou *bricks*. Esse tipo de informação está no manual dos componentes eletrônicos, ou *datasheets*, onde

geralmente há uma seção descrevendo as características térmicas do componente eletrônico (Anexo E e Anexo F).

Como exemplo calculou-se a temperatura de junção do componente eletrônico 04 conforme referência adotada na Figura 24 ou o componente eletrônico 43 na Figura 31. Este componente foi escolhido, pois apresenta o maior valor de dissipação térmica. Neste caso o objetivo é conhecer a temperatura de junção para a situação onde o RTWF está com o *box* fechado e sem a resina epóxi. Para calcular a temperatura de junção deste componente utilizou-se a equação (15), novamente mostrada abaixo:

$$T_j = \left(\frac{R_{jc} \cdot \dot{Q} \cdot R_{jb}}{R_{jb} + R_{jc}} \right) + \left(\frac{T_b \cdot R_{jc}}{R_{jb} + R_{jc}} \right) + \left(\frac{T_c \cdot R_{jb}}{R_{jb} + R_{jc}} \right) \quad (15)$$

Onde:

- T_j é a temperatura de junção;
 - É a variável a ser calculada;
- T_c é a temperatura da face superior do encapsulamento ou temperatura do *case*;
 - Dado obtido através da simulação numérica com o RTWF com o *box* fechado e sem a resina epóxi: 56°C;
- T_b é a temperatura da face inferior do encapsulamento, ou a face que está voltada para a PCI;
 - Dado obtido através da simulação numérica com o RTWF com o *box* fechado e sem a resina epóxi: 52°C;
- $\dot{Q}$ é o calor gerado pelo *die*;
 - Dado obtido através da simulação numérica. Conforme Tabela 2 o valor é 345 mW.
- R_{jc} é a resistência térmica entre o *die* e face superior do encapsulamento;
 - Dado obtido do Anexo E, o componente eletrônico com o encapsulamento “VQ100” e modelo “XC3S50A”: R_{jc} ou $\theta_{jc} = 12,9 \text{ } ^\circ\text{C/W}$;
- R_{jb} é a resistência térmica entre o *die* e a placa;
 - Dado obtido do Anexo E, o componente eletrônico com o encapsulamento “VQ100” e modelo “XC3S50A”: R_{jb} ou $\theta_{jb} = 30,1 \text{ } ^\circ\text{C/W}$;

Assim, substituindo os valores na equação têm-se:

$$T_j = \left(\frac{12,9 \cdot 0,345 \cdot 30,1}{12,9 + 30,1} \right) + \left(\frac{52 \cdot 12,9}{30,1 + 12,9} \right) + \left(\frac{56 \cdot 30,1}{30,1 + 12,9} \right)$$

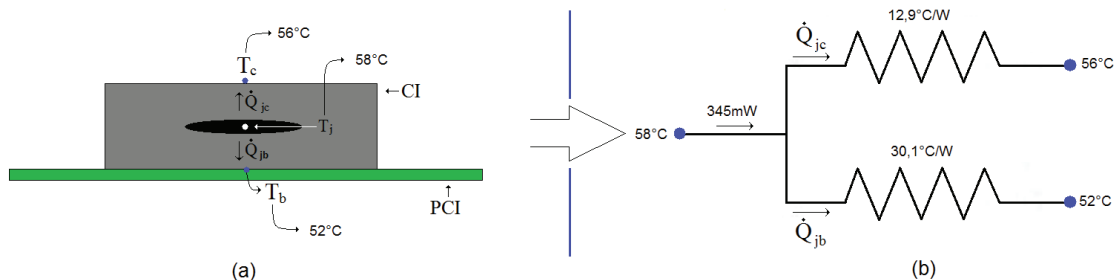
$$T_j = \left(\frac{133,96}{43,0} \right) + \left(\frac{670,8}{43,0} \right) + \left(\frac{1685,6}{43,0} \right)$$

$$T_j = (3,11) + (15,6) + (39,2)$$

$$T_j = 57,91^\circ\text{C} \cong 58^\circ\text{C}$$

Deste modo para este componente têm-se a seguinte situação mostrada na Figura 35 (a). Uma vez conhecidas a temperatura de junção, temperatura de case, temperatura de board, resistência térmica junção-case e a resistência térmica junção-board, é possível determinar o fluxo de calor do die do componente eletrônico para a superfície superior ($\dot{Q}_{jc}$) e o fluxo de calor do die do componente eletrônico para a superfície inferior ($\dot{Q}_{jb}$) através do modelo matemático mostrado na Figura 35 (b).

Figura 35 – Temperaturas, Case, Junção, Board do componente eletrônico 43 da Figura 31.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

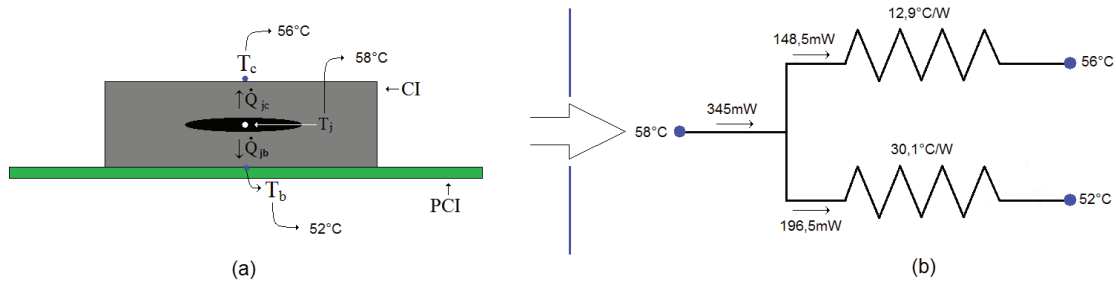
Para calcular $\dot{Q}_{jc}$ e $\dot{Q}_{jb}$ emprega-se as equações (1) e (2). Segue-se:

$$R_{jc} = \frac{T_j - T_c}{\dot{Q}_{jc}} \Rightarrow \dot{Q}_{jc} = \frac{T_j - T_c}{R_{jc}} \Rightarrow \dot{Q}_{jc} = \frac{57,9 - 56}{12,9} \Rightarrow \dot{Q}_{jc} = 0,1485$$

$$R_{jb} = \frac{T_j - T_b}{\dot{Q}_{jb}} \Rightarrow \dot{Q}_{jb} = \frac{T_j - T_b}{R_{jb}} \Rightarrow \dot{Q}_{jb} = \frac{57,9 - 52}{30,1} \Rightarrow \dot{Q}_{jb} = 0,1965$$

Agora com todas as propriedades calculadas, têm-se o modelo matemático completo apresentado na Figura 36.

Figura 36 – Modelo matemático completo para componente eletrônico 43 da Figura 31.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Com esse procedimento pode-se calcular todos esses parâmetros para todos os componentes que tenham em seus *datasheets* as informações de R_{jc} e R_{jb} . Estes cálculos não foram efetuados neste trabalho, pois o objetivo desta seção foi apresentar o método do cálculo da temperatura de junção, como exemplo, realizou-se o cálculo do componente eletrônico 43.

4.2 MÓDULO DE REDUNDÂNCIA E PROTEÇÃO DE ENERGIA

4.2.1 Teste experimental do MR

Este teste consistiu no funcionamento do MR fechado, identificação dos componentes aquecidos e medir a temperatura dos mesmos utilizando um módulo de aquisição de dados descrito no Anexo D.

No ensaio, todos os MRs do MRPE-14 estavam operando. Apenas um módulo de redundância situado na parte central da fileira superior foi monitorado. Verificou-se durante o funcionamento do MR, que apenas um componente eletrônico sofria

uma alteração térmica significativa, assim monitorou-se a temperatura desse componente além da temperatura ambiente. O sensor do módulo de aquisição de dados utilizado foi inserido na face superior do componente e para melhorar o contato entre ambos, empregou-se uma pequena quantidade de pasta térmica. As temperaturas foram medidas após sua completa estabilização. A Tabela 8 apresenta as temperaturas medidas em situação de regime permanente do equipamento.

Tabela 8 – Resultado do teste experimental com o MR.

Temperatura Ambiente [°C]	Temperatura do componente [°C]
27,0	49,0

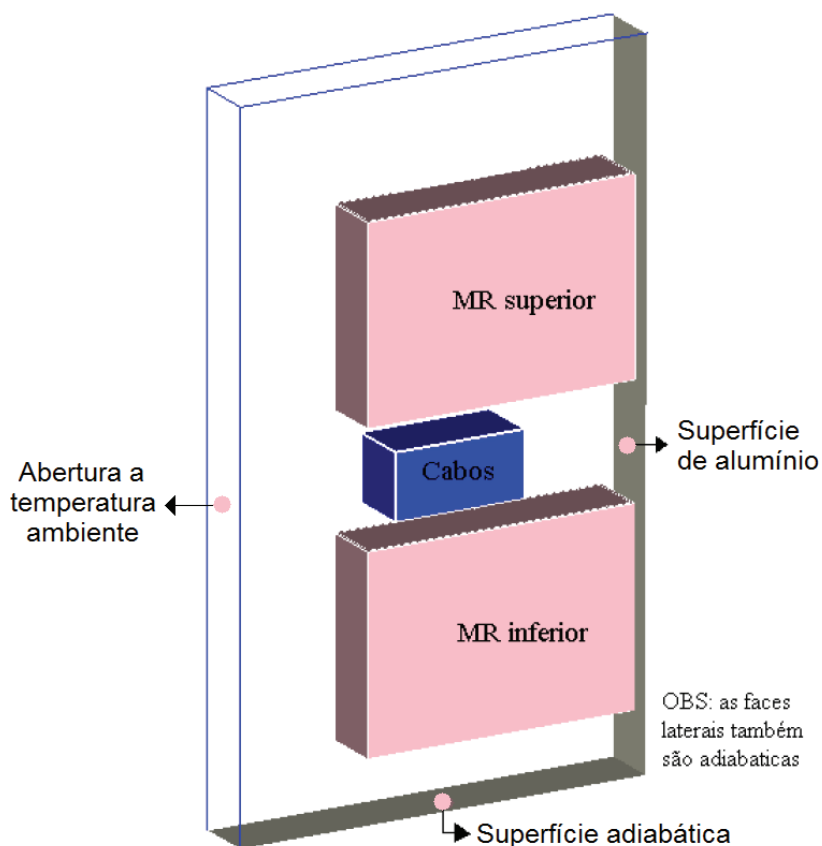
Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.2.2 Criação do modelo numérico do teste experimental com o MR e correlação

Essa seção descreve o modelo numérico desenvolvido. A execução dessa etapa foi possível devido aos recursos disponibilizados do laboratório de simulação numérica localizado no DEM/UNESP, particularmente as simulações numéricas empregando o software ANSYS. O modelo elaborado consistiu em reproduzir em detalhes o teste experimental com o MR descrito na seção 4.2.1 conforme mostrado na Figura 37. O modelo considera somente uma seção dos módulos de redundância do MRPE-14. Além disso, assumiu-se que as laterais dos MRs com vizinhos são equivalentes à paredes adiabáticas, em função do fluxo desprezível de calor nesta direção entre os MRs (aquecimento uniforme. Os MRs com vizinhos foram considerados no modelo pela suposição de que os mesmos são mais complexos do ponto de vista térmico dos que os MRs situados nas extremidades. A face frontal do volume de controle foi modelada como sendo uma abertura onde a temperatura do ar é a temperatura ambiente. Esta face está situada a uma distância dos MRs onde se garante que não existe nenhuma perturbação térmica. A face inferior também foi modelada por uma parede adiabática. Esta condição de contorno foi considerada para satisfazer as equações governantes do sistema e essa suposição é factível uma vez que nesta região não há perturbação térmica provocada pelos MRs. A face

superior foi modelada como sendo uma abertura e o campo de temperatura, de velocidade e de pressão serão calculados pelo software de simulação numérica.

Figura 37 – Modelo numérico do teste experimental com o MR.

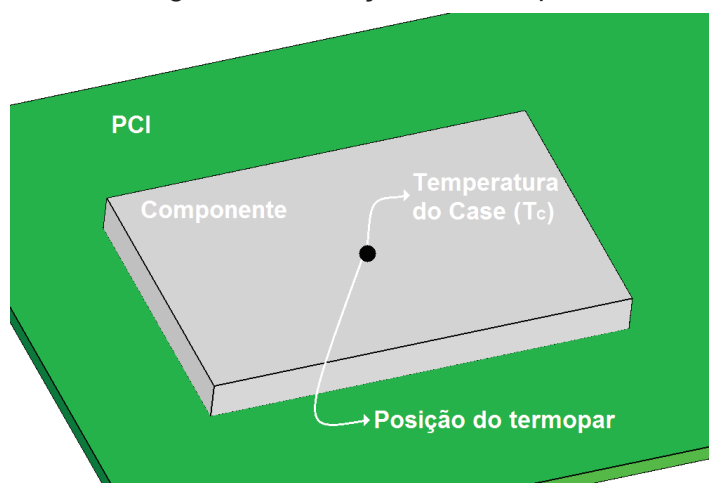


Fonte: Elaboração do próprio autor.

A correlação consistiu em adotar valor arbitrário de dissipação térmica para o componente do MR que aquece de maneira que a temperatura deste, fornecida pela simulação numérica fosse a mesma daquela registrada no teste experimental. A placa de circuito impresso e o componente foram modelados como blocos maciços. O material atribuído à placa de circuito impresso foi o FR4, para o componente o material especificado foi o alumínio e para o *box* o polietileno. As propriedades utilizadas destes materiais, foram as mesmas empregadas nas simulações numéricas com o equipamento RTWF. Tais valores podem ser encontrados na seção 4.1.2. O resultado obtido da simulação numérica dessa configuração, especificamente a temperatura do componente eletrônico em questão, foi

comparada com a do ensaio experimental descrito na seção 4.2.1. Em seguida uma nova simulação numérica foi realizada com o valor de dissipação térmica corrigido com o objetivo de igualar a temperaturas do componente da simulação numérica e do teste experimental. Isso foi feito aumentando a dissipação térmica do componente se sua temperatura estivesse abaixo daquela registrada no teste experimental, ou se fosse o caso, diminuindo a dissipação térmica do componente se o mesmo estivesse com a temperatura maior que aquela registrada no teste experimental. Esse procedimento foi repetido até que a temperatura do componente na simulação e no experimento fosse idêntica, conforme o resultado da Tabela 9.

Figura 38 – Posição do termopar.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na coluna “Potência dissipada” tem-se valor de dissipação térmica configurada na simulação numérica computacional com o software ANSYS para o componente eletrônico resultando na mesma temperatura obtida no ensaio experimental. A potência dissipada é “o parâmetro $\dot{Q}$ presente na equação (15). Este dado é essencial para o cálculo da temperatura de junção.

Tabela 9 – Resultado da correlação numérica com o MR.

Temperatura	Temperatura do	Temperatura do	Potência
-------------	----------------	----------------	----------

Ambiente [°C]	componente [°C] no teste experimental	componente [°C] na simulação numérica	dissipada [mW]
27,0	49,0	49,0	190

Fonte: Elaboração do próprio autor.

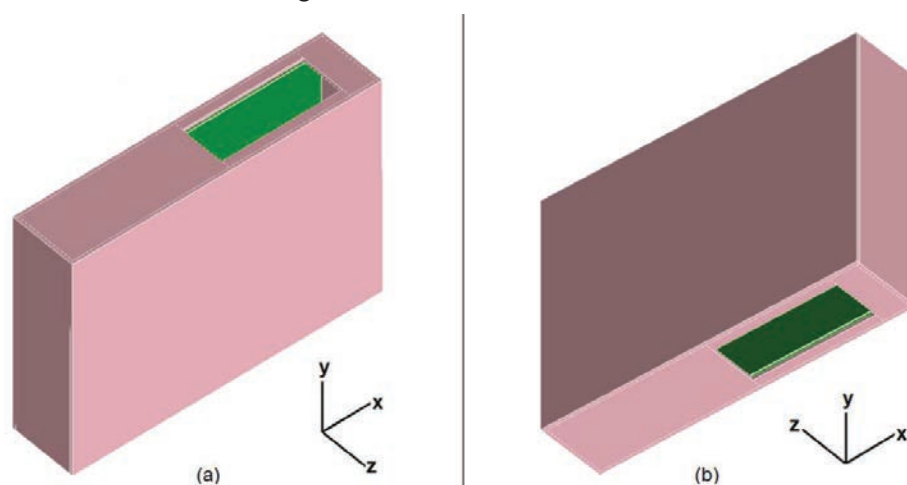
4.2.3 Validação do modelo numérico

Para o estudo realizado com o equipamento MR e MRPE-14, esta etapa do trabalho não foi realizada. Conforme descrito na etapa 3 da seção 3.1.1, este procedimento da metodologia de simulação térmica em equipamentos eletrônicos não é necessária. Na seção 3.1.1, ela foi realizada para o equipamento RTWF para verificar que a correlação numérica obtida pelo modelo numérico é adequada.

4.2.4 Simulação numérica do MRPE-14 com o MR remodelado

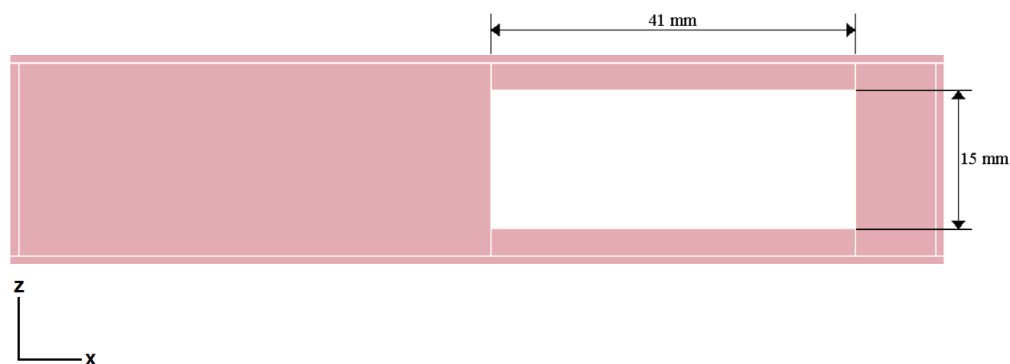
Esta é a etapa onde ocorre a extrapolação do modelo para o cenário desejado. Neste caso, obter os resultados térmicos do MR remodelado constituinte do MRPE-14. Conforme mencionado, o MRPE-14 é constituído por 14 MRs dispostos em duas fileiras, uma superior composta por 7 MRs e a outra inferior, também composta por 7 MRs. No caso analisado, apenas a fileira superior tem os MRs remodelados. O MR remodelado trata-se do mesmo MR estudado no teste experimental descrito na seção 4.2.1 e do modelo numérico descrito na seção 4.2.2, com uma modificação no *box* do MR. Esta alteração é uma abertura de 615 mm^2 na face superior e na face inferior do MR. Estas aberturas são idênticas nas duas faces. A Figura 39 (a) mostra a face superior remodelada do MR e em (b) a face inferior remodelada. A Figura 40 mostra os detalhes mecânicos do MR remodelado.

Figura 39 – MR remodelado.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

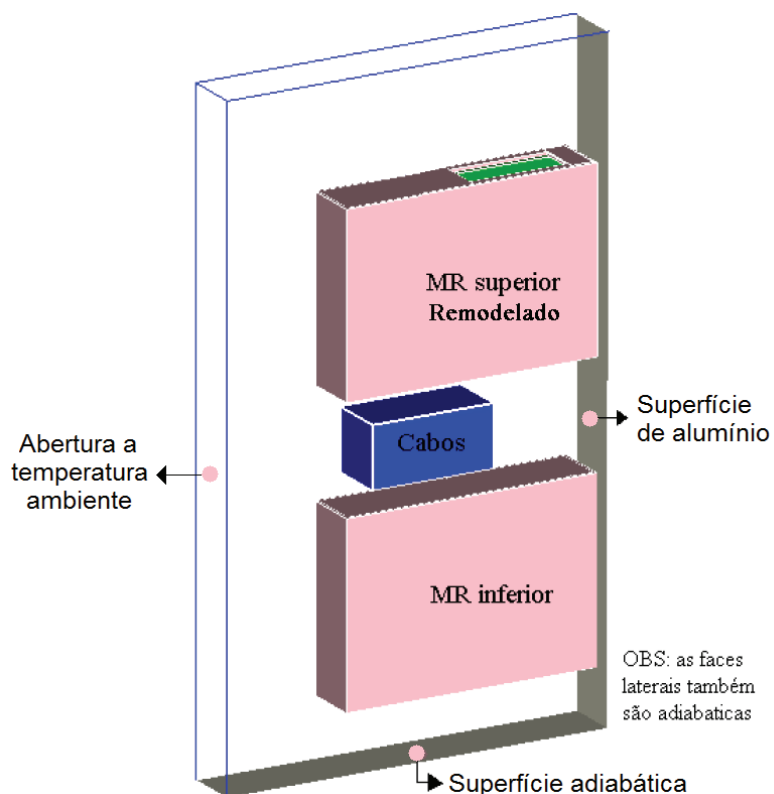
Figura 40 – Detalhes mecânicos do MR remodelado.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Conforme pode ser observado no modelo numérico, Figura 41, apenas uma parte da seção dos módulos de redundância do equipamento MRPE-14 foi modelada. Com exceção do remodelamento dos MRs da fileira superior, o modelo numérico utilizado para esta simulação foi o mesmo daquele descrito na seção 4.2.2.

Figura 41 – Modelo numérico do teste experimental com o MR remodelado.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A dissipação térmica do componente que aquece no interior dos MRs foi de 190 *mW*. Este valor foi considerado em razão da dissipação térmica obtida através da correlação numérica descrita na seção 4.2.2. Os materiais atribuídos à PCI, ao componente e ao *box*, foram os mesmo da simulação do MRPE-14 com os MRs originais. A Tabela 10 mostra o resultado da simulação numérica com essa configuração.

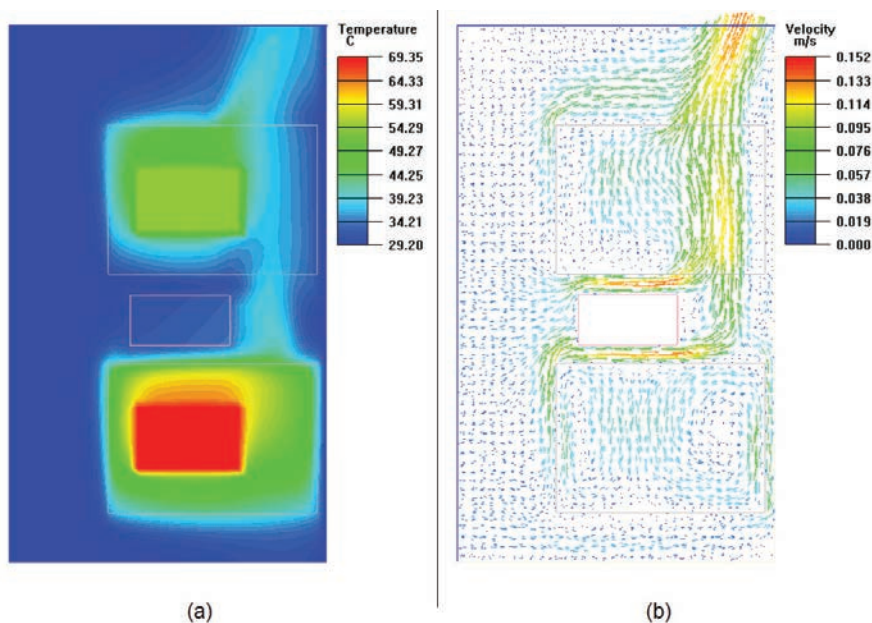
Tabela 10 – Resultado da simulação numérica do MRPE-14 com apenas os MRs da fileira superior remodelados.

Temperatura Ambiente [°C]	Temperatura do componente [°C] na fileira superior	Temperatura do componente [°C] na fileira inferior
29,2	57,5	69,9

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Além da Tabela 10, a Figura 42 mostra o resultado do campo de temperatura e do campo vetorial de velocidades. Em (a) tem-se o campo de temperatura e em (b) tem-se o campo vetorial de velocidades.

Figura 42 – Campo de temperatura e campo de vetorial de velocidades da simulação numérica do MRPE-14 com apenas os MRs da fileira superior remodelados.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.2.5 Teste experimental com MRPE-14 com o MR remodelado

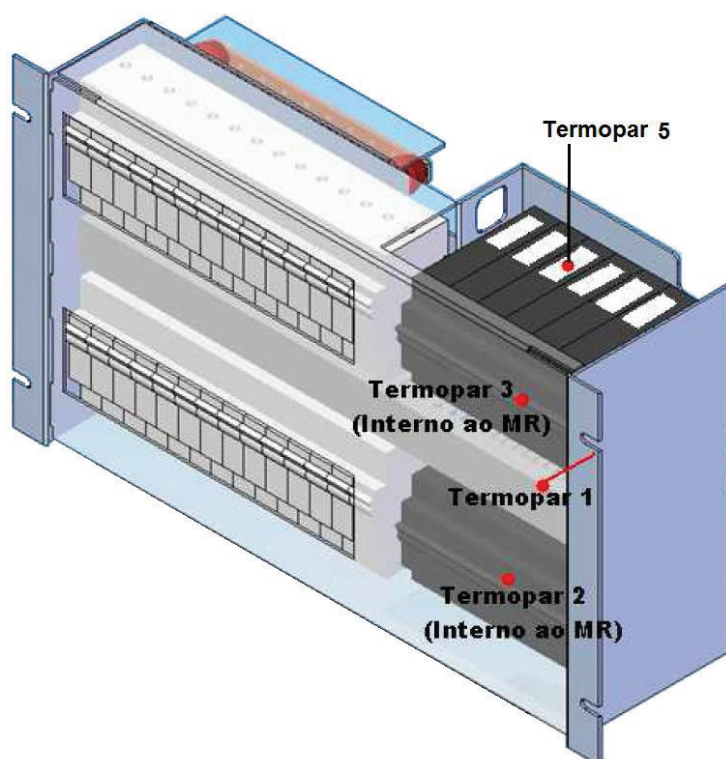
Conforme mencionado no item 5 da seção 3.2.1, com o propósito de verificar se os resultados da simulação numérica com o equipamento MRPE-14 com o MR remodelado é factível, realizou-se um ensaio experimental. Para este procedimento, todos os MRs, no caso 7, da fileira superior do MRPE-14 foram remodelados. Este remodelamento trata-se da abertura na face superior e na face inferior do MR. Estas aberturas são idênticas nas duas faces. A Figura 39 em (a) mostra a face superior remodelada do MR e em (b) a face inferior remodelada. A Figura 40 mostra os detalhes mecânicos do MR remodelado. Assim têm-se a fileira superior do MRPE-14 com os MRs remodelados e na fileira inferior como os MRs originais. Este teste experimental foi realizado de modo a representar a simulação numérica descrita na

seção 4.2.4. Para medir a temperatura dos componentes eletrônicos empregou-se o termômetro digital descrito no Anexo D. A Figura 43 mostra a posição dos termopares utilizados para o teste experimental. O termopar 1 foi utilizado para obter a leitura da temperatura ambiente, o termopar 2 foi empregado para medir a temperatura do componente eletrônico na fileira inferior do MRPE-14. O MR monitorado está na posição central dos 7 existentes na fileira inferior. Empregou-se o termopar 3 para medir a temperatura do componente eletrônico na fileira superior do MRPE-14. O MR monitorado está no meio dos 7 existentes na fileira superior. O termopar 5 mediu a temperatura do ar na saída de ar da abertura localizada na face superior do terceiro MR da esquerda para a direita da fileira superior do MRPE-14, conforme pode ser identificado na Figura 43. O termopar 4 não está identificado na Figura 43, mas mediu a temperatura do ar na entrada da abertura da face inferior do mesmo MR que foi inserido o termopar 5.

Os resultados deste teste são apresentados na Tabela 11. A coluna média identifica à média aritmética de todas as leituras. Esta média foi calculada utilizando a equação (21).

$$Média = \frac{\sum_{i=1}^{N^{\circ} \text{ de leituras}} \text{Valor da leitura } (i)}{N^{\circ} \text{ Total de Leituras}} \quad (21)$$

Figura 43 – Localização e identificação dos termopares.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 11 – Resultado do ensaio experimental do MRPE-14 com os MRs remodelados da fileira superior

Medidas	1ª Leitura	2ª Leitura	3ª Leitura	4ª Leitura	5ª Leitura	6ª Leitura	7ª Leitura	Média
Temp. Ambiente	29,60	30,60	29,80	30,30	27,30	28,20	28,30	29,16
Temp. MR Inferior	69,70	70,00	70,00	70,00	69,90	70,00	69,90	69,93
Temp. MR Superior	57,40	57,90	57,90	57,90	57,20	57,40	56,90	57,51
Temp. Abertura Inferior	46,90	47,00	47,10	47,00	46,60	47,30	46,50	46,91
Temp. Abertura Superior	54,60	55,40	55,40	55,50	54,00	54,50	53,70	54,73

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Após o início do funcionamento do MRPE-14 as temperaturas foram monitoradas até operarem em regime (aproximadamente 1 hora e 30 minutos), a seguir mediu-se o conjunto de temperaturas associado aos termopares, isso repetiu-se por 7 vezes em intervalos de 10 minutos. O tempo total do ensaio foi aproximadamente 2 horas e 30 minutos.

A Tabela 12 mostra um comparativo entre o resultado numérico e o resultado experimental do MRPE-14 com os MRs remodelados da fileira superior. Existe também nesta tabela uma coluna “erro relativo”, esta coluna diz respeito à diferença dos resultados numérico e experimental e os valores foram calculados utilizando a equação (16). Por fim, também é apresentado nesta tabela o erro médio relativo, este foi calculado utilizando a equação (17).

Conforme pode ser visto na Tabela 12, o erro relativo entre o modelo numérico e o experimental para o MR inferior é praticamente inexistente. Para o MR superior o erro é em torno de 3°C. Esses podem ser considerados bons resultados, assim mais uma vez o método de simulação térmica mostrou-se eficaz.

Tabela 12 – Comparativo entre o resultado numérico e o resultado experimental do MRPE-14 com os MRs remodelados da fileira superior.

	Simulação Numérica	Ensaio Experimental	Erro Relativo [%]
Temperatura do MR Superior [°C]	54,55	57,51	5,1
Temperatura do MR Inferior [°C]	69,35	69,93	0,8
Erro médio relativo			2,9

Fonte: Elaboração do próprio autor.

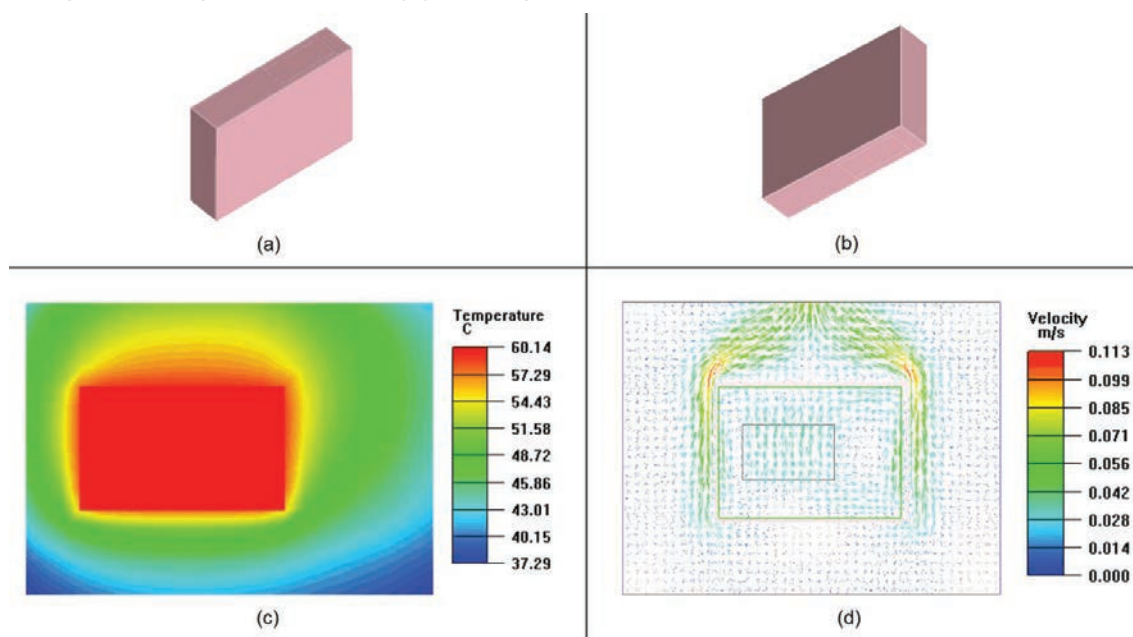
4.2.6 Outras simulações numéricas analisadas com MRPE-14

Essa seção não faz parte da metodologia de simulação térmica em equipamentos eletroeletrônicos apresentada neste trabalho, a mesma foi incluída para descrever as vantagens de se obter um modelo numérico correlacionado. Com a correlação, é possível extrapolar a análise para outros cenários e examinar várias

implementações para um determinado problema. Deste modo, a equipe de desenvolvimento pode analisar estas implementações e escolher qual delas é a mais adequada para atender às necessidades do produto.

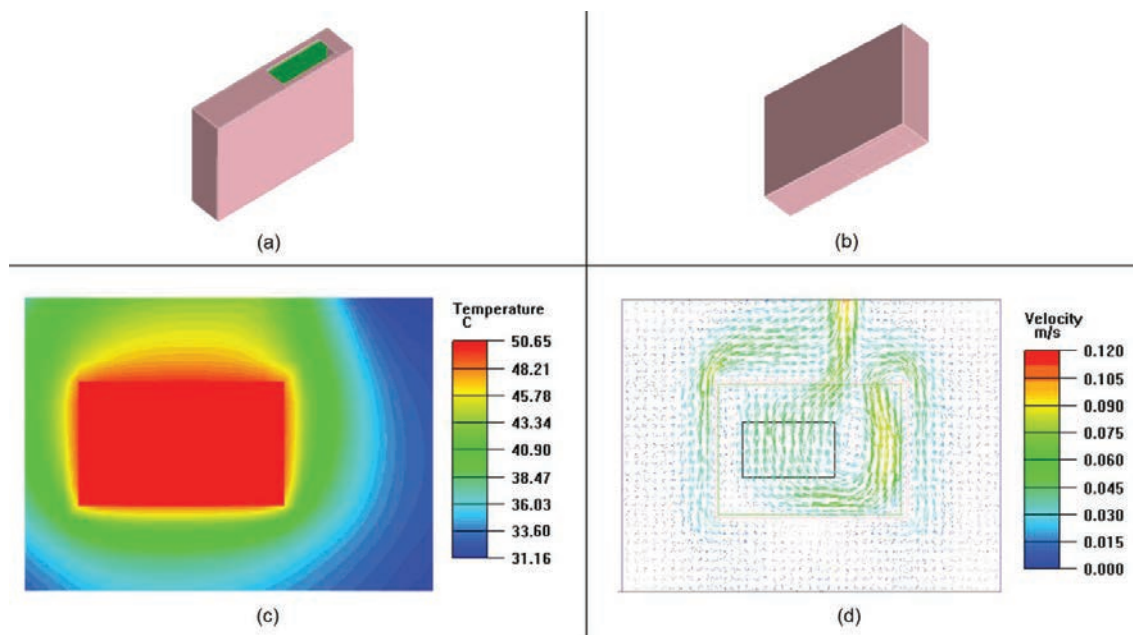
Como exemplo da “análise de implementações” citada no paragrafo anterior, têm-se respectivamente nas Figuras 44, 45, 46 e 47, algumas configurações diferentes do *box* do MR. Para cada implementação é possível verificar o modelo do *box* utilizado e seu resultado. Em seguida, é apresentada a Tabela 13 com o resumo destes quatro cenários analisados e as vantagens e desvantagens do ponto de vista térmico e mecânico do MR com as alterações sugeridas pelas simulações.

Figura 44 – Resultados da simulação numérica com o MR sem aberturas. Em (a) têm-se a vista isométrica, em (b) têm-se a vista isométrica invertida, em (c) têm-se o campo de temperatura e em (d) o campo vetorial de velocidades.



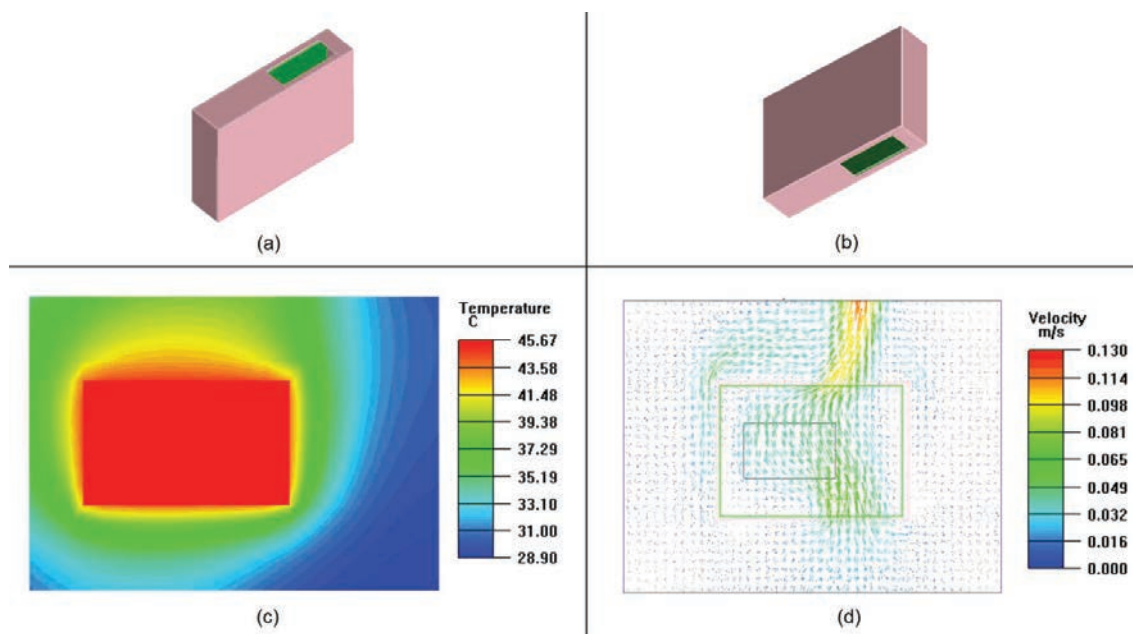
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 45 – Resultados da simulação numérica com o MR com abertura na face superior. Em (a) têm-se a vista isométrica, em (b) têm-se a vista isométrica invertida, em (c) têm-se o campo de temperatura e em (d) o campo vetorial de velocidades.



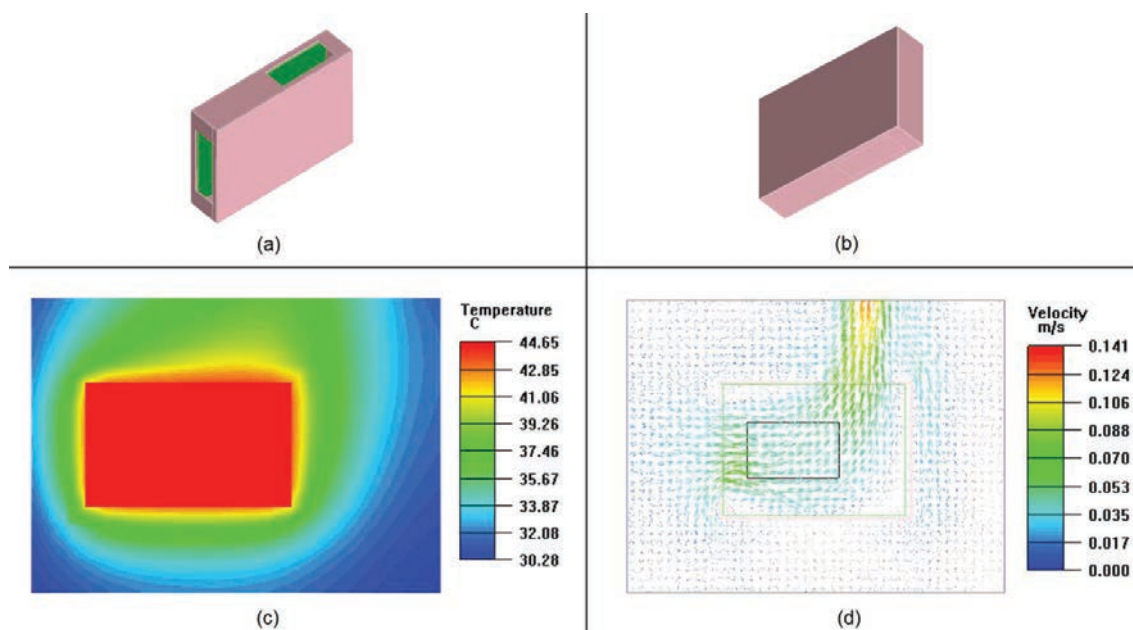
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 46 – Resultados da simulação numérica com o MR com abertura na face superior e face inferior. Em (a) têm-se a vista isométrica, em (b) têm-se a vista isométrica invertida, em (c) têm-se o campo de temperatura e em (d) o campo vetorial de velocidades.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 47 – Resultados da simulação numérica com o MR com abertura na face superior e face frontal. Em (a) têm-se a vista isométrica, em (b) têm-se a vista isométrica invertida, em (c) têm-se o campo de temperatura e em (d) o campo vetorial de velocidades.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 13 – Resumo dos resultados dos quatro cenários analisados com o MR e vantagens e desvantagens do ponto de vista mecânico do MR.

Modelo	Temperatura máxima [°C]	Vantagem	Desvantagem
Sem abertura	60,15	Não necessita de retrabalho	Alta temperatura
Abertura na face superior	50,65	Fácil implementação	Baixo ganho térmico
Abertura na face superior e na face inferior	45,68	Fácil implementação e ganho térmico	--
Abertura na face superior e na face frontal	44,65	Ganho térmico	Difícil implementação

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Assim, com o conhecimento das informações apresentadas na Tabela 13, a equipe de desenvolvimento poderá optar pela solução obtida com o cenário no *box* do MR, abertura na face superior e na face inferior, pois esta situação é a mais vantajosa, sendo de fácil implementação e grande redução da temperatura no MR.

5 DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

A discussão desta proposta está baseada nos resultados obtidos nos dois estudos de caso onde a metodologia de simulação térmica em equipamentos eletroeletrônicos foi aplicada.

Para o equipamento RTWF, a correlação foi obtida entre o teste experimental e simulação numérica na configuração com o *box* aberto. Estas duas análises são detalhadamente descritas nas seções 4.1.1 e 4.1.2. Nesta correlação, a dissipação de calor foi de 1845 mW. Este valor é factível, pois o equipamento possui um consumo nominal de 10 W, ou seja, aproximadamente 20% de toda energia consumida pelo roteador é transformada em calor.

A correlação numérica proposta, por duas abordagens diferentes, forneceu resultados muito promissores. A primeira abordagem comparou as temperaturas dos componentes entre a simulação numérica e teste experimental no cenário com o RTWF com o *box* fechado. Estas duas análises são detalhadamente descritas nas seções 4.1.3 e 4.1.4. Os erros dos resultados da simulação numérica e do ensaio experimental foram pequenos, conforme a Tabela 4. Por exemplo, para o componente “25” a temperatura obtida na simulação numérica foi 65°C e no teste experimental foi 65,5°C. Isto representa um erro relativo de 0,7%. A tabela apresenta também o erro médio relativo, 3,26%. Este valor indica que para este caso, o método de simulação através da correlação numérica mostrou-se eficaz.

A segunda abordagem comparou as temperaturas dos componentes entre a simulação numérica e teste experimental no cenário com o RTWF resinado. Estas duas análises são detalhadamente descritas nas seções 4.1.6 e 4.1.7. Para esta análise, com base nos resultados obtidos através das simulações numéricas, a troca do ar pela resina dentro do *box* reduz a temperatura nos componentes do equipamento, este fenômeno também pode ser observado no teste experimental. Na análise há duas situações:

- O ar é um excelente isolante térmico ($0,0261 \text{ W/m} \cdot \text{K}$), mas por se tratar de um fluido, não está parado. Deste modo ocorre transferência de calor por convecção entre os componentes e o ar (através de correntes convectivas), ou seja, o ar

está todo o tempo trocando calor com os componentes por convecção e nunca por condução.

- A resina possui uma condutividade térmica 13 vezes maior que a do ar ($0,35 \text{ W/m} \cdot \text{K}$), mas após a cura a resina se torna sólida, e por este motivo não existe transferência de calor por convecção, somente por condução.

As simulações mostram que o processo de transferência de calor por condução da resina é mais eficaz que o processo de transferência de calor por convecção do ar. A resina distribui a temperatura de forma a reduzir a temperatura dos componentes mais aquecidos em cerca de 30% e aquecer os componentes mais frios em até 6,5%. Isto faz sentido, pois a resina retira calor dos componentes mais aquecidos e cria um ambiente mais uniforme. Se a resina utilizada for mais condutiva, este fenômeno será mais acentuado.

Os resultados obtidos no teste experimental confirmam o comportamento da resina. A temperatura diminuiu, mas com uma redução um pouco menor do que a observada na simulação. Isto se deve ao fato de que na simulação, o preenchimento dos espaços livres dentro do equipamento pela resina é total, isto é sem bolhas, já no teste experimental, por mais que se tenha cuidado na aplicação da resina, em função da sua viscosidade, é praticamente impossível o preenchimento de todos os espaços ao contrário do ar. Apesar disso, a Tabela 7 mostra resultados promissores empregando o método de simulação térmica proposto. Para o componente 18 praticamente não houve erro e o maior erro obtido, em torno de 14%, foi para o componente 24. O erro médio foi aproximadamente 8%.

Além disso, na seção 4.1.8, foi descrito a forma do cálculo da temperatura de junção. Para o caso usado de exemplo, o T_c , T_b e T_j foram respectivamente 56°C , 52°C e 58°C . Também determinou-se o fluxo de calor Junção-Case e o fluxo de calor Junção-Board. Todos esses parâmetros são importantes e auxiliam o projeto durante o ciclo de desenvolvimento do equipamento.

Para o equipamento MRPE-14, a correlação do método proposto, foi obtida entre o teste experimental e simulação numérica no cenário com o *box* sem aberturas. Estas análises são detalhadamente descritas nas seções 4.2.1 e 4.2.2. Nesta correlação, a dissipação de calor foi de 190 mW. Este valor é factível, pois

este equipamento possui um consumo nominal de 2 W, ou seja, aproximadamente 10% de toda energia consumida pelo MR é transformada em calor.

A correlação numérica proposta forneceu resultados muito promissores. Estes resultados foram obtidos comparando a temperatura do componente entre a simulação numérica e o teste experimental com o MRPE-14 com os sete MRs da fileira superior remodelados. Estas análises são detalhadamente descritas nas seções 4.2.4 e 4.2.5. Os erros dos resultados da simulação numérica e do ensaio experimental foram pequenos, conforme a Tabela 12. Por exemplo, para o componente aquecido situado no MR da fileira superior monitorado, a temperatura obtida na simulação numérica foi 54,5°C e no teste experimental foi 57,5°C. Isto representa um erro relativo de 5%. A tabela apresenta também o erro médio relativo, 2,9%. Este valor indica que para este caso, o método de simulação através da correlação numérica mostrou-se eficaz.

Com relação à temperatura de junção para este equipamento, o cálculo não foi realizado, pois o componente que aquece dentro do MR é uma fonte DC/DC similar a aquela apresentada no *datasheet* em Anexo F. Conforme a informação contida no *datasheet*, a recomendação é determinar a temperatura do case, T_c . Neste caso esta informação é obtida diretamente da simulação numérica, não sendo necessário cálculo da temperatura de junção, T_j .

Algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Os resultados apresentados pelo método de simulação térmica proposto são muito promissores. Para comprovar isso, a metodologia foi aplicada em dois equipamentos eletrônicos diferentes, o RTWF e o MR, porém novas análises em equipamentos diferentes são necessárias para verificar a funcionalidade do método de simulação térmica. Nestes novos testes um número maior de componentes deverão ser monitorados.
- Os dois equipamentos analisados na proposta não tratam de problemas de convecção forçada. Novas análises devem ser realizadas com equipamentos com ventiladores ou blowers.
- Seria interessante verificar a melhora ou não desta metodologia usando técnicas de modelagem de condutividade térmica efetiva para a PCI, tais como aquelas apresentadas por Shabany (2002).

- Usar réplicas térmicas para se conhecer a potência térmica dissipada e analisar a verdadeira potência de dissipação com aquela obtida através da correlação numérica. Esta sugestão é importante para verificar a confiabilidade da equação (15) apresentada nesta tese para o cálculo da temperatura de junção.

REFERÊNCIAS

ENGINEERING SIMULATION AND SCIENTIFIC SOFTWARE - ESSS. **Predição de falhas em componentes eletrônicos**. [S. l.], 2008. Disponível em:

<<http://www.esss.com.br/blog/2008/08/predicao-de-falhas-em-componentes-eletronicos/>>. Acesso em: 01 jul. 2014.

RUBIRA, L. H. **Análise térmica em placas de circuito impresso**. Curitiba: [s. n.], 2007. Disponível em:

<<ftp://ftp.ifes.edu.br/cursos/Eletrotecnica/Cassoli/Manuten%E7%E3o%20EI%E9trica/artigos%20tecnicos/termografia/>>. Acesso em: 03 jan. 2013.

SOUSA, R. R. **Análise numérica e experimental na determinação da potência térmica dissipada em componentes eletrônicos**. 2008. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

TEXAS INSTRUMENTS. **Using thermal calculation tools for analog components**. [S. l.], 2010. Disponível em:

<<http://www.ti.com/lit/an/slua566/slua566.pdf>>. Acesso em: 01 fev. 2013

COSTA, R. L. **Estudo teórico e experimental da condutividade térmica efetiva de placas de circuito impresso para aplicações espaciais**. 2012. 221 f.

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

FALCÃO, E. F. C. A. **Modelação térmica de placas de circuito impresso**. 2014. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Campus de Azurém, 2014.

DIGI-KEY ELETRONICS. **Detalhe de produto**. Thief River Falls, 2014. Disponível em: <<http://www.digikey.com/product-detail/en/KA78L05AIDTF/KA78L05AIDTFCT-ND/3907927>>. Acesso em: 01 jul. 2014.

PRACTICAL COMPONENTS. **Modelos de componentes**. Los Alamitos, 2015.

Disponível em: <<http://www.practicalcomponents.com/Dummy-Components>>.

Acesso em: 01 jul. 2015.

CPU WORLD. **Especificações**. [S. l.], 2015. Disponível em: <<http://www.cpu-world.com/CPUs/Celeron/>>. Acesso em: 01 jul. 2015.

ELNEC. **Produtos**. New York, 2015. Disponível em:

<<http://www.elnec.com/products/programming-adapters/s/>>. Acesso em: 01 jul. 2015

SHABANY, Younes. **Heat transfer: thermal management of electronics**. Londres: CRC Press, 2010. v. 1, p. 491.

365ELE. **Componente com encapsulamento tipo QFP com 44 terminais**. [S. l.: s. n.], 2014. Disponível em: <<http://www.365ele.com>>. Acesso em: 01 jul. 2014

PIN GRID ARRAY. In: WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. Flórida: Wikimedia Foundation, 2015. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Pin_grid_array&oldid=42470084>. Acesso em: 01 jun. 2015.

SHABANY, Y. **Component size and effective thermal conductivity of printed circuit boards**. Amstersam: IEEE Inter Society Conference on Thermal Phenomena, 2002.

BEJAN, A. **Advanced engineering thermodynamics**. 2. ed. New York: [s.n.], 1997. 540 p.

SHABANY, Y. **Heat transfer: thermal management of electronics**. Londres: CRC, 2010. v. 1, p. 491

BEJAN, A. **Transferência de calor**. São Paulo: Edgard Blücher, 2004. 434 p.

BERTULANI, C. A. **A história da eletrônica**. [S. l.: s.n., 2000]. Disponível em: <<http://www.if.ufrj.br/teaching/eletronica/texto2.html>>. Acesso em: 12 nov. 2008.

FOX, R. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006. 816 p.

INCROPERA; F. P.; Dewitt, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 664 p.

BEJAN, A.; KRAUS, A. D. **Heat transfer handbook**. New Jersey: John Wiley and Sons, 2003. 1477 p.

MOLKI, M. **Temperature of in-line array of electronic components simulated by rectangular blocks**. [S. l.: s.n.], 2000. Disponível em: <<http://www.electronics-cooling.com/2000/05/temperature-of-in-line-array-of-electronic-components-simulated-by-rectangular-blocks/>>. Acesso em: 12 nov. 2008.

NAKAMURA, S. **Applied numerical methods in C**. New Jersey: [s.n.], 1992. 604 p.

WHITE, F. M. **Fluid mechanics**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2001. 331 p.

OKURA. **Metodologia de qualificação de componentes eletrônicos**. Campinas: [s.n.], 1995. Disponível em: <<http://libdigi.unicamp.br/document/?code=vtls000096635>>. Acesso em: 12 nov. 2008.

RAMOS. **Estudo da resistência térmica de contato no fechamento de sub-bastidores de equipamentos de transmissão digital**. Campinas: [s.n.], 1991. Disponível em:

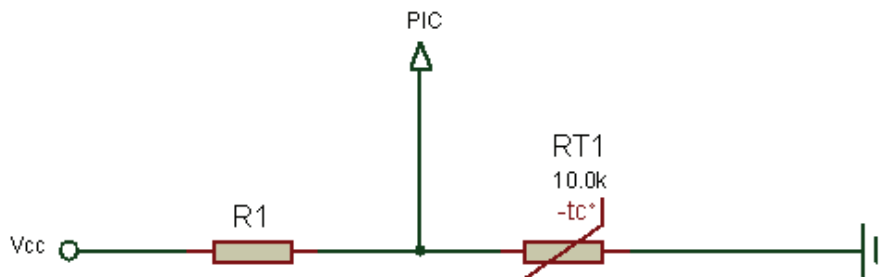
<<http://libdigi.unicamp.br/document/?code=vtls000042390>>. Acesso em: 12 nov. 2008.

TANG, W.; GHAJAR, A. J. Experimental study of conjugate heat transfer in a horizontal channel with discrete heated cubic blocks. **American Society of Mechanical Engineers. Heat Transfer Division. Publication HTD**, New York, v. 343, p. 91-102, 1997.

ANEXO A – Módulo de aquisição de dados

O NTC é um resistor que muda o valor de sua resistência elétrica com a temperatura. Geralmente o NTC possui uma tabela de calibração no *datasheet*, ou pode-se realizar uma calibração, que foi o caso neste trabalho. A curva de calibração pode ser vista no gráfico da Figura 49. Neste caso, a 25°C foi utilizado uma resistência de 10K e um simples circuito divisor de tensão conforme mostrado na Figura 48, alimentado por 5V. A variação de tensão foi registrada usando um microcontrolador. A maioria dos termômetros digitais usa NTC. Os sensores de temperatura nos automóveis são NTCs, mas estão dentro do invólucro de bronze. É possível geralmente realizar a leitura de temperatura com eles através de controladores de temperatura industriais, ou qualquer circuito eletrônico que possua um ADC, (conversor analógico digital). Existem NTCs nos mais variados tamanhos e invólucros.

Figura 48 – Circuito divisor de tensão

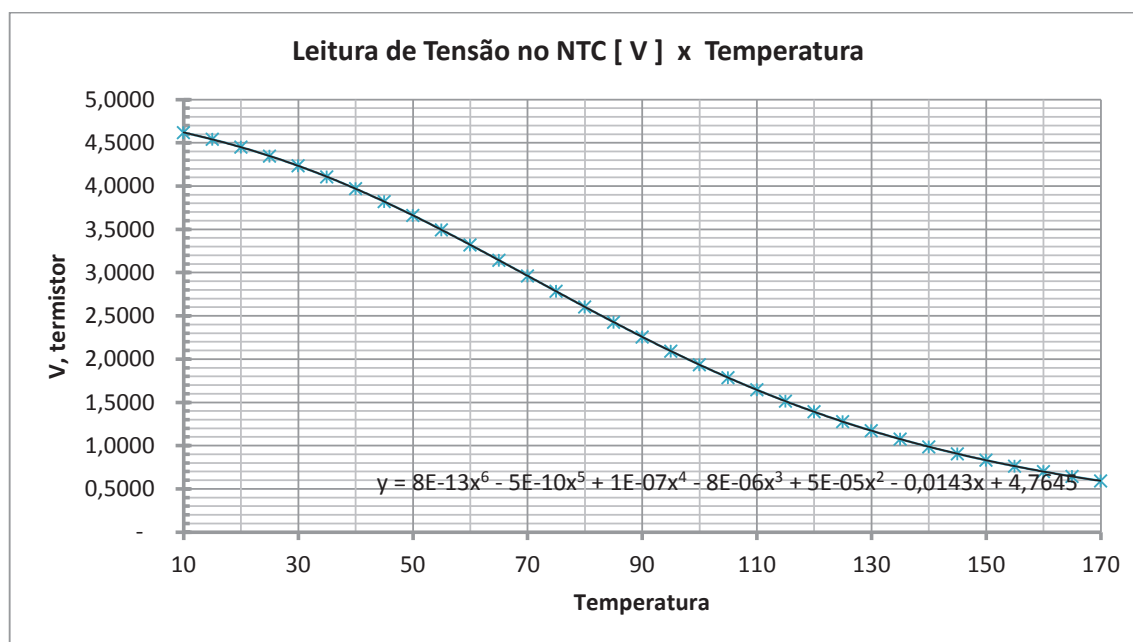


Fonte: Elaboração do próprio autor.

A equação para a tensão no NTC pode ser calculada aplicando a lei de Ohm no circuito apresentado na Figura 48. O resultado disso é a equação (22).

$$V_{NTC} = \frac{V_{Total}}{R_1 + R_{NTC}} \cdot R_{NTC} \quad (22)$$

Figura 49 – Curva de calibração do NTC



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Anexo B – Fonte de Alimentação

A fonte de alimentação simétrica DC digital Minipa MPL-3303R é um equipamento digital de bancada, com quatro displays de 3 dígitos (duas de tensão e duas de corrente), capaz de fornecer duas saídas variáveis com tensão de 0 a 30V DC e corrente de 0 a 3A DC, e uma saída fixa de 5V / 3A DC. Possui proteção de sobrecarga e inversão de polaridade, e as duas saídas variáveis podem ser ligadas em série ou paralelo através do painel frontal. Veja Figura 50.

Figura 50 – Fonte de alimentação simétrica DC digital Minipa MPL-3303R



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Características Técnicas:

- Alta estabilidade e baixo ripple.
- Duplo display LCD de fácil leitura para apresentação simultânea da tensão e corrente de saída.
- Saídas Variáveis: 0 ~ 30V DC / 0 ~ 3A DC (2 Fontes Independentes).
- Saída Fixa: 5V / 3A.
- Ajuste da tensão e corrente através de um potenciômetro de precisão.
- Configuração dos modos série, paralelo e simétrica através do painel frontal (tracking).

- Possibilidade de operação contínua mesmo nas condições de máxima carga.
- Resfriamento com ventilação forçada.
- Circuito de proteção de sobrecarga.
- Proteção de inversão de polaridade.
- Isolação entre Chassis e Terminal de Saída: $\geq 20\text{MOaHMS}$ (500V DC).
- Isolação entre Chassis e Cabo AC: $\geq 100\text{MOaHMS}$ (500V DC).
- Ambiente de Operação: $0 \sim 40^{\circ}\text{C}$, $\text{RH} < 80\%$.
- Ambiente de Armazenamento: $-10^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$, $\text{RH} < 85\%$.
- Alimentação: 110 / 220V AC $\pm 10\%$, 50 / 60Hz selecionável.
- Consumo: 450W Máximo.
- Uso interno.
- Altitude: 2000m (máximo).
- Grau de Poluição: 2.
- Dimensões: 160(A) x 270(L) x 320(P)mm.
- Peso: Aprox. 8kg.

Operação Tensão Constante

- Tensão de Saída: 0~30V (continuamente ajustável)
- Regulação de Linha: $\leq \pm(0,05\%+5\text{mV})$
- Regulação de Carga: $\leq \pm(0,05\%+5\text{mV})$
- Ripple & Ruído: $\leq 1\text{mV RMS}$ (5Hz - 1MHz)

Operação Corrente Constante

- Corrente de Saída: 0~3A (continuamente ajustável)
- Regulação de Linha: $\leq \pm(0,1\%+5\text{mA})$
- Regulação de Carga: $\pm 20\text{mA}$
- Ripple e Ruído: $\leq 1\text{mA RMS}$

Mostrador

- Digital: LCD 3 dígitos
- Precisão: $\leq (1,0\% \text{ Leit.} + 2 \text{ Díg.})$
- Resolução de Tensão: 20mV
- Resolução de Corrente: 30mA

Saída Fixa de 5V

- Regulação de Carga: $\leq \pm(3,0\%+5\text{mV})$
- Corrente de Saída: 3A
- Ripple e Ruído: $\leq 1.5\text{mV RMS}$ (variação de linha $\pm 5\%$)
- Precisão Tensão de Saída: $5 \pm 3,0\%$

Tracking

- Erro de Tracking: $\pm 1,0\%$

ANEXO C – Resina Epóxi

Resina epóxi para encapsulamento modelo “SQ 2119”.

Apresentação

A resina SQ 2119 foi desenvolvida para encapsulamentos eletroeletrônicos. Possui as seguintes características:

- Facilidade de processamento; baixa exotermia.
- Contração ínfima; não libera subprodutos.
- Excelentes propriedades dielétricas com alta isolamento.
- Resistência química elevada, especialmente ao intemperismo e umidade.
- Estabilidade aos ciclos térmicos.
- Excelente adesão, alta dureza, resistente a impactos, abrasão e ações mecânicas.
- Cor preta; sob encomenda pode ser produzido nas cores branco ou vermelho óxido.
- Polímero termofixo.

Características

A Tabela 14 mostra as propriedades da resina epóxi para encapsulamento modelo SQ 2119. Esta resina é utilizada juntamente com um endurecedor que tem a função de propiciar a cura da resina. Neste trabalho a resina foi utilizada juntamente com o endurecedor modelo “SQ 3131”.

Tabela 14 – Propriedades da Resina Epóxi para Encapsulamento modelo SQ 2119.

	Endurecedor SQ 3131	Endurecedor SQ 3140	Endurecedor SQ 3154
Proporção de mistura a cada 100g de SQ 2119	12g	25 a 30 g	25 g
Temperatura de manipulação(°C)	18 a 25	18 a 40	18 a 30
Tempo de uso da mistura (gel time) a 20°C, 100g	15 minutos	50 minutos	30 minutos
Endurecimento da mistura (100g, 20°C)	40 minutos	04 horas	80 minutos
Cura total (100 ml, 20°C, 65%	24 horas	72 horas	48 horas

U.R.)			
Peso Específico da mistura, g/cm ³	1,50 +/- 0,05	1,47 +/- 0,05	1,47 +/- 0,05
Viscosidade da mistura, 20°C, cPs	10.000 ± 2.000	15.000 ± 2.000	7.000 ± 2.000
Quantidade máxima de mistura a ser usado por peça	Máximo 120 gramas	Máximo 10,0 quilos	Máximo 250 gramas

Fonte: Silaex (2013).

Propriedades do sistema curado

A Tabela 15 mostra as propriedades da resina epóxi para encapsulamento modelo SQ 2119 após a cura.

Tabela 15 – Propriedades da Resina Epóxi para Encapsulamento modelo SQ 2119 após cura total

Condutibilidade Térmica (kcal/m.h °C) DIN 52612	0,27 a 0,32
Resistividade Volumétrica (ohm.cm) VDE 0303 20°C 90°C	5,0 x 10 ¹⁵ 1,22 x 10 ¹⁵
Rigidez Dielétrica (KV/mm) VDE 0303 (1 min. a 50 Hz 20°C)	30 a 40
Classe térmica	B (130°C) – F (155°C)
Dureza Barcol GYZJ 934-1	Mín. 13 (aprox. 83 Shore D)
Solubilidade após 07 dias de cura	Insolúvel em água, etanol, aguarrás, querosene, diesel, gasolina.

Fonte: Silaex (2013).

Manuseio

É necessário homogeneizar muito bem a resina antes de se retirar qualquer quantidade devido a decantação das cargas. No caso de se usar o endurecedor SQ 3140, após a mistura, o sistema deverá permanecer em repouso de 10 a 15 minutos, antes de aplicar se o volume total for inferior a 500 gramas. A aplicação pode ser feita por derramamento, injeção ou moldagem.

Armazenagem

Resinas epóxi são estáveis por um longo período de tempo à temperatura ambiente. Entretanto é comum acontecer a cristalização da resina SQ 2119, onde o mesmo aumenta de viscosidade ou até mesmo endurece, dando a impressão que a mesma polimerizou sem adição de endurecedor. Este processo é facilmente revertido, abrindo a embalagem e aquecendo o mesmo entre 40°C a 70°C por 01 hora. Após este tempo misture muito bem até o fundo, tampe e deixe esfriar. Após esfriar pode ser usado normalmente. Este aquecimento deve ser feito preferencialmente em estufa seca, sem uso de chamas ou faíscas. Caso não possua estufa, é possível uso de banho maria, tomando-se o cuidado de não contaminar a resina com água ou vapor. Recomendamos que o sistema seja armazenado em local fresco onde não haja variação brusca de temperatura ficando entre 18°C a 30°C. Após um período de armazenagem, faça o processo acima descrito e homogenize bem antes de usar.

Os endurecedores, por serem materiais reativos, devem receber maior cuidado quanto ao contato ou proximidade com ácidos, álcalis e água. Evite misturar com outros produtos químicos. Devem ser armazenados nas embalagens originais, bem fechados em local seco, coberto, longe do sol, e fontes de calor, em temperatura de 18°C a 30°C.

Vida útil: Dentro das especificações de armazenagem, as embalagens não abertas tem vida útil garantida de 12 (doze) meses, todavia estes materiais podem resistir vários meses mais dependendo de prévia análise.

Precauções no manuseio do sistema

Instruções contínuas ao pessoal envolvido no manuseio dos compostos químicos deverão ser dadas com referência às consequências do contato com a pele, olhos e inalação, tanto quanto as precauções necessárias para a operação segura. Os procedimentos normais de higiene e segurança na manipulação de produtos químicos em geral devem ser seguidos. A resina é solúvel em acetona ou thinner de boa qualidade. Resinas epóxi e seus endurecedores podem causar intoxicações em caso de superexposição e, portanto devem ser manuseadas com segurança, seguindo três princípios básicos:

- Evitar contato com a pele ou os olhos

- Evitar inalar vapores
- Evitar a ingestão

Vestimenta apropriada é necessária para evitar o contato. Vestimenta improvisada aumenta o risco de acidentes. O tipo específico de vestimenta depende da operação a ser realizada. Usar EPI adequado. A contaminação da área de trabalho deve ser minimizada pelo emprego de recursos capazes de evitá-la, tais como mesas e aparelhos para processamentos, limpos e dispostos com segurança. O contato com o material pode ser evitado pelo uso de luvas e em caso de derramamento, recolher com material absorvente e depositar em local adequado. O contato com vapores pode ser prevenido com suficiente ventilação. O local de trabalho deve ser isolado de outras áreas de trabalho a fim de evitar a exposição de pessoas e equipamentos de áreas adjacentes.

Anexo D – Termômetro digital portátil com 5 sensores

Descrição

Totalmente microcontrolado, o termômetro digital portátil “Penta III” mostrado na Figura 51, monitora e indica a temperatura de 5 pontos distintos. Por ser uma ferramenta de grande versatilidade, é excelente para medições de temperatura em aparelhos de ar condicionado central, automotivo ou de janela, freezers, balanceamento frigorífico de evaporadores, temperatura média no interior de veículos e salas, máquinas em geral, temperatura de óleo, água ou outros líquidos. Também é empregado com eficiência em equipamentos médico-hospitalares.

Figura 51 – Termômetro digital portátil Full Gauge Controls



Fonte: Full Gauge (2014)

Recursos:

- Seleção automática ou manual dos 5 sensores;
- Registros de temperaturas máximas e mínimas;
- Função (travamento das indicações instantâneas, máximas e mínimas) ;
- Inserção de offset nas indicações (repadronização);
- Indicador de bateria fraca;
- Indicação de sensor danificado ou temperatura fora da faixa;

- Indicação de temperatura diferencial;
- Indicação de temperatura média;
- Seleção de unidade de temperatura (°C ou °F);
- Desligamento automático configurável.

Especificações Técnicas

- Alimentação: Uma Bateria de 9 V
- Faixa de medição: -50,0 a 105,0°C (-58,0 a 221°F)
- Temperatura de operação: 0 a 50°C (32 a 122°F)
- Resolução: 0,1°C de -50,0 a 105,0°C (0,1°F de -58,0 a 199,9°F) e 1°F de 200 a 221°F
- Precisão: $\pm 0,3\%$
- Número de sensores: 5
- Cabo dos sensores: 1 x 26AWG tipo microfone
- Comprimento: 1,5 m
- Marca: Full Gauge Controls

ANEXO E – *Datasheet* de componentes eletrônicos tipo FPGA

Este documento possui ao todo 132 páginas e foi obtido no site do fabricante. Ele trata de vários componentes eletrônicos tipo FPGA do fabricante “XILINKS”. No Anexo E inserido neste trabalho contém apenas três páginas que diz respeito às informações das características térmicas dos componentes eletrônicos, nestas valem destacar:

- Modelo do componente eletrônico;
 - Spartan-3A FPGA Family;
- Temperatura de junção: Existe uma subfamília desta com componentes eletrônicos comerciais e outra industriais. A temperatura de junção varia conforme a subfamília;
 - Comercial: 0 a 85°C;
 - Industrial: -40 a 100°C
- Resistência térmica junção-case e resistência térmica junção-board: Existem pequenas variações no encapsulamento dentro desta família de componentes eletrônicos. A resistência térmica junção-case e resistência térmica junção-board variam conforme estas variações conforme mostrado na Tabela 16.

Tabela 16 – Resistência térmica junção-case e resistência térmica junção-board dos componentes eletrônicos da família “Spartan-3A FPGA Family”

Package	Device	Junction-to-Case (θ_{JC}) [°C/W]	Junction-to-Board (θ_{JB}) [°C/W]
VQ100	XC3S50A	12,9	30,1
VQG100	XC3S200A	10,9	25,7
TQ144 TQG144	XC3S50A	16,5	32,0
FT256 FTG256	XC3S50A	16,0	33,5
	XC3S200A	10,3	23,8
	XC3S400A	8,4	19,3
	XC3S700A	7,8	18,6
	XC3S1400A	5,4	14,1

FG320	XC3S200A	11,7	18,5
FGG320	XC3S400A	9,9	15,4
FG400	XC3S400A	9,8	15,5
FGG400	XC3S700A	8,2	13,0
FG484	XC3S700A	7,9	12,8
FGG484	XC3S1400A	6,0	9,9
FG676	XC3S1400A	5,8	9,4
FGG676			

Fonte: Elaboração do próprio autor.

As três páginas mencionadas deste *datasheet* são apresentadas nas três páginas a seguir.



Spartan-3A FPGA Family: Data Sheet

DS529 August 19, 2010

Product Specification

Module 1: Introduction and Ordering Information

DS529-1 (v2.0) August 19, 2010

- Introduction
- Features
- Architectural and Configuration Overview
- General I/O Capabilities
- Production Status
- Supported Packages and Package Marking
- Ordering Information

Module 2: Spartan-3A FPGA Family: Functional Description

DS529-2 (v2.0) August 19, 2010

The functionality of the Spartan®-3A FPGA family is described in the following documents.

- [UG331: Spartan-3 Generation FPGA User Guide](#)
 - Clocking Resources
 - Digital Clock Managers (DCMs)
 - Block RAM
 - Configurable Logic Blocks (CLBs)
 - Distributed RAM
 - SRL16 Shift Registers
 - Carry and Arithmetic Logic
 - I/O Resources
 - Embedded Multiplier Blocks
 - Programmable Interconnect
 - ISE® Design Tools and IP Cores
 - Embedded Processing and Control Solutions
 - Pin Types and Package Overview
 - Package Drawings
 - Powering FPGAs
 - Power Management
- [UG332: Spartan-3 Generation Configuration User Guide](#)
 - Configuration Overview
 - Configuration Pins and Behavior
 - Bitstream Sizes
 - Detailed Descriptions by Mode
 - Master Serial Mode using Platform Flash PROM
 - Master SPI Mode using Commodity Serial Flash
 - Master BPI Mode using Commodity Parallel Flash
 - Slave Parallel (SelectMAP) using a Processor
 - Slave Serial using a Processor
 - JTAG Mode
 - ISE iMPACT Programming Examples
 - MultiBoot Reconfiguration
 - Design Authentication using Device DNA
- [UG334: Spartan-3A/3AN FPGA Starter Kit User Guide](#)

Module 3: DC and Switching Characteristics

DS529-3 (v2.0) August 19, 2010

- DC Electrical Characteristics
 - Absolute Maximum Ratings
 - Supply Voltage Specifications
 - Recommended Operating Conditions
- Switching Characteristics
 - I/O Timing
 - Configurable Logic Block (CLB) Timing
 - Multiplier Timing
 - Block RAM Timing
 - Digital Clock Manager (DCM) Timing
 - Suspend Mode Timing
 - Device DNA Timing
 - Configuration and JTAG Timing

Module 4: Pinout Descriptions

DS529-4 (v2.0) August 19, 2010

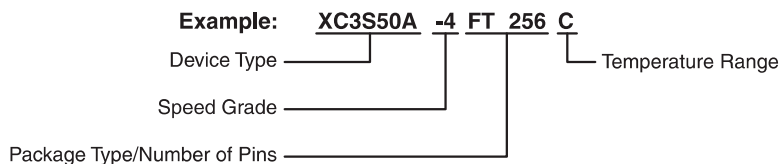
- Pin Descriptions
- Package Overview
- Pinout Tables
- Footprint Diagrams

For more information on the Spartan-3A FPGA family, go to www.xilinx.com/spartan3a

Spartan-3A FPGA	Status
XC3S50A	Production
XC3S200A	Production
XC3S400A	Production
XC3S700A	Production
XC3S1400A	Production

Ordering Information

Spartan-3A FPGAs are available in both standard and Pb-free packaging options for all device/package combinations. The Pb-free packages include a 'G' character in the ordering code.



DS529-1_05_011309

Device	Speed Grade	Package Type / Number of Pins ⁽¹⁾		Temperature Range (T _J)	
XC3S50A	—4 Standard Performance	VQ100/ VQG100	100-pin Very Thin Quad Flat Pack (VQFP)	C	Commercial (0°C to 85°C)
XC3S200A	—5 High Performance (Commercial only)	TQ144/ TQG144	144-pin Thin Quad Flat Pack (TQFP)	I	Industrial (–40°C to 100°C)
XC3S400A		FT256/ FTG256	256-ball Fine-Pitch Thin Ball Grid Array (FTBGA)		
XC3S700A		FG320/ FGG320	320-ball Fine-Pitch Ball Grid Array (FBGA)		
XC3S1400A		FG400/ FGG400	400-ball Fine-Pitch Ball Grid Array (FBGA)		
		FG484/ FGG484	484-ball Fine-Pitch Ball Grid Array (FBGA)		
		FG676/ FGG676	676-ball Fine-Pitch Ball Grid Array (FBGA)		

Notes:

- See [Table 2](#) for specific device/package combinations.
- See [DS681](#) for the XA Automotive Spartan-3A FPGAs.

Revision History

The following table shows the revision history for this document.

Date	Version	Revision
12/05/06	1.0	Initial release.
02/02/07	1.1	Promoted to Preliminary status. Updated maximum differential I/O count for XC3S50A in Table 1 . Updated differential input-only pin counts in Table 2 .
03/16/07	1.2	Minor formatting updates.
04/23/07	1.3	Added "Production Status" section.
05/08/07	1.4	Updated XC3S400A to Production.
07/10/07	1.4.1	Minor updates.
04/15/08	1.6	Added VQ100 for XC3S50A and XC3S200A and extended FT256 to XC3S700A and XC3S1400A. Added reference to SCD 4103 for 750 Mbps performance.
05/28/08	1.7	Added reference to XA Automotive version.
03/06/09	1.8	Simplified Ordering Information. Added references to Extended Spartan-3A Family. Removed reference to SCD 4103.
08/19/10	2.0	Updated Table 2 to clarify TQ/VQ size.

Package Thermal Characteristics

The power dissipated by an FPGA application has implications on package selection and system design. The power consumed by a Spartan-3A FPGA is reported using either the [XPower Power Estimator](#) or the [XPower Analyzer](#) calculator integrated in the Xilinx® ISE® development software. [Table 62](#) provides the thermal characteristics for the various Spartan-3A FPGA package offerings. This information is also available using the Thermal Query tool on xilinx.com (www.xilinx.com/cgi-bin/thermal/thermal.pl).

The junction-to-case thermal resistance (θ_{JC}) indicates the difference between the temperature measured on the package body (case) and the die junction temperature per watt of power consumption. The junction-to-board (θ_{JB}) value similarly reports the difference between the board and junction temperature. The junction-to-ambient (θ_{JA}) value reports the temperature difference between the ambient environment and the junction temperature. The θ_{JA} value is reported at different air velocities, measured in linear feet per minute (LFM). The “Still Air (0 LFM)” column shows the θ_{JA} value in a system without a fan. The thermal resistance drops with increasing air flow.

Table 62: Spartan-3A Package Thermal Characteristics

Package	Device	Junction-to-Case (θ_{JC})	Junction-to-Board (θ_{JB})	Junction-to-Ambient (θ_{JA}) at Different Air Flows				Units
				Still Air (0 LFM)	250 LFM	500 LFM	750 LFM	
VQ100 VQG100	XC3S50A	12.9	30.1	48.5	40.4	37.6	36.6	°C/Watt
	XC3S200A	10.9	25.7	42.9	35.7	33.2	32.4	°C/Watt
TQ144 TQG144	XC3S50A	16.5	32.0	42.4	36.3	35.8	34.9	°C/Watt
FT256 FTG256	XC3S50A	16.0	33.5	42.3	35.6	35.5	34.5	°C/Watt
	XC3S200A	10.3	23.8	32.7	26.6	26.1	25.2	°C/Watt
	XC3S400A	8.4	19.3	29.9	24.9	23.0	22.3	°C/Watt
	XC3S700A	7.8	18.6	28.1	22.3	21.2	20.7	°C/Watt
	XC3S1400A	5.4	14.1	24.2	18.7	17.5	17.0	°C/Watt
FG320 FGG320	XC3S200A	11.7	18.5	27.8	22.3	21.1	20.3	°C/Watt
	XC3S400A	9.9	15.4	25.2	19.8	18.6	17.8	°C/Watt
FG400 FGG400	XC3S400A	9.8	15.5	25.6	19.2	18.0	17.3	°C/Watt
	XC3S700A	8.2	13.0	23.1	17.9	16.7	16.0	°C/Watt
FG484 FGG484	XC3S700A	7.9	12.8	22.3	17.4	16.2	15.5	°C/Watt
	XC3S1400A	6.0	9.9	19.5	14.7	13.5	12.8	°C/Watt
FG676 FGG676	XC3S1400A	5.8	9.4	17.8	13.5	12.4	11.8	°C/Watt

ANEXO F – *Datasheet* de componentes eletrônicos tipo Brick

Este documento possui ao todo 4 páginas e foi obtido no site do fabricante. Ele trata da “família” de um conversor DC-DC do fabricante “CUI INC”. No Anexo F inserido neste trabalho contém três páginas que diz respeito às informações das características térmicas dos componentes eletrônicos. Nestas valem destacar:

- Modelo do componente eletrônico;
 - Série: VFB600;
 - Descrição: DC-DC CONVERTER
- Temperatura de operação do encapsulamento (case);
 - Case operating temperature: -40 a 100°C;
- Temperatura de desligamento por proteção do componente eletrônico;
 - Thermal shutdown case temp.: 110°C

Para esta família de componente não é importante conhecer a temperatura de junção. O *datasheet* não menciona em nenhum momento alguma informação sobre a temperatura de junção. Neste caso o projetista deve projetar o equipamento para que o componente eletrônico funcione com a temperatura da face superior do encapsulamento, a temperatura do case, dentro da faixa da temperatura de operação do encapsulamento e que nunca ultrapasse a temperatura de desligamento.

As três páginas mencionadas deste *datasheet* segue nas três páginas a seguir.

SERIES: VFB600 | DESCRIPTION: DC-DC CONVERTER

FEATURES

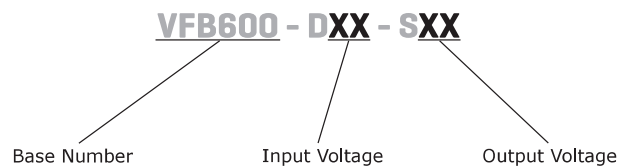
- up to 700 W isolated output
- industry standard full brick package
- 2:1 input range (18~36 V, 36~75 V)
- single output from 12~48 V
- 1,500 V isolation
- over current, over temperature, over voltage, and short circuit protections
- remote on/off
- efficiency up to 92%



MODEL	input voltage range (Vdc)	output voltage (Vdc)	output current max (A)	output power max (W)	ripple and noise ² max (mVp-p)	efficiency typ (%)
VFB600-D24-S12 ¹	18 ~ 36	12	50	600	120	89
VFB600-D24-S24	18 ~ 36	24	25	600	240	91
VFB600-D24-S28 ¹	18 ~ 36	28	21.5	600	280	90
VFB600-D24-S32 ¹	18 ~ 36	32	18.75	600	320	91
VFB600-D24-S48	18 ~ 36	48	12.5	600	480	92
VFB600-D48-S12 ¹	36 ~ 75	12	50	600	120	90
VFB600-D48-S24	36 ~ 75	24	25	600	240	91
VFB600-D48-S28 ¹	36 ~ 75	28	25	700	280	91
VFB600-D48-S32 ¹	36 ~ 75	32	18.75	600	320	92
VFB600-D48-S48	36 ~ 75	48	12.5	600	480	92

Notes: 1. UL approved
2. Ripple and noise are measured at 20 MHz BW with 220 μ F aluminum capacitor across the input. Add 470 μ F aluminum, 1 μ F ceramic, 10 μ F tantalum capacitors across output.

PART NUMBER KEY



INPUT

parameter	conditions/description	min	typ	max	units
operating input voltage		18 36	24 48	36 75	Vdc Vdc
input current	100% load, Vin = 18 V for VFB600-D24 series 100% load, Vin = 36 V for VFB600-D48 series		37.7 21.7		Vdc Vdc
under voltage lockout	power up	24 V input 48 V input	16 15	17 16	Vdc Vdc
	power down	24 V input 48 V input	34 32	35 33	Vdc Vdc
	turn on	24 V input 48 V input	38 77		Vdc Vdc
	turn off	24 V input 48 V input	40 80		Vdc Vdc
over voltage protection					
positive logic remote on/off	Module ON Module OFF	1		10 0.01	mA mA
filter	PI type				

OUTPUT

parameter	conditions/description	min	typ	max	units
line regulation	measured from high line to low line			±0.2	%
load regulation	measured from full load to zero load			±0.5	%
voltage accuracy				±1.5	%
transient response	25% step load change			500	µs
adjustability ¹		60		110	%
switching frequency	24 V input 48 V input		250 300		kHz kHz
temperature coefficient			±0.03		%/°C

Notes: 1. This is accomplished by connecting an external resistor between the +Vout and +Sense pin for both trim up and trim down. A fixed resistor will be added between the -Sense and TRIM pin.

PROTECTIONS

parameter	conditions/description	min	typ	max	units
over voltage protection	%Vo	115		140	%
short circuit protection	continuous				
current limit		110		150	%
thermal shutdown case temp.			110		°C

SAFETY AND COMPLIANCE

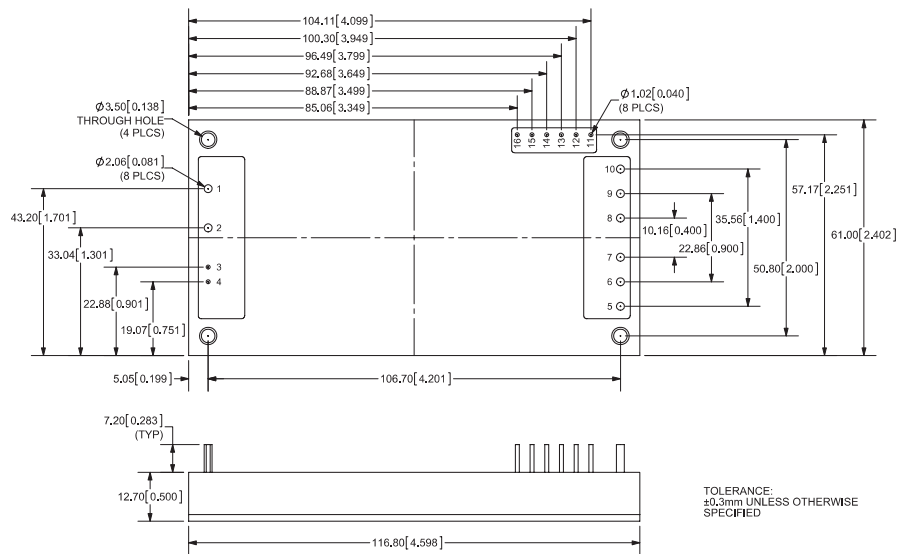
parameter	conditions/description	min	typ	max	units
isolation voltage	input to output	1,500			Vdc
	input to case	1,500			Vdc
	output to case	1,500			Vdc
isolation resistance		10			MΩ
isolation capacitance			4,000		pF
safety approvals	UL 60950-1, EN 60950-1				
RoHS compliant	yes				

ENVIRONMENTAL

parameter	conditions/description	min	typ	max	units
case operating temperature		-40		100	°C
storage temperature		-55		105	°C
humidity	non-condensing			95	%

MECHANICAL

parameter	conditions/description	min	typ	max	units
dimensions	4.60 x 2.40 x 0.50 (116.8 x 61.0 x 12.7 mm)				inch
case material	aluminum baseplate with plastic case				
weight			260		g

MECHANICAL DRAWING

PIN CONNECTIONS	
PIN	FUNCTION
1	-Vin
2	+Vin
3	-0n/Off
4	+0n/Off
5 ~ 7	+Vo
8 ~ 10	-Vo
11	-S
12	+S
13	TRIM
14	PC/NC
15	IOC
16	AUX

All dimensions in mm[inches]:

Note: All specifications measured at 25°C, nominal input voltage, and full load unless otherwise noted.

APÊNDICE A – Trabalhos publicados e submetidos pelo autor

Participação e Publicação no Congresso INTERCON 2014

Apresentação do trabalho na forma de apresentação oral e publicação do artigo no memorial do “XXI Congreso Internacional de Ingeniería Electrónica, Eléctrica y Computación INTERCON 2014”, realizado de 04 a 08 de Agosto de 2014 em Arequipa, Perú. O artigo é apresentado nas cinco páginas a seguir.

Methodology for Thermal Simulation of Electronic Devices without Knowing of the Power Dissipation

Reginaldo R. Sousa, Ailton A. Shinoda, Amarildo T. Paschoalini, and Márcio A. Bazani

Abstract—When electronic projects are developed, the knowledge of all the characteristics of this project is necessary. Some electronic circuits present components with elevated power dissipation, that can generate serious problems to the developed product. The electronic components are limited with regard to greatest temperature of operation, such propriety is denominated junction temperature. If the junction temperature will be exceeded, the component will present inadequate behavior or be able to be damaged.

Ideally, the electrical design and thermal design go together in the development of equipment, in order to obtain an optimized product. The problem is that in many cases there is an enormous difficulty to meet the thermal power dissipated of electronic components, not of resistors or capacitors, but integrated circuits that have inside, a very complex structure containing thousands or millions of transistors. The objective of this work is to present a methodology that is based into numerical correlations, practical tests, to know the field of temperature in electronic devices without the knowledge of the power dissipation..

I. INTRODUCTION

A thermal design of electronic equipment is one of the most important parts of the product in which it is crucial to the reliability of the same. Verification of thermal projects consists of experimental tests and computer simulations that will ensure that the results meet or not the requirements of the specifications of the product.

Over the past 30 years, there was a huge desire to improve the computational tools to solve engineering problems. For a thermal analysis on electronic equipment or part of them, the finite element method has been the most widely used. The complex structures are no big problem with the advancement of computational power. The complex structures are no longer a problem with the advancement of computational power. Currently there are supercomputers comprised of thousands of processing cores working together to solve the large arrays generated in finite element analysis. However new problems

appear. In modern industry, engineers who use commercial software to analyze thermal issues in electronic equipment, has great difficulty in meeting all of the required parameters for setting the software. One of the parameters of extreme importance is the heat dissipation of electronic components.

For some models of electronic components is difficult to know this parameter is the case of modern integrated circuits that have thousands of terminals and still has its functioning influenced by some software that runs within it, and that probably it is built by other manufacturers.

In these cases, there is a need for practical tests. In many cases, information obtained through experimental tests are needed to provide data for simulations. Experimentation can also be used to check the simulated (Tom Lee; Mahalingam, 1994).

The aim of this study and present a methodology to correlate the numerical model with the model practical for a situation of easy practical construction and extrapolate these results to the desired situation.

II. DESCRIPTION OF THE PROBLEM

The problem that was analyzed in this work, it was to know the temperature of the printed circuit boards, and their respective components, of a commercial router wi-fi of unknown thermal specification, working inside the bracket of the payphones in the Rio de Janeiro city on a sunny day, with an ambient temperature of 37°C.

In this work, the router will be called a RTWF. All materials involved in the problem are known.

A. Methodology

The methodology used for the realization of this work consists in the realization of practical tests and numerical simulations. Until the final result, the following steps were performed:

1) *Practical test*: because it is a product with thermal dissipation data components not known, first a test was done with equipment for identification of components more heated and measure the temperature of the same. During the test, the RTWF was all the time without the cover and in a horizontal position. So, it is easier to work.

2) *Create the numerical model*: the numerical model developed is similar to the practice test. The goal is to correlate the two models. This correlation basically consists of randomly choose the dissipated power of each electronic component (the most important), do the simulation in commercial software, Ansys, analyze the results and check

R. R. Sousa is with the Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, SP 15385-000 Brazil (corresponding author to provide phone: +55-18-98101-5142; e-mail: rrsousa@aluno.feis.unesp.br).

A. A. Shinoda with the Department of Electrical Engineering in Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, SP 15385-000 Brazil (e-mail: shinoda@dee.feis.unesp.br).

A. T. Paschoalini with the Department of Mechanical Engineering in Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, SP 15385-000 Brazil (e-mail: tabone@dem.feis.unesp.br).

M. A. Bazani with the Department of Mechanical Engineering in Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, SP 15385-000 Brazil (e-mail: bazani@dem.feis.unesp.br).

This work was supported by the Electrical Engineering Department of Universidade EStatual Paulista - UNESP.

whether it is equal to the practical test. If this does not occur, define new powers for the components and make this cycle until you get in the numerical model the same practical test result. The analyzed result is the temperature at the points that were monitored in the test.

3) *Numerical model validation*: It was made another numerical simulation and other practical test, but this time with the closed box. In the simulation was used to obtained correlation and numerical results are compared with the practical test.

4) *Extrapolate the model to the desired situation*: After this correlation, the power dissipated of electronic components become known, so the model can be extrapolated to the desired situation, in case the RTWF working within the support of payphones in the city of Rio de Janeiro on a sunny day with ambient temperature of 37°C, as mentioned earlier.

To test the reliability of the correlation, another practical test was realized, this time with the closed box. This model was also created in numerical simulation software and the results were compared. The average relative error was 3,2%.

B. Practical test of the RTWF with the open box

This test consisted of excite RTWF, identify the components that were heating and collect the temperatures. The equipment was powered by fountain by 48Vdc and connected to a phone line for ADSL connection with nominal band of 8Mbps. To excite the RTWF, five notebooks and a cell phone were networked, all with instant messengers and web browser running in normal use and three performing downloads.

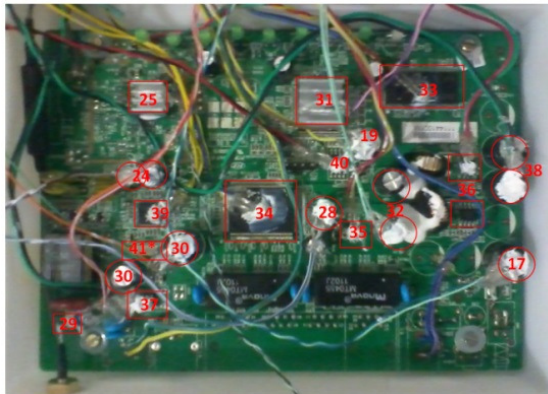


Fig. 1. Identification of Components



Fig. 2. Practical test photos

TABLE I
TEMPERATURE OF THE ELECTRONIC COMPONENTS
(PRACTICAL TEST – OPEN BOX)

Ref.*	Temp[°C]	Note
--	29,4	Ambient temperature
17	33,0	
19	41,6	
24	37	
25	54,9	Sensor on the bottom of the heatsink
28	39,2	
29	41,7	
30	44,5	
31	57,8	Sensor on the bottom of the heatsink
32	37,0	
33	45,1	
34	45,5	
35	41,5	
36	44,7	
37	50,2	
38	37,4	
39	56,4	
40	45,4	
41	45,5	
--	40,0	Resistor – Source
--	37,0	Trafo – Source
--	40,3	CI 1 – Source
--	40,9	CI 2 – Source

* References as shown in Figure 2

C. Creation and correlation of numerical model

The same test environment was created in numerical simulation software.

For each component, the heat dissipation has been tested in order to achieve the same temperature value of the practical test. This process is known as correlation (correlate the practical result with the numeric result).

TABLE II
TEMPERATURE OF THE ELECTRONIC COMPONENTS
(NUMERICAL SIMULATION – OPEN BOX)

Ref.*	Quantity	Temp[°C]	Power [mW]	Note
--	--	29,4	--	Ambient temperature
17	1	33,0	32	
19	1	41,6	20	
24	2	37	12	
25	1	54,9	190	Sensor on the bottom of the heatsink
28	2	39,2	25	
29	1	41,7	18	
30	2	44,5	43/70	
31	1	57,8	300	Sensor on the bottom of the heatsink
32	2	37,0	30	
33	1	45,1	65	
34	1	45,5	85	
35	1	41,5	9	
36	2	44,7	25	
37	1	50,2	40	
38	2	37,4	40	
39	1	56,4	67	
40	1	45,4	10	
41	1	45,5	20	
--	2	40,0	5/12	Resistor – Source
--	2	37,0	85	Trafo – Source
--	1	40,3	80	CI 1 – Source
--	1	40,9	345	CI 2 – Source
Overall			1845	Thermal dissipation

* References as shown in Figure 2

D. Numerical Simulation of the RTWF with the close box

After the correlation, the numerical model was created with the close box. The intention was to compare the results of this model with a new test that would be made later.

TABLE III
TEMPERATURE OF THE ELECTRONIC COMPONENTS
(NUMERICAL SIMULATION – CLOSE BOX)

Ref.*	Temp[°C]
Ambient temperature	28,5
25	65
31	73
33	53
34	59
37	56
39	65
40	57
Cover of the box	45

* References as shown in Figure 2

E. Practical test of the RTWF with the close box

To test the reliability of the obtained correlation, another practical test was done, but this time the RTWF with the close box, as well as in numerical simulation. These results were compared with those obtained in the numerical simulation with the closed box. The relative error of these results can be seen in the fourth column of table 4. The average relative error was about 3%.

TABLE IV
TEMPERATURE OF THE ELECTRONIC COMPONENTS
(PRACTICAL TEST – CLOSE BOX)

Ref.*	Temp [°C] Numerical Simulation	Temp [°C] Practical Test	Relative Error [%]
Ambient Temperature	28,5	28,5	--
25	65	65,5	0,7
31	73	70,6	3,3
33	53	57,1	7,1
34	59	58,7	0,5
37	56	60,2	6,9
39	65	67,3	3,4
40	57	57,7	1,2
Cover	45	46,4	3,0
Average relative error			3,26

* References as shown in Figure 2

F. Numerical simulation of RTWF operating within the payphones

This topic solves the objective of this work that knowing the temperature field of the RTWF device operating inside the bracket of the payphones, in Rio de Janeiro on a sunny day with ambient temperature of 37°C.



Fig. 4. Payphones



Fig. 5. Bracket of the payphones

The RTWF was modeled inside the bracket of the payphones, shown in figure 5, which is located between the bubble of fibreglass and the phone. The numerical model that represents this configuration is composed of: bracket, RTWF,

fiberglass wall, steel wall, adiabatic wall and heat flux, see figures 6 and 7.

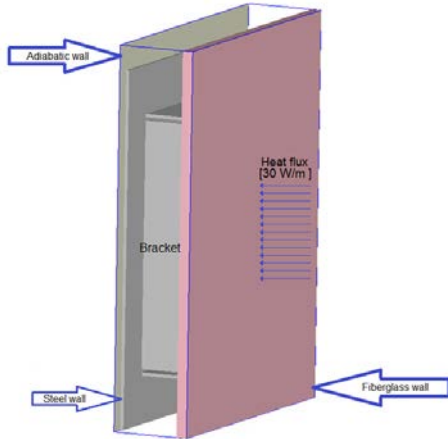


Fig. 6. Ansys software model of RTWF operating within the payphones

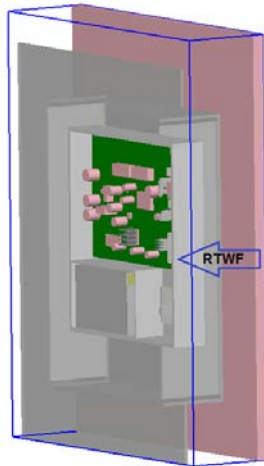


Fig. 7. Ansys software model of RTWF inside the bracket of the payphones

G. Considerations and boundary conditions

The numerical simulation was made with the following considerations:

- 1) Ambient temperature: 38°C.
- 2) Solar Incidence: Heat flux = 30W/m².
- 3) The heat generated by the components of the RTWF does not cross the wall between the support that holds the RTWF and the phone (adiabatic wall).
- 4) Box material: ABS, conductivity: 0,23[W/m·K] (isotropic).
- 5) Support material, steel wall e source wall: Steel, conductivity: 71,0[W/m·K] (isotropic).
- 6) Fiberglass wall: Glass fiber. conductivity: 0,046[W/m·K] (isotropic).
- 7) Material of components that are marked as epoxy in figure 8: epoxy, conductivity: 0,20[W/m·K] (isotropic).
- 8) Material of components that are marked as copper in figure 8: Copper, conductivity: 387,6[W/m·K] (isotropic).
- 9) Material of components that are marked as aluminium in figure 8: Aluminium, conductivity: 240[W/m·K] (isotropic).

- 10) Material of components that are marked as steel in figure 8: Steel, conductivity = 71,0[W/m·K] (isotropic).
- 11) Material of components that are marked as ceramic in figure 8: Ceramic, conductivity: 15,0[W/m·K] (isotropic).
- 12) Material of components that are marked as FR4 in figure 8: FR4, conductivity: 0,35[W/m·K] (isotropic).
- 13) Heatsink material: Aluminium extruded, conductivity: 205[W/m·K] (isotropic).

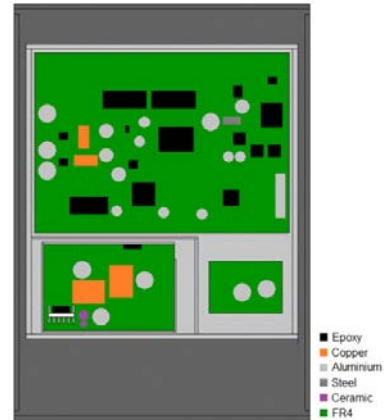


Fig. 8. Numerical Model's Materials

III. RESULTS

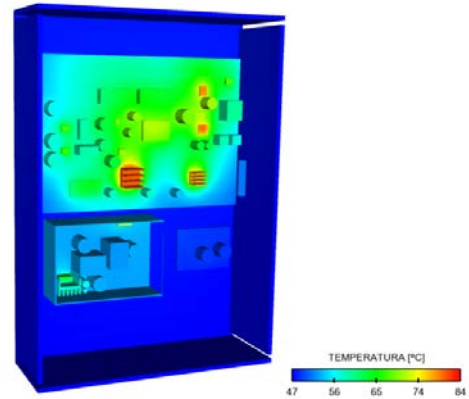


Fig. 9. RTWF – Field of temperature

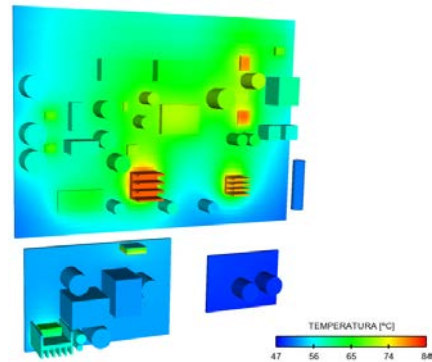


Fig. 10. PCB field of temperature

IV. CONCLUSION

The methodology to know the temperature of the printed circuit boards, and their respective components of the RTWF device, proved to be very efficient. The errors in the results are very small. The average relative error was about 3% and the standard deviation was 2,4°C. So the results obtained in this work have qualitative and quantitative value..

It would be interesting to study the improvement of results using techniques of effective thermal conductivity for the printed circuit board.

To determine if this device can work in this configuration must identify the datasheets of the components and find the junction temperatures and operational temperatures of the components and compare with the results of the simulation. In this way it is possible to check if any component exceeds the junction temperature and calculate the MTBF of the equipment.

REFERENCES

- [1] [1] A. C. Avelar, Theoretical and experimental analysis of the heat transfer in printed circuit boards forming open vertical channels. Campinas: [s.n.], 1997. Disponível em: <<http://libdigi.unicamp.br/document/?code=vtls000118876>>.
- [2] [2] T. Y. Tom Lee, M. Mahalingam, Application of a CFD tool for system-level thermal simulation. [s.l.: s.n.], 1994. p. 564-572.
- [3] [3] R. Hienonen, M. Karjalainen, R. Lankinen, Verification of the thermal design of electronic equipment. Espoo: [s.n.], 1997. Disponível em: <<http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/1997/P320.pdf>>.
- [4] [4] LIS; WIECEK; WAJMAN. Thermal compact modeling for power electronic devices in D2Pak enclosures. Poland: [s.n.], 2002. Disponível em: <<http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2002/papers/022.pdf>>.
- [5] [5] Y. A. Cengel, "Heat Transfer, A Practical Approach", McGraw-Hill, 1998.
- [6] [6] K. Azar, J. E. Graebner, "Experimental Determination of Thermal Conductivity of Printed Wiring Boards", Proceedings of the Twelfth IEEE SEMITHERM Symposium, March 1996, pp. 169 - 182.
- [7] [7] F. P. Incropera; D. P. Witt. Fundamentos de transferência de calor e massa. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 664 p.
- [8] [8] A. Bejan, Advanced engineering thermodynamics. 2th ed. New York: [s.n.], 1997. 540 p.

Submissão de Artigo ao Jornal DYNA Medellin

Após a publicação do artigo no memorial do “XXI Congreso Internacional de Ingeniería Electrónica, Eléctrica y Computación INTERCON 2014”, o Jornal Colombiano DYNA Medellin (CAPES A2, ENGENHARIAS IV) apresentou interesse na publicação do mesmo. Entretanto o Jornal fez algumas solicitações de melhorias no artigo. As solicitações foram realizadas e o artigo foi enviado ao Jornal. A resposta sobre a publicação ainda está sendo aguardada. O artigo é apresentado nas seis páginas a seguir.

Methodology for Thermal Simulation of Electronic Devices without Knowing of the Power Dissipation

Reginaldo R. Sousa ^a, Ailton A. Shinoda ^b, Amarildo T. Paschoalini ^c, & Márcio A. Bazani ^d

^a Universidade Estadual Paulista, Câmpus de Ilha Solteira, Brasil. rrsousa@aluno.feis.unesp.br

^b Universidade Estadual Paulista, Câmpus de Ilha Solteira, Brasil. shinoda@dee.feis.unesp.br

^c Universidade Estadual Paulista, Câmpus de Ilha Solteira, Brasil. tabone@dem.feis.unesp.br

^d Universidade Estadual Paulista, Câmpus de Ilha Solteira, Brasil. bazani@dem.feis.unesp.br

Received: September 02th, 2014. Received in revised form: October 30th, 2014. Accepted: -- -- --.

Abstract

Electronic components with high thermal dissipation, can cause serious problems for the developed product. The electronic components are limited by the maximum operating temperature, this characteristic is called junction temperature. If the junction temperature is exceeded, the component will present inadequate behavior or may be damaged. Ideally, the electrical design and thermal design go together in the development of equipment, in order to obtain an optimized product. The problem is that in many cases there is an enormous difficulty to meet the thermal power dissipated of electronic components, not of resistors or capacitors, but integrated circuits that have inside, a very complex structure containing thousands or millions of transistors. The objective of this work is to present a methodology that is based into numerical correlations and practical tests, to know the temperature field in electronic devices without the knowledge of the power dissipation.

Keywords: Thermal simulation , power dissipation, heat source, numerical correlation, integrated circuit.

Resumen

Los componentes electrónicos con alta disipación térmica pueden causar graves problemas en el producto desarrollado. Los componentes electrónicos están limitados por la temperatura máxima de funcionamiento, esta característica se denomina temperatura de la unión. Si se supera la temperatura de la unión, el componente exhibirá un comportamiento inapropiado o puede estar dañado. Idealmente, el proyecto de diseño térmico y eléctrico van juntos en el desarrollo de los equipos con el fin de obtener un producto óptimo. El problema es que en muchos casos existe una gran dificultad para alcanzar con la potencia térmica, no hay resistencias o condensadores. Los circuitos integrados tienen en el interior, una estructura muy compleja, por que contiene miles o millones de transistores. El objetivo de este trabajo es presentar una metodología basada en las correlaciones numéricas y pruebas prácticas, para conocer el campo de temperatura en la electrónica, sin el conocimiento de la disipación térmica.

Palabras clave: Simulación térmica, disipación térmica, fuente de calor, correlación numérica, circuito integrado.

1 Introduction

A thermal design of electronic equipment is one of the most important parts of the product in which it is crucial to the reliability of the same. Verification of thermal projects consists of experimental tests and computer simulations that will ensure that the results meet or not the requirements of the specifications of the product.

Over the past 30 years, there was a huge desire to improve the computational tools to solve engineering problems. For a thermal analysis on electronic equipment or part of them, the finite element method has been the most widely used. The complex structures are no longer a problem with the advancement of computational power. Currently there are supercomputers comprised of thousands of processing cores working together to solve the large arrays generated in finite element analysis. However new problems appear. In modern

industry, engineers who use commercial software to analyze thermal issues in electronic equipment, has great difficulty in meeting all of the required parameters for setting the software. One of the parameters of extreme importance is the heat dissipation of electronic components.

For some models of electronic components is difficult to know this parameter is the case of modern integrated circuits that have thousands of terminals and still has its functioning influenced by some software that runs within it, and that probably it is built by other manufacturers.

In these cases, there is a need for practical tests. In many cases, information obtained through experimental tests are needed to provide data for simulations. Experimentation can also be used to check the simulated (Tom Lee; Mahalingam, 1994).

The aim of this study and present a methodology to correlate the numerical model with the model practical for a

situation of easy practical construction and extrapolate these results to the desired situation.

2 Description of the problem

To support the methodology presented in this paper, two cases were analyzed. The problem that was analyzed, it was to know the temperature of the printed circuit boards, and their respective components, of a commercial “Router Wi-Fi” of unknown thermal specification, working inside the bracket of the payphones in the Rio de Janeiro city on a sunny day, with an ambient temperature of 37°C. This router is a box that contains three printed circuit boards, the Wi-Fi plate, the source plate and the phone plate.

In this work, the router is called RTWF.

3 Methodology

The methodology used for the realization of this work consists in the realization of practical tests and numerical simulations. Until the final result, the following steps were performed:

3.1 Practical test

Because it is a device with unknown thermal dissipation, first a test was done with equipment for identification of components more heated and measures the temperature of the same. During the test, the RTWF was all the time without the cover and in a horizontal position. So, it is easier to work.

3.2 Create the numerical model

The numerical model developed is similar to the practice test. The goal is to correlate the two models. This correlation basically consists of randomly choose the dissipated power of each electronic component (the most important), do the simulation in commercial software, Ansys, analyze the results and check whether it is equal to the practical test. If this does not occur, define new powers for the components and make this cycle until you get in the numerical model the same practical test result. The analyzed result is the temperature at the points that were monitored in the test.

3.3 Numerical model validation

It was made another numerical simulation and other practical test, but this time with the closed box. In the simulation was used to obtained correlation and numerical results are compared with the practical test.

3.4 Extrapolate the model to the desired situation

After this correlation, the power dissipated of electronic components become known, so the model can be extrapolated to the desired situation, in case the RTWF working within the support of payphones in the city of Rio de Janeiro on a sunny day with ambient temperature of 37°C, as mentioned earlier.

To test the reliability of the correlation, another practical test was realized, this time with the closed box. This model was also created in numerical simulation software and the results were compared. The average relative error was 3.2%.

4 The case Router

4.1 Practical test of the RTWF with the open box

This test consisted of excite RTWF, identify the components that were heating and collect the temperatures. The equipment was powered by fountain by 48Vdc and connected to a phone line for ADSL connection with nominal band of 8Mbps. To excite the RTWF, five notebooks and a cell phone were networked, all with instant messengers and web browser running in normal use and three performing downloads. The last four components of the table 1 are of the source plate. No component of plate phone presented any significant warming.

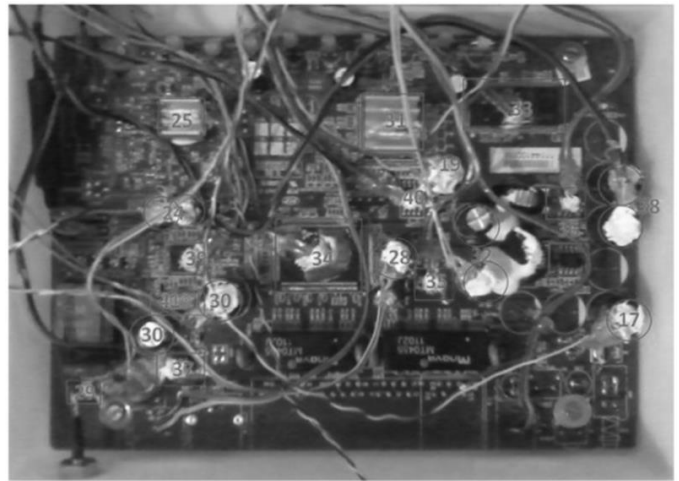


Figure 1. Identification of Components in the Wi-Fi plate

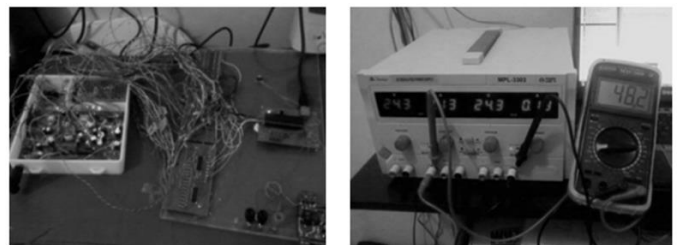


Figure 2. Practical test photos

Table 1.
Results of the electronic components (practical test – open box).

Reference*	Temperature [°C]	Note
--	29.4	Ambient temperature
17	33.0	
19	41.6	
24	37.0	
25	54.9	Sensor on the bottom of the heatsink
28	39.2	
29	41.7	
30	44.5	
31	57.8	Sensor on the bottom of the heatsink
32	37.0	
33	45.1	
34	45.5	
35	41.5	
36	44.7	
37	50.2	
38	37.4	
39	56.4	
40	45.4	
41	45.5	
--	40.0	Resistor – Source
--	37.0	Trafo – Source
--	40.3	IC 1 – Source
--	40.9	IC 1 – Source

* References as shown in figure 1

4.2 Creation and correlation of numerical model

The same test environment was created in numerical simulation software.

For each component, the heat dissipation has been tested in order to achieve the same temperature value of the practical test. This process is known as correlation (correlate the practical result with the numeric result).

Table 2.
Results of the electronic components (numerical simulation – open box).

Reference*	Quantity	Temperature [°C]	Power dissipation [mW]
--	--	29.4	--
17	1	33.0	32
19	1	41.6	20
24	2	37.0	12
25	1	54.9	190
28	2	39.2	25
29	1	41.7	18
30	2	44.5	43/70
31	1	57.8	300
32	2	37.0	30
33	1	45.1	65
34	1	45.5	85
35	1	41.5	9
36	2	44.7	25
37	1	50.2	40
38	2	37.4	40
39	1	56.4	67
40	1	45.4	10
41	1	45.5	20
--	--	40.0	--
--	2	37.0	5/12

--	2	40.3	85
--	1	40.9	345
All together components			1845

* References as shown in figure 1

4.3 Numerical Simulation of the RTWF with the close box

After the correlation, the numerical model was created with the close box. The intention was to compare the results of this model with a new test that would be made later.

Table 3.
Results of the electronic components (numerical simulation – close box).

Reference*	Temperature [°C]
Ambient temperature	28.5
25	65
31	73
33	53
34	59
37	56
39	65
40	57
Cover of the box	45

* References as shown in figure 1

4.4 Practical test of the RTWF with the close box

To test the reliability of the obtained correlation, another practical test was done, but this time the RTWF with the close box, as well as in numerical simulation. These results were compared with those obtained in the numerical simulation with the closed box. The relative error of these results can be seen in the fourth column of table 4. The average relative error was about 3%.

Table 4.
Results of the electronic components (numerical simulation – close box).

Reference*	Temperature [°C] Numerical Simulation	Temperature [°C] Practical Test	Relative Error [%]
Ambient temperature	28.5	28.5	--
25	65	65.5	0.7
31	73	70.6	3.3
33	53	57.1	7.1
34	59	58.7	0.5
37	56	60.2	6.9
39	65	67.3	3.4
40	57	57.7	1.2
Cover of the box	45	46.4	3.0
Average relative error			3.26

* References as shown in figure 1

4.4 Extrapolate the model – Numerical simulation of RTWF operating within the payphones

This topic solves the objective of this work that knowing the temperature field of the RTWF device operating inside the bracket of the payphones, in Rio de Janeiro on a sunny day with ambient temperature of 37°C.



Figure 3. Payphones



Figure 4. Bracket of the payphones

The RTWF was modeled inside the bracket of the payphones, shown in figure 5, which is located between the bubble of fiberglass and the phone. The numerical model that represents this configuration is composed of: bracket, RTWF,

fiberglass wall, steel wall, adiabatic wall and heat flux, see figures 5 and 6.

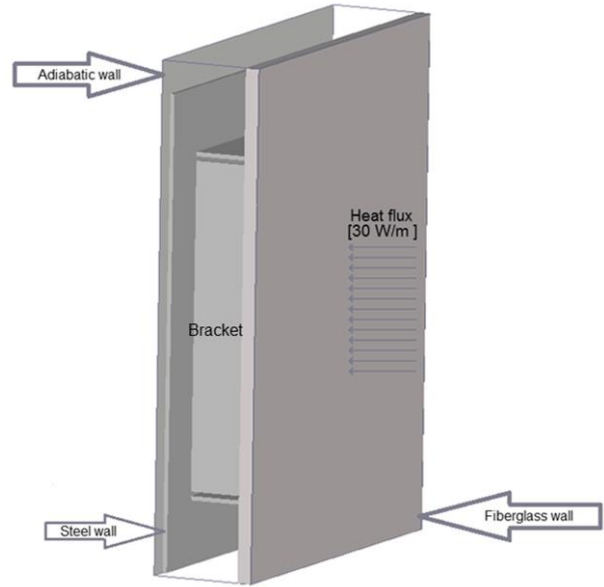


Figure 5. Ansys software model of RTWF operating within the payphones

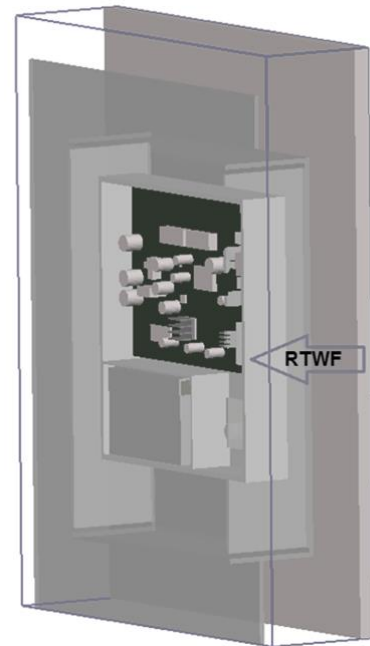


Figure 6. Ansys software model of RTWF operating within the payphones

4.4.1 Considerations and boundary conditions

The numerical simulation was made with the following considerations:

- Ambient temperature: 38°C.
- Solar Incidence: Heat flux = 30W/m².
- The heat generated by the components of the RTWF does not cross the wall between the support that holds the RTWF and the phone (adiabatic wall).

- Box material: ABS, conductivity: $0.23[\text{W/m}\cdot\text{K}]$ (isotropic).
- Support material, steel wall e source wall: Steel, conductivity: $71.0[\text{W/m}\cdot\text{K}]$ (isotropic).
- Fiberglass wall: Glass fiber. conductivity: $0.046[\text{W/m}\cdot\text{K}]$ (isotropic).
- Material of components that are marked as epoxy in figure 8: epoxy, conductivity: $0.20[\text{W/m}\cdot\text{K}]$ (isotropic).
- Material of components that are marked as copper in figure 8: Copper, conductivity: $387.6[\text{W/m}\cdot\text{K}]$ (isotropic).
- Material of components that are marked as aluminum in figure 8: Aluminum, conductivity: $240[\text{W/m}\cdot\text{K}]$ (isotropic).
- Material of components that are marked as steel in figure 8: Steel, conductivity = $71.0[\text{W/m}\cdot\text{K}]$ (isotropic).
- Material of components that are marked as ceramic in figure 8: Ceramic, conductivity: $15.0[\text{W/m}\cdot\text{K}]$ (isotropic).
- Material of components that are marked as FR4 in figure 8: FR4, conductivity: $0.35[\text{W/m}\cdot\text{K}]$ (isotropic).
- Heatsink material: Aluminum extruded, conductivity: $205[\text{W/m}\cdot\text{K}]$ (isotropic).

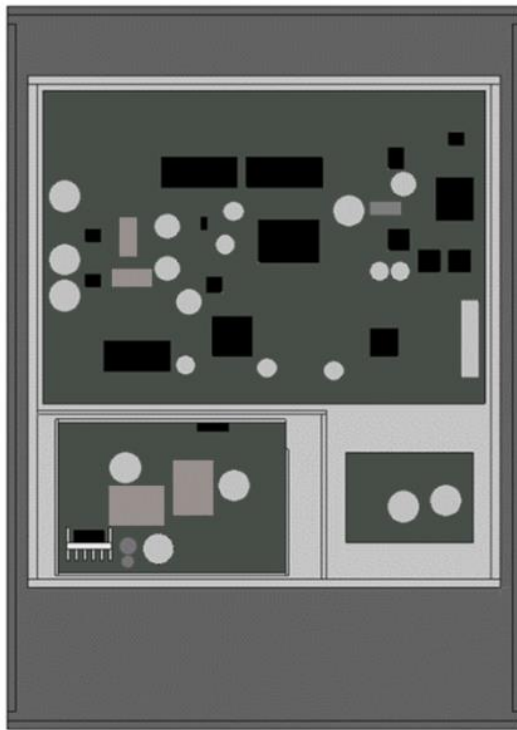


Figure 7. Numerical Model's Materials

4.4.2 Results

The temperature field of the RTWF operating within the payphones is showed in the figure 8. This result can be seen in figure 9 also, but in this case only the printed circuit boards constituting the RTWF are shown.



Figure 8. Temperature field of the RTWF.

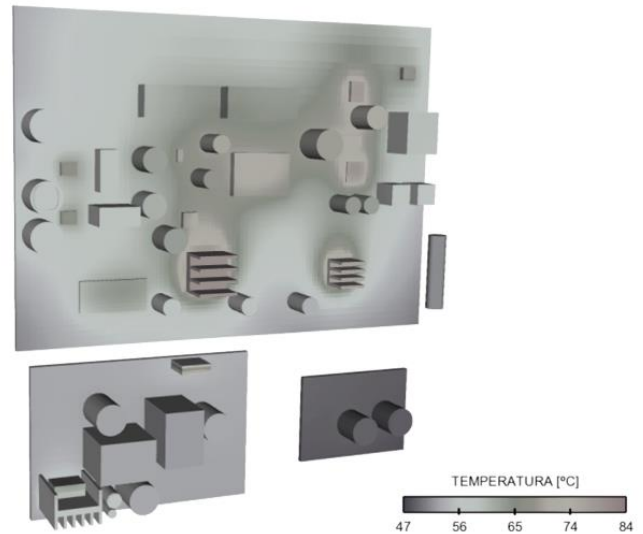


Figure 9. Temperature field of the PCB.

4.4.3 Junction temperature

The junction temperature of the electronic components is the variable that the design engineer responsible for thermal management, want and need to know. After the temperature field of the components is known, as was seen in section 4.4.2, we can calculate the junction temperature as follows:

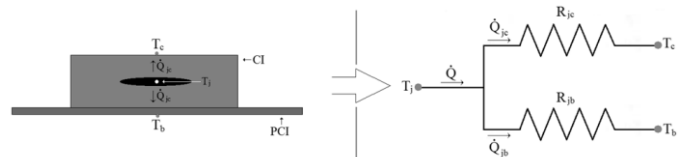


Figure 10. Model of heat transfer in a typical component

- T_j is the junction temperature;
- T_c is the temperature of the upper surface of the package or case temperature;

- T_b is the temperature of the plate;
- $\dot{Q}$ is the energy that the die turns into heat (power dissipation);
- $\dot{Q}_{jc}$ is the heat flux from the die to the upper face of the package;
- $\dot{Q}_{jb}$ is the heat flux from the die to the PCB;
- R_{jc} is the thermal resistance between the die and the upper face of the package;
- R_{jb} is the thermal resistance between the die and PCB.

The numerical simulation provides T_c and T_b . The R_{jc} and R_{jb} are data provided by the datasheets of components. The $\dot{Q}$ is a known variable through numerical correlation presented in this work, Section 4.2. So, there are three unknown variables: T_j , $\dot{Q}_{jc}$ and $\dot{Q}_{jb}$, but through the scheme shown in Figure 10 and making an analogy with Ohm's law, we can construct three equations:

$$R_{jc} = \frac{T_j - T_c}{\dot{Q}_{jc}} \quad (1)$$

$$R_{jb} = \frac{T_j - T_b}{\dot{Q}_{jb}} \quad (2)$$

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{jc} + \dot{Q}_{jb} \quad (3)$$

Making the appropriate mathematical manipulations with the equations 1, 2 and 3, it is possible to deduce the equation 4. Through this equation we can calculate T_j .

$$T_j = \left(\frac{R_{jc} \cdot \dot{Q} \cdot R_{jb}}{R_{jb} + R_{jc}} \right) + \left(\frac{R_{jc} \cdot T_b}{R_{jb} + R_{jc}} \right) + \left(\frac{T_c \cdot R_{jb}}{R_{jb} + R_{jc}} \right) \quad (4)$$

5 Conclusion

The methodology to know the temperature of the printed circuit boards, and their respective components of the RTWF device, proved to be very efficient. The errors in the results are very small. The average relative error was about 3% and the standard deviation was 2.4°C. So the results obtained in this work have qualitative and quantitative value.

It would be interesting to study the improvement of results using techniques of effective thermal conductivity for the printed circuit board.

To determine if this device can work in this configuration must identify the datasheets of the components and find the maximum junction temperature of the components and compare with the results of the simulation and the junction temperature that has been calculated using the equation to calculate the junction temperature presented in this work, equation 4. In this way it is possible to check if any component exceeds the junction temperature and calculate the mean time between failures (MTBF) of the equipment.

References

- [1] A. C. Avelar, Theoretical and experimental analysis of the heat transfer in printed circuit boards forming open vertical channels. Campinas: [s.n.], 1997. Available on: <<http://libdigi.unicamp.br/document/?code=vtls000118876>>.
- [2] T. Y. Tom Lee, M. Mahalingam, Application of a CFD tool for system-level thermal simulation. [s.l.: s.n.], 1994. p. 564-572.
- [3] R. Hienonen, M. Karjalainen, R. Lankinen, Verification of the thermal design of electronic equipment. Espoo: [s.n.], 1997. Available on: <<http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/1997/P320.pdf>>.
- [4] LIS; WIECEK; WAJMAN. Thermal compact modeling for power electronic devices in D2Pak enclosures. Poland: [s.n.], 2002. Available on: <<http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2002/papers/022.pdf>>.
- [5] Y. A. Cengel, "Heat Transfer, A Practical Approach", McGraw-Hill, 1998.
- [6] K. Azar, J. E. Graebner, "Experimental Determination of Thermal Conductivity of Printed Wiring Boards", Proceedings of the Twelfth IEEE SEMITHERM Symposium, March 1996, pp. 169 - 182.
- [7] F. P. Incropera; D. P. Witt. Fundamentos de transferência de calor e massa. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 664 p.
- [8] A. Bejan, Advanced engineering thermodynamics. 2th ed. New York: [s.n.], 1997. 540 p.

Participação e Publicação no COBEM 2013

Outro artigo produzido durante as pesquisas do doutorado foi publicado e apresentado na forma de pôster no “22nd International Congress of Mechanical Engineering”, realizado de 03 a 07 de Novembro de 2013 em Ribeirão Preto, Brasil. O artigo é apresentado nas onze páginas a seguir.

ANALYSIS OF EFFECTIVE THERMAL CONDUCTIVITY OF PRINTED CIRCUIT BOARDS WITH A SYMMETRICAL OR ASYMMETRICAL HEAT SOURCE

Reginaldo Ribeiro de Sousa

Ailton Akira Shinoda

Universidade Estadual Paulista – UNESP, Av. Brasil, N°56, Centro, Ilha Solteira-SP, Brazil
rrsousa@aluno.feis.unesp.br, shinoda@dee.feis.unesp.br

Amarildo Tabone Paschoalini

Universidade Estadual Paulista – UNESP, Av. Brasil, N°56, Centro, Ilha Solteira-SP, Brazil
tabone@dem.feis.unesp.br

Márcio Antonio Bazani

Universidade Estadual Paulista – UNESP, Av. Brasil, N°56, Centro, Ilha Solteira-SP, Brazil
bazani@dem.feis.unesp.br

Alessandro Moraes Martins

Universidade Estadual Paulista – UNESP, Av. Brasil, N°56, Centro, Ilha Solteira-SP, Brazil
alessandro62180@aluno.feis.unesp.br

Alex Pereira da Cunha

Universidade Estadual Paulista – UNESP, Av. Brasil, N°56, Centro, Ilha Solteira-SP, Brazil
alex.cunha@aluno.feis.unesp.br

Abstract. This work has a main objective to obtain correlations for the effective thermal conductivity of a Printed circuit board (PCB) with a heat source. Numerical solutions of three-dimensional heat conduction equation were used to study variation of the effective thermal conductivity of PCBs with the size and geometric shape of the heat source. These numerical solutions were obtained using the commercial software ANSYS. Solutions were obtained for two, three and four numbers of internal copper layers, and different size components and rectangular and circular geometry of the heat source. It was shown that the effective thermal conductivity of a PCB would be larger than the values given by the one-dimensional effective thermal conductivity model if the heat source on the PCB were smaller than the PCB itself, taking into account the geometry asymmetrical from heat source. The difference was more pronounced for smaller heat source.

Keywords: Thermal Conductivity, Effective Thermal Conductivity, Printed Circuit Board, Heat Source, Numerical Simulation

1. INTRODUCTION

The compression of electronic components has generated problems in maintaining stable systems. These problems are generated due to increased power density dissipated. Part of this energy is dissipated by heat transfer by conduction to the PCB. With increasing power density, the amount of heat that is dissipated through the PCB becomes an important fraction of the total heat dissipated by these devices. The heat generated by the components is conducted to the PCB through their leads and or cases, which in turn dissipates this heat to other components if necessary, and the surrounding environment. This heat transfer depends on the thermal conductivity of the PCB. Manno, 1993 showed the significant impact of the PCB conduction on the maximum board and component temperatures. Shaukatullah and Gaynes, 1994 showed that the thermal performance of surface mount packages was sensitive to the amount of copper in the PCB.

PCBs are complex multi-layer structures in which layers of high thermal conductivity copper are sandwiched between those of low thermal conductivity glass-epoxy. Because of the large difference between the thermal conductivities of copper and glass-epoxy, the thermal conductivity of the PCB, as a whole, is strongly orthotropic. Modeling layers of copper and glass-epoxy of the PCI in a numerical model of an electronic device makes the model very large, generating a long time to calculate each iteration and greater number of iterations for convergence of the governing equations. To overcome this obstacle, PCBs are usually modeled as single objects with parallel (in the plane of the board) and normal (perpendicular to the board) effective thermal conductivities. For Yunus, 1998, the effective parallel and normal thermal conductivities are typically calculated assuming one-dimensional heat conduction through a composite layer, and for Azar and Gralebner, 1996, neglecting the thermal contact resistance between the copper and glass-epoxy layers. For a PCB with N_c , number of copper layers and N_g , number of glass-epoxy layers:

$$k_{p,e} = \frac{\sum_{i=1}^{N_c} k_c t_{c,i} + \sum_{i=1}^{N_g} k_g t_{g,i}}{t} \quad (1)$$

$$k_{n,e} = \frac{t}{\sum_{i=1}^{N_c} \frac{t_{c,i}}{k_c} + \sum_{i=1}^{N_g} \frac{t_{g,i}}{k_g}} \quad (2)$$

Where t is the total thickness of PCB, $t_{c,i}$ and $t_{g,i}$ are the thicknesses of the i th copper and glass-epoxy layers, and k_c and k_g are thermal conductivities of copper and glass-epoxy. This model is called the “one-dimensional effective thermal conductivity” model (k-eff-1D model).

For cases where the component is smaller than the PCI, which is very common in the electronics industry, consider the one-dimensional heat conduction through the board, may result in large errors. Shabany, 2002, showed how the model k-eff-1D may be inaccurate in these situations and he proposed modifications to this model. Shabany suggested the “modified effective thermal conductivity” model (k-eff-mod model), in which the effective parallel and normal thermal conductivity of the PCB model were obtained by an iterative process. This process included two steps. First, numerical solution of the heat conduction equation in the detailed PCB geometry was used to obtain the maximum source temperature and the maximum board temperature opposite the source. Then, numerical solution of the heat conduction equation in the orthotropic model of the same PCB (the second model mentioned above) was obtained with a given set of parallel and normal thermal conductivities. These thermal conductivities were iteratively corrected such that the maximum heat source temperature and the maximum PCB temperature opposite the heat source were predicted within 1% of the values predicted by the detailed PCB simulation. The result was to obtain two equations correlating the thermal conductivity (one for normal and the other for the parallel) obtained through the k-eff-1D model, with the thermal conductivity obtained with the k-eff-mod model, as a function of the length of the heat source and the plate, plate thickness and copper layers to a heat source square.

The purpose of this article is to use the method k-eff-mod to get these correlations as a function of source area and the plate, the plate thickness and the copper layers, to a heat source rectangular and circular, and the other as a function of radius of the source, the length of the plate, the plate thickness and the copper layers, to circular heat source.

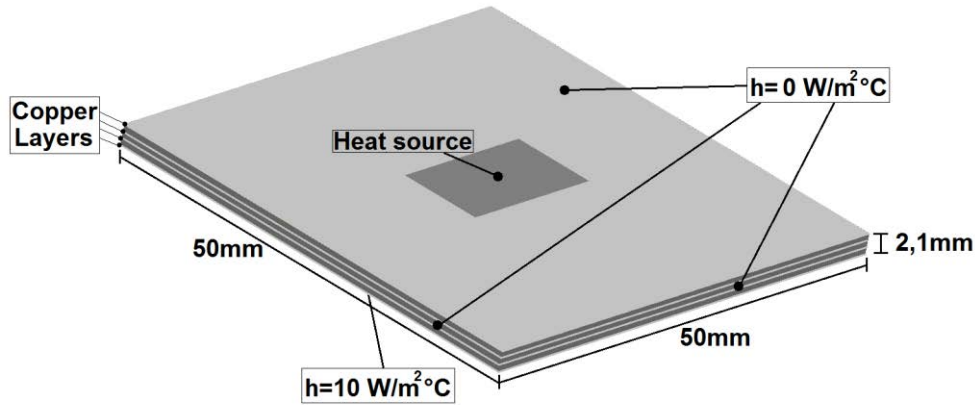


Figure 1 – Detailed model of the PCB with two copper inner layers and two outer layers of copper, solder side and component side

2. PROBLEM DESCRIPTION

To obtain correlations for the effective thermal conductivity of a PCB with a heat source, it is necessary to know the value of $k_{p,e}$, $k_{n,e}$, $k_{p,m}$ and $k_{n,m}$, that are the thermal conductivity parallel and normal for the k-eff-1D model and thermal conductivity parallel and normal for the k-eff-mod model respectively.

The equations 1 e 2, give the $k_{p,e}$ and $k_{n,e}$, respectively. To obtain $k_{p,m}$ and $k_{n,m}$, the numerical simulations were performed in two steps, first using the detailed model (PCB modeled with layers of copper and epoxy), and second, the simplified model (PCB was represented by a single object with effective thermal conductivity parallel and normal). The solutions were obtained for rectangular heat source and circular heat source.

The problem described below was modeled numerically and computer simulations were performed for the detailed model, which the plate was modeled in layers of glass-epoxy ($k_g=0,25$ W/m°C) and copper ($k_c=390$ W/m°C), see figure 1, and for the k-eff-mod model, the plate was modeled as a single object with a certain thermal conductivity to the plane parallel to the plate and another to the plane normal to the plate, see figure 2.

Consider a 50 mm x 50 mm x 2,1 mm PCB with 35 μm thick internal copper layers and 17,5 μm thick external copper layers (lower and upper) as shown in figure 1. The internal copper layers are positioned uniformly in the PCB thickness. The top and sides of this PCB are insulated and the convection heat transfer coefficient and air temperature on the bottom side are $10\text{W/m}^2\text{°C}$. The heat source centrally located on upper surface and it dissipates 2 W.

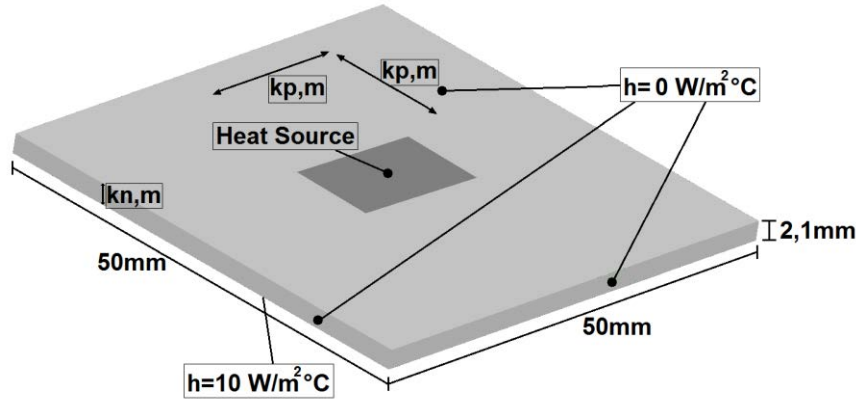


Figure 2 – Simplified model of the PCB with two copper inner layers and two outer layers of copper, solder side and component side

In the cases analyzed, the heat source does not have a constant geometry. It varies in size and shape and may be circular or rectangular, and can occupy at least 1% of the PCB area and maximum 51% for the rectangular geometry and 40% for circular geometry. Furthermore, the amount of copper inner layers can extend from 2 to 4. Tables 1 and 2 give a summary of all cases analyzed.

Table 1. Cases analyzed for a Rectangular Heat Source.

Number of Layers →	2	3	4
A_s/A_b (Heat Source Area/Board Area)	0,0101	0,0101	0,0101
	0,0240	0,0240	0,0240
	0,0577	0,0577	0,0577
	0,0960	0,0960	0,0960
	0,2160	0,2160	0,2160
	0,3110	0,3110	0,3110
	0,3840	0,3840	0,3840
	0,4860	0,4860	0,4860
	0,5189	0,5189	0,5189

For the situation described the k-eff-1D model has limitations. For given boundary conditions, the maximum heat source temperature, T_s , and the maximum temperature of the board opposite from the heat source, T_b , are functions of the PCB length, L_b , and thickness, t , number of copper layers, N_c , thickness of the i th copper layer, $t_{c,i}$, number of glass epoxy layers, N_g , thickness of the i th glass-epoxy layer, $t_{g,i}$, thermal conductivities of copper and glass-epoxy, k_c and k_g , and the length of the heat source, L_s .

$$T_s = f_1(L_b, t, N_c, t_{c,i}, N_g, t_{g,i}, k_c, k_g, L_s) \quad (3)$$

$$T_b = f_2(L_b, t, N_c, t_{c,i}, N_g, t_{g,i}, k_c, k_g, L_s) \quad (4)$$

Table 2. Cases analyzed for a Circular Heat Source.

Number of Layers →	2	3	4
r_s/L_b (Heat Source radius/Board length)	0,0568	0,0568	0,0568
	0,0874	0,0874	0,0874
	0,1355	0,1355	0,1355
	0,1748	0,1748	0,1748
	0,2622	0,2622	0,2622
	0,3147	0,3147	0,3147
	0,3496	0,3496	0,3496
	0,3933	0,3933	0,3933
	0,0568	0,0568	0,0568

Now let's assume this PCB is modeled as a single object with different parallel and normal thermal conductivities. For the same boundary conditions, the maximum heat source and board temperatures are functions of the PCB length, L_b , and thickness, t , parallel and normal thermal conductivities of the PCB model, k_p and k_n , and the length of the heat source, L_s .

$$T_s = g_1(L_b, t, k_p, k_n, L_s) \quad (5)$$

$$T_b = g_2(L_b, t, k_p, k_n, L_s) \quad (6)$$

Equating equations 3 to 5 and equations 4 to 6 gives two implicit equations for the parallel and normal thermal conductivities. These equations show that the parallel and normal thermal conductivities of the PCB model have to be functions of the number, thickness and thermal conductivity of each copper and glass-epoxy layer as well as the heat source and board dimensions.

$$k_p = h_1(N_c, t_{c,i}, N_g, t_{g,i}, k_c, k_g, t, L_b, L_s) \quad (7)$$

$$k_n = h_2(N_c, t_{c,i}, N_g, t_{g,i}, k_c, k_g, t, L_b, L_s) \quad (8)$$

The k-eff-1D model neglects the dependence of k_p , and k_n on the heat source

3. RESULTS

Numerical solutions of the three dimensional heat conduction equations for a PCB and a heat source were used to establish correlations for equations 7 and 8. Two different representations of a PCB were simulated by ANSYS software Computational Fluid Dynamics (CFD). The first consisted of a PCB square of side 50 mm, modeled with details of copper and epoxy layers. A heat source in a rectangular shape (6.5 mm x 3.9 mm to 46.5 mm x 27.9 mm) was centered at the top of this PCB. The second representation is similar to the first, except that the PCB was represented by a single object with effective thermal conductivity parallel and normal. It was assumed that the top side of the PCB (the component side) was insulated and a heat transfer coefficient of 10 W/m²°C were assigned to the bottom side of the PCB. This analysis was repeated for circular heat source (radius 2.8 mm to 20 mm).

The thermal conductivity parallel and normal were obtained by the method suggested by Shabani described in the introduction, however it were iteratively corrected such that the maximum heat source temperature (T_s) and the maximum PCB temperature (T_b) opposite the heat source were predicted at the second decimal values provided by the detailed simulation, in other words, to the temperature values obtained in the simulations, the iterative process ending when the temperature difference between the detailed model T_s and the k-eff-mod model T_s and the detailed model T_b and the k-eff-mod model T_b was less than 0.01%. This error of 0.01% was set because of the difficulty of obtaining a curve between $k_{p,m}/k_{p,e} \times A_s/A_b$. This means that to adjust the error with a thermal conductivity greater than or equal to 1%, the $k_{p,m}$ values vary widely, so this makes it difficult to obtain a graph of a trend line representing all points.

The convergence criteria were used for all the numerical solutions were reduction of the residual of the temperature equation below 10⁻¹².

The grid sensitivity of the numerical solutions was investigated. It was observed that for the mesh 50 x 50 x 60 elements of the models shown in figures 1 and 2, the change of T_s and T_b was in the order of 10⁻² or 0.01% error, that the error was defined as mentioned above. For a mesh of 20 x 20 x 38 elements, the error obtained was about 1%, it does not satisfy the set. Therefore, the grid used for all the simulations was 50 x 50 x 60, generating a total of 150000 elements.

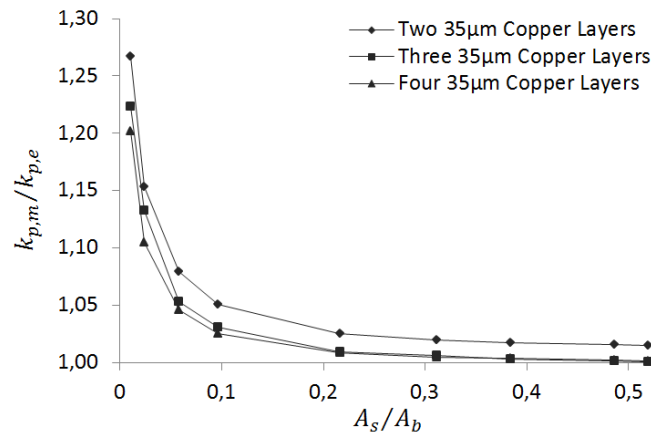


Figure 3 – Thermal conductivity parallel of the PCB with a rectangular heat source in function of the ratio between heat source area and plate area

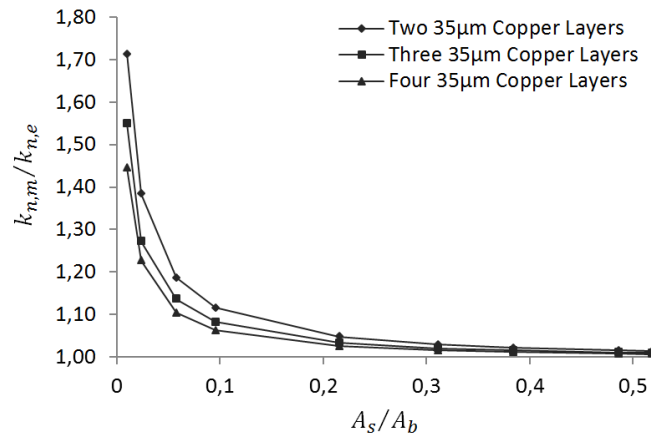


Figure 4 – Thermal conductivity normal of the PCB with a rectangular heat source in function of the ratio between heat source area and plate area

The numerical procedure above was repeated for different source sizes and source shapes to find the thermal conductivities parallel and normal for the k-eff-mod model, in function of the geometric characteristics of the plate and the heat source. The figures 3 and 4 show the ratio of thermal conductivities parallel and normal, between the k-eff-mod model and k-eff-1D model, $k_{p,m}/k_{p,e}$ and $k_{n,m}/k_{n,e}$ respectively, to a PCB with 2.1 mm thickness, in function of the ratio between the area of the heat source and the plate. It is noticed that $k_{p,m}$ is always greater than or equal to $k_{p,e}$. The ratio approaches the value 1 when the size of the heat source approaches the size of the PCB and/or when the number of inner copper layers increases.

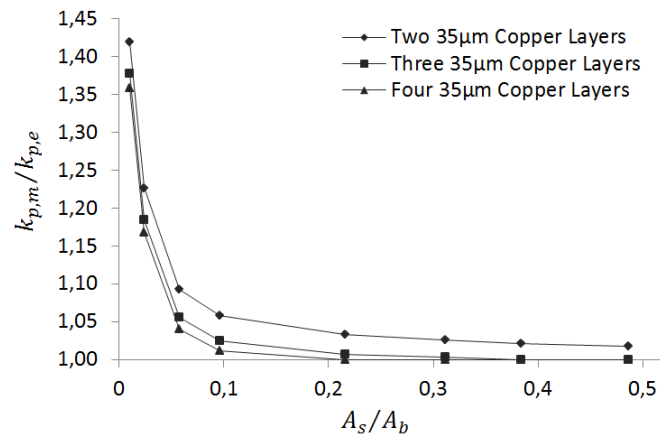


Figure 5 – Thermal conductivity parallel of the PCB with a circular heat source in function of the ratio between heat source area and plate area

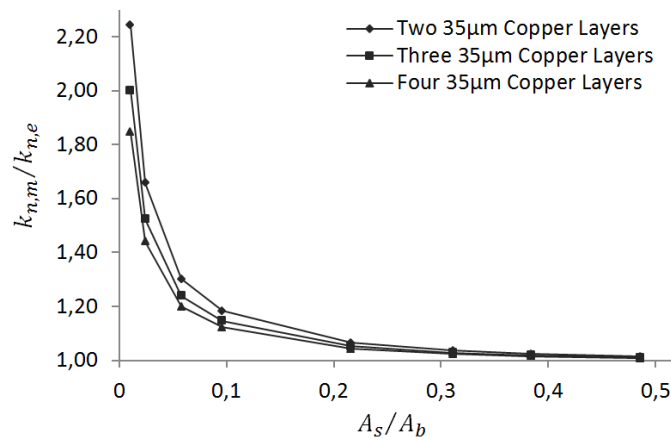


Figure 6 – Thermal conductivity normal of the PCB with a circular heat source in function of the ratio between heat source area and plate area

The figures 5 and 6 show the same procedures for the PCB with a circular heat source, and figures 7 and 8 show the results from the same scenario, but in function of the ratio between the radius of the heat source and the side of the square plate.

For the rectangular heat source, the analysis was performed only in function of the area, because as it is a rectangle the heat source has two distinct sides lengths, different from the circle and the square, which enables the analysis depending on the area, radius or side.

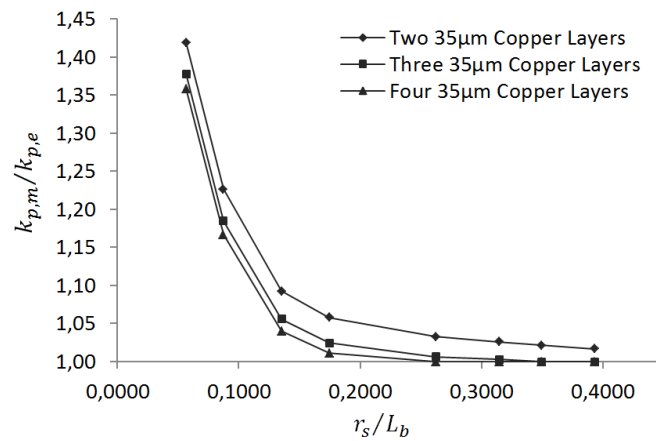


Figure 7 – Thermal conductivity parallel of the PCB with a circular heat source in function of the ratio between heat source radius and plate side

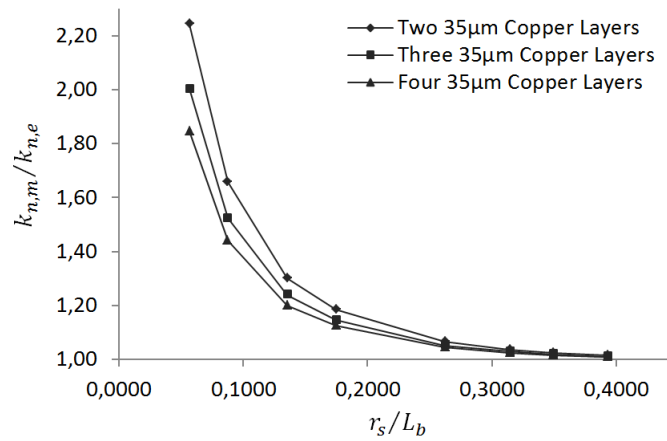


Figure 8 – Thermal conductivity normal of the PCB with a circular heat source in function of the ratio between heat source radius and plate side

The value of $k_{p,m}/k_{p,e}$ and $k_{n,m}/k_{n,e}$ that were plotted in figures 3, 4, 5 and 6 were also plotted as a function of the "scaled source area" which is defined as $[(A_s/A_b)(t_c/t)]^{0.5}$, where A_s is the area of heat source, A_b is the area of the PCB, t_c is the total thickness of all the layers of copper, and t is the thickness of the PCB. The value of the $k_{p,m}/k_{p,e}$ and $k_{n,m}/k_{n,e}$ that were plotted in figures 7 e 8 were also plotted as a function of the "scaled source length" which is defined as $(r_s/L_b)(t_c/t)^{0.5}$, where r_s is the radius of heat source, L_b is the side of the PCB. In such cases, the curves obtained in each case collapse into a single curve independent of the number of inner layers of copper.

The figures 9 and 10 show $k_{p,m}/k_{p,e}$ and $k_{n,m}/k_{n,e}$ in function of the scaled source area for the rectangular heat source.

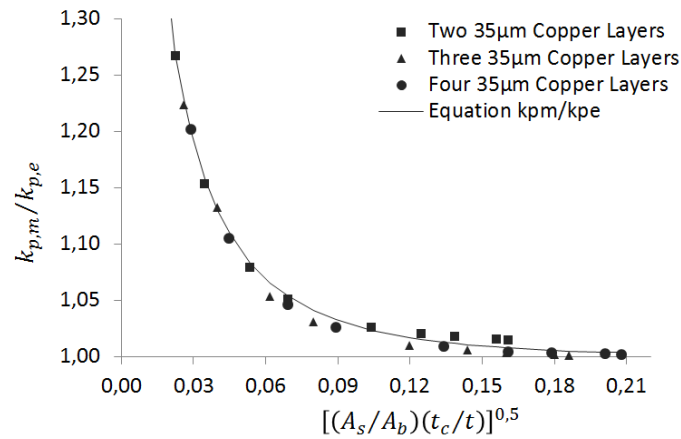


Figure 9 – Variation of the thermal conductivity parallel of the PCB with rectangular heat source in function of $[(A_s/A_b)(t_c/t)]^{0.5}$

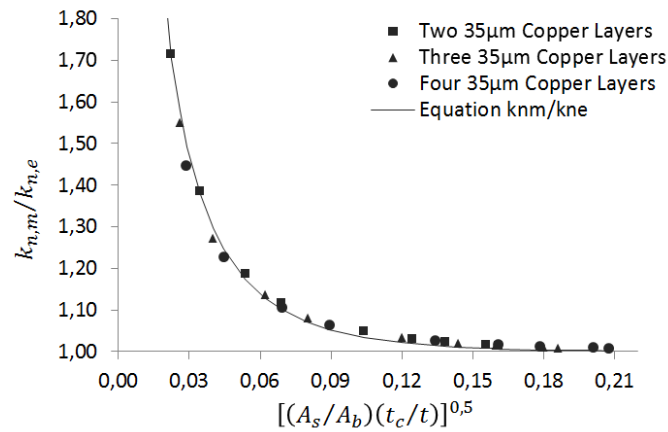


Figure 10 – Variation of the thermal conductivity normal of the PCB with rectangular heat source in function of $[(A_s/A_b)(t_c/t)]^{0.5}$

The figures 11 and 12 show $k_{p,m}/k_{p,e}$ and $k_{n,m}/k_{n,e}$ in function of the scaled source area for the circular heat source.

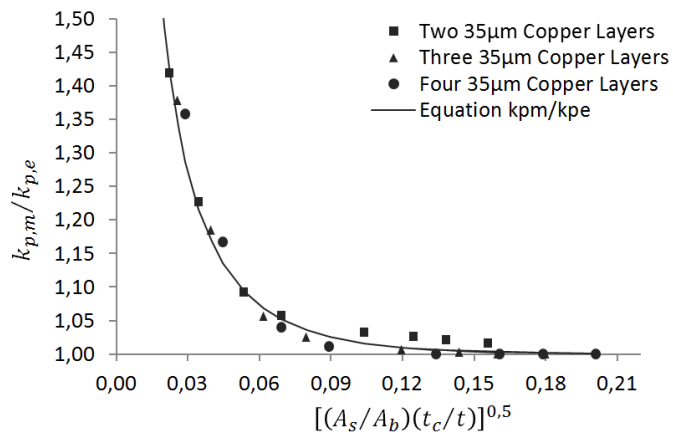


Figure 11 – Variation of the thermal conductivity parallel of the PCB with circular heat source in function of $[(A_s/A_b)(t_c/t)]^{0.5}$

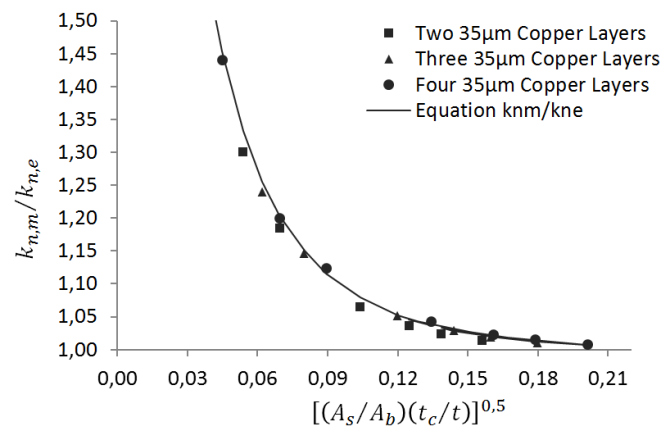


Figura 12 – Variation of the thermal conductivity normal of the PCB with circular heat source in function of $[(A_s/A_b)(t_c/t)]^{0.5}$

Finally, the figure 13 and 14 show $k_{p,m}/k_{p,e}$ and $k_{n,m}/k_{n,e}$ in function of the scaled source length for the circular heat source.

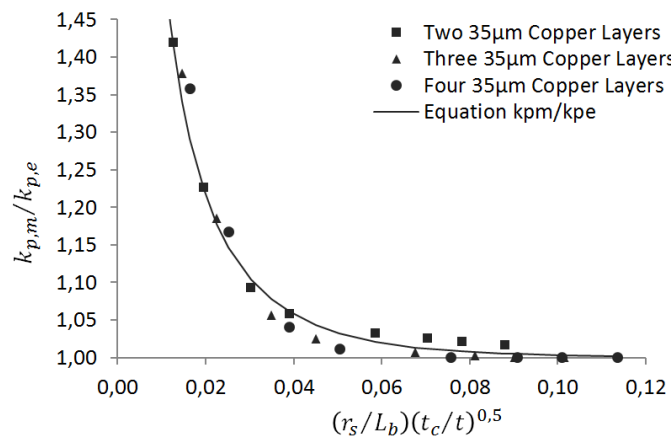


Figura 13 – Variation of the thermal conductivity parallel of the PCB with circular heat source in function of $(r_s/L_b)(t_c/t)^{0.5}$

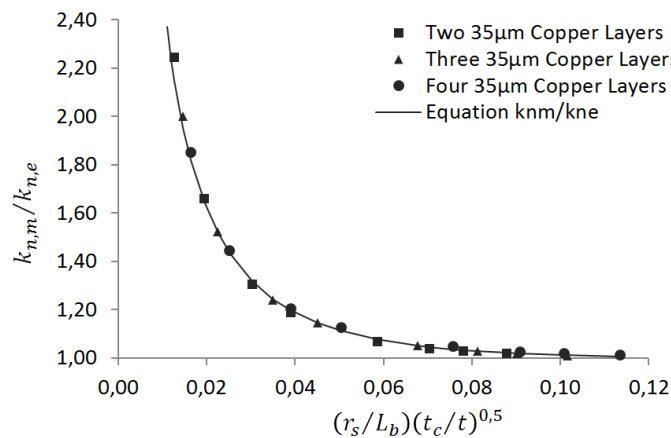


Figura 14 – Variation of the thermal conductivity normal of the PCB with circular heat source in function of $(r_s/L_b)(t_c/t)^{0.5}$

Appropriate correlations for these curves, which is the goal of this work, are given by equations 9 and 10 for the cases with the heat source rectangular in function of scaled source area, by equations 11 and 12, for the cases with the source heat circular in function of scaled source area, and the equations 13 and 14 for the cases with the circular heat source in function of scaled source length.

$$\frac{k_{p,m}}{k_{p,e}} = \left[1 - \exp \left(-14 \left(\left(\frac{A_s}{A_b} \right) \left(\frac{t_c}{t} \right)^{0,5} \right)^{0,58} \right) \right]^{-1} \quad (9)$$

$$\frac{k_{n,m}}{k_{n,e}} = \left[1 - \exp \left(-25 \left(\left(\frac{A_s}{A_b} \right) \left(\frac{t_c}{t} \right)^{0,5} \right)^{0,88} \right) \right]^{-1} \quad (10)$$

The equations 9 and 10 are the correlations for the rectangular heat source in function of the scaled source area.

$$\frac{k_{p,m}}{k_{p,e}} = \left[1 - \exp \left(-25,5 \left(\left(\frac{A_s}{A_b} \right) \left(\frac{t_c}{t} \right)^{0,5} \right)^{0,8} \right) \right]^{-1} \quad (11)$$

$$\frac{k_{n,m}}{k_{n,e}} = \left[1 - \exp \left(-23 \left(\left(\frac{A_s}{A_b} \right) \left(\frac{t_c}{t} \right)^{0,5} \right)^{0,96} \right) \right]^{-1} \quad (12)$$

The equations 11 and 12 are the correlations for the circular heat source in function of the scaled source area.

$$\frac{k_{p,m}}{k_{p,e}} = \left[1 - \exp \left(-32,5 \left(\left(\frac{r_s}{L_b} \right) \left(\frac{t_c}{t} \right)^{0,5} \right)^{0,75} \right) \right]^{-1} \quad (13)$$

$$\frac{k_{n,m}}{k_{n,e}} = \left[1 - \exp \left(-34,3 \left(\left(\frac{r_s}{L_b} \right) \left(\frac{t_c}{t} \right)^{0,5} \right)^{0,93} \right) \right]^{-1} \quad (14)$$

The equations 13 and 14 are the correlations for the circular heat source in function of the scaled source length.

4. CONCLUSION

The correlations presented here, equations 9 to 14 were obtained for a PCI square with 2.1 mm in thickness, two, three or four copper layers, evenly spaced, a layer of copper on the lower side and a layer of cooper on the upper side, uniform heat flow rectangular or circular centrally located on the PCB, and with the boundary conditions shown in figures 1 and 2. Therefore, the validity of these correlations for other conditions should be investigated.

For figures 9 to 14, it is clear that the collapse of the curves that treat thermal conductivity normal was more intense than the thermal conductivity parallel. This is due to greater sensitivity of T_s and T_b towards the normal thermal conductivity. The hypothesis is that the iterative process for obtaining $k_{p,m}$, if there are more points, as T_{s1} , T_{s2} , T_{s3} , ..., T_{sn} and T_{b1} , T_{b2} , T_{b3} , ..., T_{bn} , to compare the temperature between the detailed model and the k-eff-mod model, this problem would be eliminated.

For the circular heat source, was obtained two curves for the thermal conductivity parallel and two curves for the thermal conductivity normal. This is because the analysis was done in function of the area and the radius of the heat source. The relative error between them is about 5% and decreases with increasing heat source.

This article analyzed the effective thermal conductivity of a PCB with a single component of various sizes. For a PCB model with two or more heat source and other heat source formats, the use of these correlations must be made in order to determine the effective thermal conductivity for regions on the plate, but more research is needed.

5. REFERENCES

- V. P. Manno, N. R. Kurita and K. Azar, "Experimental Characterization of Board Conduction Effects", *In Proceedings of the Ninth IEEE SEMI-THERM Symposium*, February 1993, pp. 127 - 135.
- H. Shaukatullah and M. Gaynes, "Experimental Determination of the Effect of Printed Circuit Card Conductivity on the Thermal Performance of Surface Mount Electronic Packages", *In Proceedings of the Tenth IEEE SEMI-THERM Symposium*, February 1994, pp. 44 - 52.
- Yunus A. Cengel, 1998. *Heat Transfer, A Practical Approach*, McGraw-Hill.
- K. Azar and J. E. Graebner, "Experimental Determination of Thermal Conductivity of Printed Wiring Boards", *In Proceedings of the Twelfth IEEE SEMITHERM Symposium*, March 1996, pp. 169 - 182.
- Younes Shabany, "Component Size and Effective Thermal Conductivity of Printed Circuit Boards" *IEEE Inter Society Conference on Thermal Phenomena*, 2002.

6. RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.